



Universidad Nacional Autónoma de México

Instituto de Geología

Postgrado en Ciencias de la Tierra

**Neotectónica de la Falla Nejapa Porción oeste del Graben de
Managua - Nicaragua**

T E S I S

Para obtener el título de
Maestro en geología estructural y tectónica

P R E S E N T A

Francisco Javier Espinoza Martínez

Director de tesis: Dr. Armando García Palomo



MÉXICO D.F.

2007



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Agradecimientos

Quiero Agradecer a Dios por haberme dado la oportunidad y las fuerzas para lograr una meta más en mi vida profesional.

Quiero expresar mi profundo agradecimiento al Dr. Armando García Palomo por haber asesorado esta tesis. Por sus críticas y sugerencias en todas las etapas de este trabajo, gracias por su paciencia y comprensión.

A los Doctores Gustavo Tolson, José Luís Macías, José Luís Arce y Luís Quintanar, por haber revisado y enriquecido este trabajo con sus comentarios y sugerencias.

A la Agencia Sueca para el Desarrollo Internacional (Sida/SAREC), por haber financiado este proyecto. Al Centro de Investigaciones Geocientífica (CIGEO-UNAN, Managua), a su director Dionisio Rodríguez y al subdirector Marvin Valle, gracias por su apoyo en la realización de este proyecto.

Al Posgrado en Ciencias de la Tierra de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM-México) a su directora Dra. Blanca Mendoza, a la responsable del posgrado del Instituto de Geología, Dra. Elizabeth Solleiro, a las secretarias Maria Luisa y Gloria. A los de computo Rosario y Francisco. De igual forma agradezco a Ana Maria Rocha por correcciones del resumen en ingles.

Al Servicio Geológico Metropolitano por acogerme en sus instalaciones y por darme la oportunidad de hacer uso de su servicio. A sus integrantes, Adriana Galván, Víctor, Adrián, Carlos, Irene, América, Miguel y a la señora Silvia. En especial quiero Agradecer a Víctor por sus comentarios y sugerencia, Adriana Galván por su apoyo y sugerencia en la elaboración de mapas.

Agradezco a mis hermanos Lucia y Blanca. Mis sobrinos Cristóbal, Eliézer, Raquel, Norlan y Brayan. A las personas que me apoyaron en el campo, Santiago, Walter y Eveling. A mis compañeros Denis y Maria Nela muchas gracias por su apoyo.

Dedicatoria

A mi madre CANDIDA ELOISA ESPINOZA MARTINES y mi esposa MURIEL GOMEZ, muchas gracias por su valioso apoyo, muchas gracias por existir y por ser las personas más importante en vida.

CONTENIDO

Capítulo 1

1- Introducción.....	1
1.1- Objetivo general.....	1
1.2- Objetivo específico.....	1
1.3- Metodología.....	3

Capítulo 2

2. Tectónica de América Central.....	6
---	----------

Capítulo 3

3. Marco Geológico Regional.....	9
3.1 Formación La Sierra.....	10
3.2 Formación Managua.....	11
3.3 Formación Chiltepe.....	13

Capítulo 4

4.1 Estratigrafía del área de estudio.....	15
4.1.1. Campo Volcánico Apoyéque-Xiloá.....	15
4.1.1.1. Volcán Apoyéque.....	15
4.1.1.1.1. Flujos de Lava Apoyéque.....	17
4.1.1.1.2. Flujos de Detritos Apoyéque.....	18
4.1.1.2 Maar Xiloá.....	18
4.1.1.3 Domos de Apoyéque.....	20
4.1.1.4 Conos de Escoria Apoyéque-Xiloá.....	21
4.1.2. Campo Volcánico Cuesta de El Plomo	22
4.1.2.1 Anillos de Toba Cuesta de El Plomo.....	22
4.1.2.2 Maar Asososca.....	24
4.1.3. Campo Volcánico Ticomo.....	26
4.1.3.1 Anillos de Toba Ticomo.....	26
4.1.3.2 Anillo de Toba Nejapa.....	27
4.1.3.3 Conos de Escoria Pista Sub-urbana.....	27

Capítulo 5

5. Geología Estructural.....	30
5.1 Morfología.....	30
5.1.1 Mapa Topográfico.....	30
5.1.2 Mapa Altimétrico.....	31
5.1.3 Mapa de Pendientes.....	31
5.1.4. Mapa de Modelo Sombreado.....	32
5.2. Neotectónica	35
5.3 Neotectónica de la zona de Falla Nejapa.....	36
5.3.1 Falla Nejapa.....	36
5.3.1.1 Segmento Norte, Campo Volcánico Apoyéque-Xiloá.....	40
5.3.1.2 Segmento Central, Campo Volcánico Cuesta El Plomo.....	40
5.3.1.3 Segmento Sur, Campo Volcánico Ticomo.....	41
5.4 Semi-fosa Cuesta de El Plomo.....	42
5.5. Pilares tectónicos.....	42
5.5.1 Bloque Tectónico Mateare.....	42
5.5.2 Bloque Tectónico Nejapa.....	42
5.5.3 Bloque Tectónico Managua.....	43
5.6 Análisis Morfológico Volcánico.....	49
5.7 Geometría Estructural.....	55
5.8. Sismicidad de la Zona de Estudio.....	62
5.9. Mecanismos Focales.....	64

Capítulo 6

6. Interpretación.....	70
-------------------------------	-----------

Capítulo 7

7. Conclusiones y Recomendaciones.....	74
---	-----------

Bibliografía.....	76
--------------------------	-----------

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Mapa de Localización del Área de Estudio.....	2
Figura 2 Mapa de Verificación de Puntos Geológico del Área de Estudio.....	5
Figura 3 Mapa Tectónico de América Central.....	6
Figura 4 Cadena Volcánica de Nicaragua.....	8
Figura 5 Mapa Geológico de Nicaragua.....	14
Figura 6 Volcán Apoyéque.....	16
Figura 7 Maar Xiloá.....	19
Figura 8 Domos de Apoyéque.....	20
Figura 9 Conos de Escoria Xiloá.....	21
Figura 10 Conos de Escoria Apoyéque.....	22
Figura 11 Anillos de Toba, Campo Volcánico Cuesta El Plomo.....	24
Figura 12 Maar Asososca.....	25
Figura 13 Mapa Geológico del Área de Estudio.....	28
Figura 14 Columna estratigráfica compuesta de Managua.....	29
Figura 15 Mapa Topográfico y Altimétrico.....	33
Figura 16 Mapa de Pendientes y de Modelo sombreado.....	34
Figura 17 Mapa de Puntos Estructurales.....	38
Figura 18 Mapa Tridimensional con Zonas de Relevó del Área de Estudio.....	39
Figura 19 Fallas Listricas Formando Estructuras en Dominó.....	43
Figura 20 Fallas Conjugadas.....	44
Figura 21 Zona de Falla Cuesta de El Plomo.....	45
Figura 22 Fallas Cuesta El Plomo.....	46
Figura 23 Diques y Cono de Escoria La Embajada.....	47
Figura 24 Semifosa Cuesta El Plomo.....	48

Figura 25 Elongación y Colapso de Conos.....	49
Figura 26 Geometría de los Conos de Escoria asociado al Comportamiento de la Falla.....	50
Figura 27 Análisis Estadísticos de los Volcanes del Área de Estudio.....	51
Figura 28 Análisis de los Ejes Mayores y Dirección de Colapso de las Estructuras del Área de Estudio.....	54
Figura 29 y 30 Modelos Tridimensionales del Área de Estudio.....	56
Figura 31 Modelo Geométrico del Área de Estudio.....	57
Figura 32 Roseta de Fractura de la Falla Nejapa	58
Figura 33 Esterograma de las Fallas Cuesta El Plomo y Fallas Antitéticas.....	58
Figura 34 Mapa de Secciones del Área de Estudio.....	59
Figura 35 y 36 Secciones del Área de Estudio.....	60
Figura 37 Corte Sísmico de Nicaragua.....	62
Figura 38 Mapa de Epicentro de Managua.....	63
Figura 39 Histograma de Mecanismos Focales.....	65
Figura 40 Mecanismos Focales y su relación con el tipo de falla.....	66
Figura 41 Mecanismos Focales de Managua.....	68
Figura 42 Mapa Estructural del Área de Estudio.....	69
Figura 43 Método de los Diedros Rectos.....	70
Figura 44 Segmentos de Frentes Volcánicos con Zonas de Relevos.....	72
Figura 45 Interpretación de la Cadena Volcánica de Nicaragua.....	73

T A B L A S

Tabla 1 Datos de Segmentos de la Falla Nejapa.....	52
Tabla 2 Datos de las Estructuras Volcánicas Monogenéticas.....	53
Tabla 3 Datos que muestran la extensión de la Falla Nejapa.....	71

Resumen

La Falla Nejapa se localiza en el Departamento de Managua- Nicaragua, en América Central, una región tectónica y volcánicamente activa.

En la región occidental de Nicaragua se ubica la Cadena Volcánica Nicaragüense, separada en segmentos: Los Maribios al norte (desde el volcán San Cristóbal hasta el Momotombo) y Pacífico al sur (desde el volcán Masaya hasta el Madera). Entre estos segmentos se forma una zona de relevo dentro de la que se encuentra la Cadena Volcánica Nicaragüense y la Fosa de Managua. Esta fosa tiene una longitud de 36 km y un ancho que varía de 15 km en el sur y 26 km en el norte. Una de las fallas que conforman la Fosa de Managua es la Falla Nejapa. Evidencias de campo indican que se trata de una zona de falla compleja, de movimiento normal con un pequeño componente lateral derecho y de alto ángulo de inclinación. Esta falla tiene una dirección preferencial N-S con una longitud aproximadamente de 24 km y un ancho de 2 km en su extremo sur y 5 km en su extremo norte, la diferencia de ancho de la falla indica un ángulo de apertura de 20° . Dentro de la zona de falla se encuentra la semifosa denominada Cuesta de El Plomo con una longitud de 2 km y ancho de 0.8 km formada por la falla principal Nejapa y fallas antitéticas que buzcan hacia el SO. Sobre esta falla se emplazan 25 estructuras volcánicas cuaternarias. Entre los que existen conos de escorias, anillos de toba, domos dacíticos, maares y un volcán compuesto, siendo su distribución desde el Campo Volcánico Apoyéque al norte, hasta el Campo Volcánico Ticomo al sur. El análisis de mesofallas, mecanismos focales, alineación de aparatos volcánicos y diques, indican que el área está sujeta a una dirección de extensión E-W, la cual es coincidente con la dirección de convergencia de la Placa de Cocos debajo de la Placa Caribe.

Abstract

The Nejapa Fault is located in the Department of Managua-Nicaragua, in Central America, which is tectonically and volcanic active zone.

Nicaragua Volcanic Chain was emplacement on western portion of Nicaragua, and is divided in two segments: Maribios to the north (from the San Cristobal volcano to the Momotombo volcano) and the south the Pacific (from Masaya volcano to Madera Volcano). Between both segments is locate a relay zone. In this relay zone is hosted the Managua graben, which has 36 length and 15 km of width to the south portion to 26 km to south. One of the fault bound the Managua graben is the Nejapa fault. Field work indicate this fault is a normal with a small component dextral and high angle of dip. The strike is nearly N-S with a length of 24 km and a width indicate an angle of 20°. Within the fault zone is located a semi-graben structure called Cuesta del Plomo. It has 2 km length and 0.8 width which is form by the Nejapa fault and antithetic faults dipping toward the SW.

On the Nejapa fault are emplacement nearly of 25 volcanic structures Quaternary in age. The volcanic structure are distributed from Apoyéque Volcanic Field to the north to Ticomo Volcanic Filed to south and consist of: scoria cones, tuff rings, dacitic domes, mars and composite volcano.

Analysis of mesofaults, mechanism focals, alienation of volcanic structures and dikes indicated that the area is affected by a stress field with a minimum principal stress oriented E-W, which corresponds with the convergence vector of Cocos plate underneath the Caribbean plate.

Capítulo 1

1. Introducción

La zona de estudio se localiza en el Departamento de Managua, en el extremo oeste de la Depresión de Nicaragua. Estructuralmente el área de estudio forma parte de la Cadena Volcánica Nicaragüense y se define como una fosa tectónica de 30 a 45 km de anchura, que se extiende desde el sureste de la frontera con Costa Rica, hasta el Golfo de Fonseca al noroeste. El área de estudio abarca las hojas topográficas de Mateare, Managua y el Crucero, dentro de las coordenadas 1359352N - 1326502 N y 556856 E- 581476 E editadas por el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER, 1988) (**Fig.1**).

Diferentes autores han realizado trabajos sobre geología, petrografía, vulcanología y fallas en el área de Managua, entre los clásicos destacan: Burri y Sonder (1936) McBirney y Williams (1964, 1965), Kuang (1971), Parsons Corporation (1972), Woodward-Clyde Consultants (1975), Dames y Morre, (1978). Uno de los trabajo más completos es el de Bice (1985), en el que propone la estratigrafía y zonas de fallas de la ciudad de Managua. Sin embargo, estas investigaciones no han proporcionado información cronológica, cinemática y evolución del sistema de fallas de Managua. Una de estas fallas es la Falla Nejapa de la cual le han hecho interpretaciones incompletas, denominándola Lineamiento Nejapa-Miraflores.

1.1. Objetivo general

El presente trabajo tiene como objetivo general estudiar detalladamente el Lineamiento Nejapa, localizado en la porción oeste de la Fosa de Managua definiendo su cinemática y geometría.

1.2. Objetivo específico

- Realizar el mapa geológico – estructural del área de estudio.
- Proponer un modelo estructural para la zona de estudio.

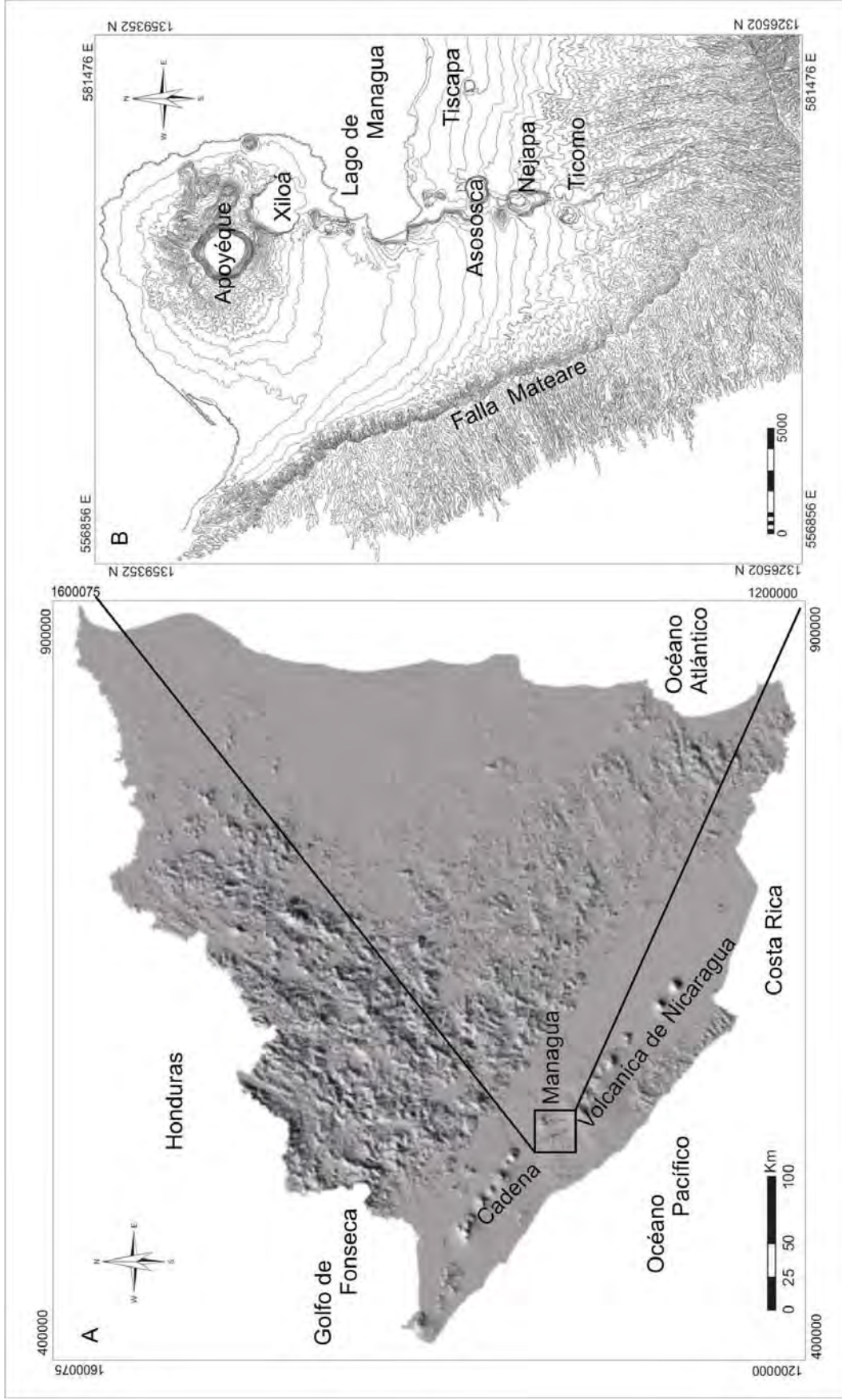


Figura 1. A) Mapa de modelo sombreado de Nicaragua, que muestra el área de estudio. B) Mapa topográfico del área de estudio.

1.3. Metodología

La metodología de trabajo consistió en tres etapas principales descritas a continuación:

1.3.1. Trabajo de Gabinete

Compilación de la información existente del área de estudio, como: informes, tesis, artículos y mapas, así mismo imágenes de satélite, fotografías aéreas escala 1:40,000 y tres cartas topográficas escala 1:50,000 publicadas por el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER, 1988).

Utilizando el paquete Ilwis (versión 3.2) se digitalizaron las curvas de nivel del mapa topográfico a escala 1:50,000. Una vez realizada la digitalización se obtuvieron los mapas de relieve, pendientes, altimétrico y modelo sombreado que sirvieron para la interpretación estructural del área de estudio. Mediante la fotointerpretación a detalle, se identificaron los diferentes rasgos geológicos, estructurales, geomorfológicos, vegetación, drenaje y erosión. Para esto se tomaron en cuenta las 12 reglas de la fotointerpretación, como son:

1. Tono fotográfico.
2. Relieve terrestre.
3. Textura de la fotografía.
4. Posición o gradiente.
5. Forma y tamaño de los rasgos u objetos.
6. Discordancias.
7. Sombra.
8. Alineaciones.
9. Objetos asociados.
10. Erosión
11. Formas topográficas.
12. Drenaje.

1.3.2. Trabajo de Campo

Para el trabajo de campo se utilizó el mapa fotogeológico de la zona de estudio, el cual sirvió para corroborar las diferentes unidades litológicas así como fallas y fracturas.

El trabajo se realizó principalmente a lo largo de la Falla Nejapa, desde el volcán Ticomo hasta Campo Volcánico Apoyéque (**Fig. 2**). Durante el trabajo de campo se describieron los tipos de estructuras volcánicas, su composición y los depósitos asociados a éstas.

Para el levantamiento estructural se tomó en cuenta rumbo, echado, longitud y anchura de la falla así como los tipos de depósitos que son afectados. Para conocer su cinemática se utilizaron diferentes indicadores como: estructuras sigmoides, estructuras conjugadas, estructuras en dominó y desplazamientos de estratos guía.

1.3.3. Integración de resultados.

Por último, una vez finalizadas las etapas anteriores, se procedió a la integración de resultados, con ayuda de los paquetes Arc Map (versión 9.1), Ilwis (versión 3.2), Corel (versión 12) y Surfer (versión 8.0). Se elaboraron modelos tridimensionales, secciones, mapas geológicos y estructurales. Con el paquete Spheristat (versión 2.0), se hicieron análisis estadísticos de los datos estructurales utilizando proyecciones equiareales y diagramas de rosas.

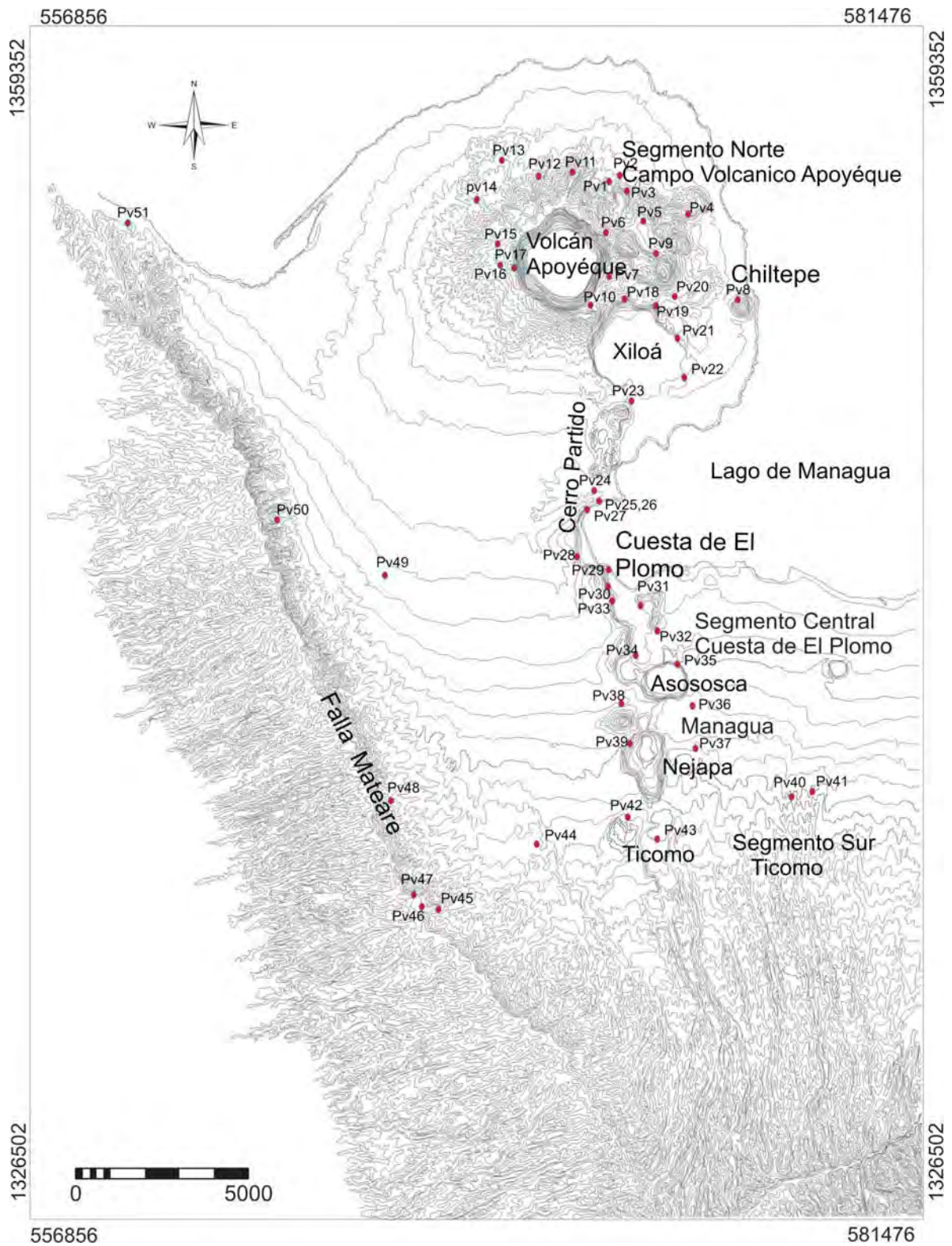


Figura 2. Mapa de verificación de puntos estructurales y geológicos del área de estudio concentrados a lo largo de la Faja Nejapa.

Capítulo 2

Tectónica de América Central

América Central se localiza en la Placa Caribe entre las Placas de Norteamérica y Sudamérica, las cuales involucran el movimiento de las Placas de Cocos y Nazca (Case et al., 1984) (**Fig. 3**). Nicaragua está alineada a lo largo del borde oeste de la Placa Caribe, sus límites actuales están definidos por la distribución de la actividad sísmica (Molnar y Sykes, 1969). El límite de la Placa Caribe se desarrolló debido a la posición relativa de Norte y Sudamérica después del rompimiento de Pangea en el Triásico- Jurásico tardío. En la mayoría de las reconstrucciones de Pangea, el área ocupada actualmente por la Placa Caribe fue ocupada por Norte y Sudamérica (Bullard et al., 1965; Pindell, 1985).

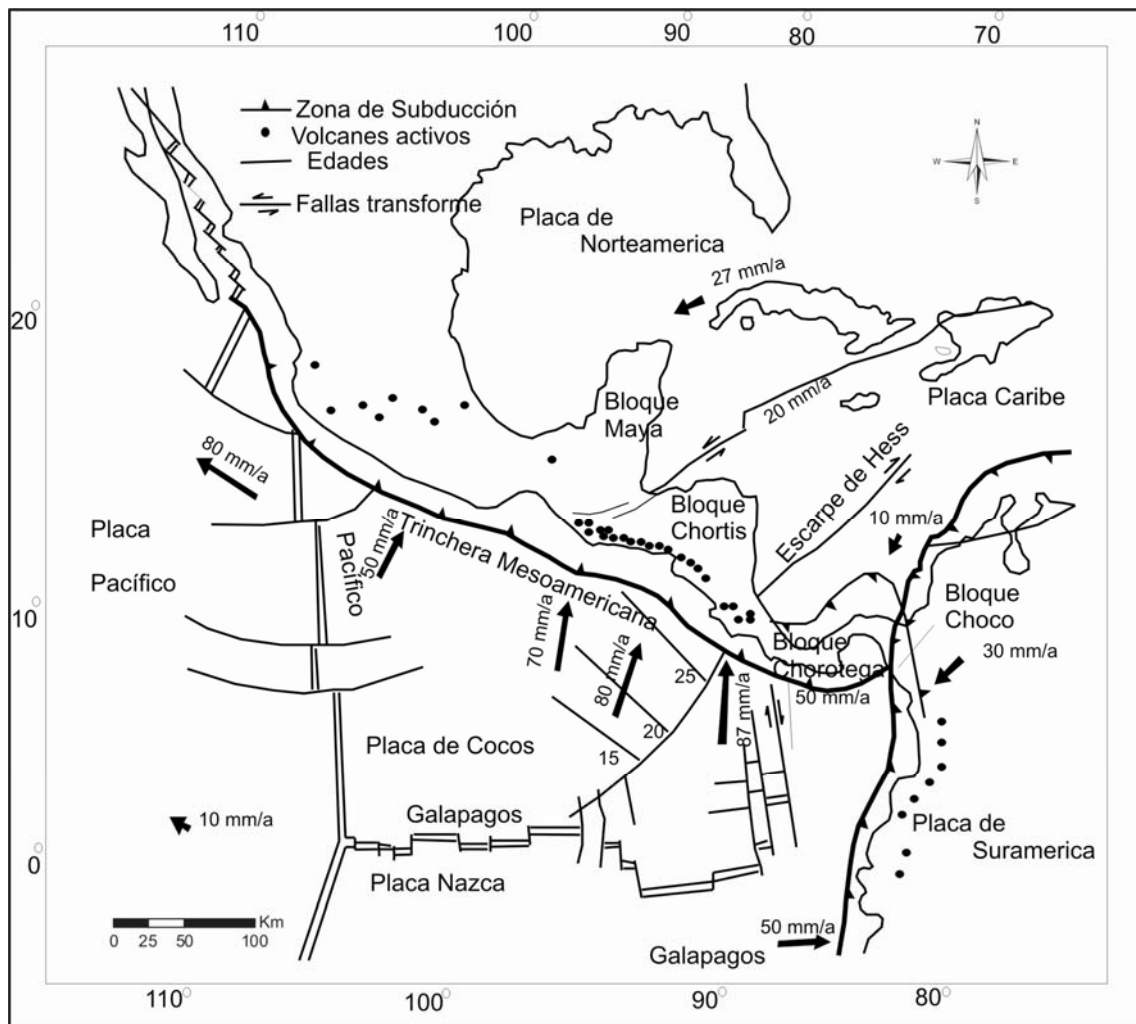


Figura.3. Mapa Tectónico de América Central y de placas relacionadas. Las flechas indican la dirección de subducción de la Placa Cocos bajo la Placa Caribe así como su velocidad (Frischutter, 2002).

Duncan y Hargraves (1984) presentaron un modelo para la evolución del Caribe, en donde el núcleo de la placa fue formado a partir de la efusión de lava sobre la Placa Farallón mientras ésta se movía hacia el este por encima del **hot spot** de las Islas Galápagos. Hace aproximadamente 80 Ma, cuando el espacio entre Norte y Sudamérica era suficientemente grande, la Placa Caribe se incorporó dentro del espacio que se estaba abriendo.

En América Central, el límite oeste de la Placa Caribe está definido por la Fosa Mesoamericana donde ocurre la subducción entre las Placas de Cocos y Caribe, la cual tiene una profundidad de 4 a 5 km (Case et al, 1984) y aproximadamente se extiende a 130 km de la costa del Pacífico de América Central, desde México hasta Costa Rica Peraldo y Montero (1999).

La dirección de subducción de la Placa de Cocos por debajo del margen pacífico de la Placa Caribe, es ligeramente oblicua respecto al límite de placa que subduce con una inclinación de 25° en la parte superficial y 84° a profundidades de 100 y 220 km (Burbach , 1984 y Protti , 1993).

Las velocidades estimadas de subducción varían de 70 a 80 mm/año (Frischutter, 2002). Como consecuencia de esta subducción se origina la depresión de Nicaragua, definida por una zona alargada y paralela a la Fosa Mesoamericana. Según algunos autores (McBirney y Williams,1965; Dengo, 1969) esta depresión empezó a formarse a finales del Cenozoico, producto de los esfuerzos de tensión local que actúan en la cresta de un geoanticlinal, como consecuencia de la compresión regional que existe sobre la Fosa Mesoamericana. A finales del Plioceno, en el extremo noroeste de la depresión, inicia el vulcanismo que dio origen a la Cadena Volcánica de América Central, cuya porción Nicaragüense se extiende desde volcán Cosíguña en el norte, hasta el volcán Maderas en el sur (**Fig. 4**).

El material fundido de la Placa de Cocos asciende casi verticalmente penetrando la Placa Caribe, formando así la Cadena Volcánica Nicaragüense, a lo largo de una línea casi recta y paralela con una distancia promedio de 200 km de la Fosa Mesoamericana (Molnar, P. & Sykes, L. R., 1969).

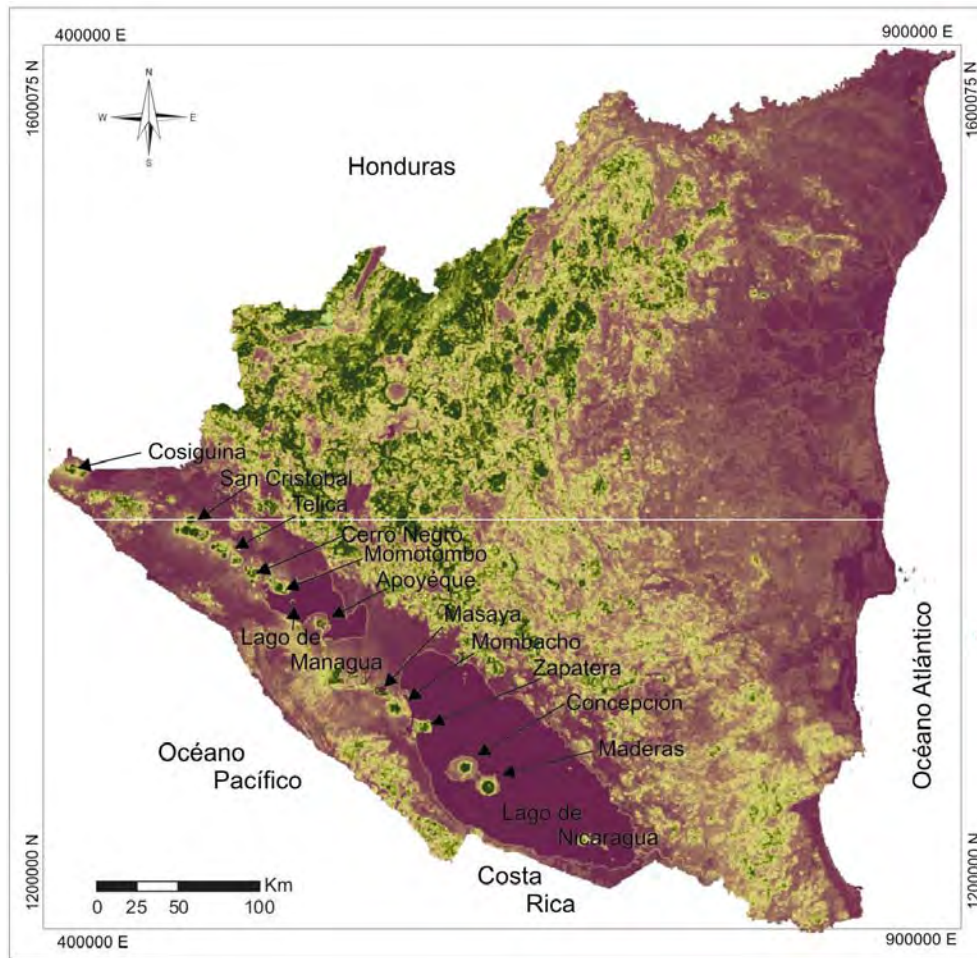


Figura 4. Cadena Volcánica de Nicaragua que se forma producto de la subducción de la Placa Cocos bajo la Placa Caribe a lo largo de la depresión Nicaragiense.

América Central puede ser dividida en cuatro grandes bloques estructurales, denominados: Maya, Chortis, Chorotega y Choco (Dengo, 1969;1973; Escálate 1990). los cuales se caracterizan por su diferente naturaleza tanto oceánica como continental y están ubicados de la siguiente manera:

El bloque Chortis está definido desde la parte sur de Guatemala, Honduras, la parte norte y occidental de Nicaragua. Este bloque tiene una corteza de tipo continental y está separado del bloque Maya por el sistema de fallas Motagua-Polochic. Por el Sur está separado del bloque Chorotega por el accidente de Hess (Di Marco, 1995). En la parte norte el bloque Maya y Chortis, presentan una naturaleza continental, los cuales se considera que estaban ligados a la parte occidental de la Placa de Norteamérica y que se movieron gradualmente hasta ocupar la posición actual como parte de la Placa Caribe.

El bloque Chorotega es de origen oceánico, abarca la mayor parte de istmo Centroamericano, incluyendo la parte sudoriental de Nicaragua, que durante el Cretácico-Paleoceno tardío formaba el borde occidental de la Placa Caribe por lo que se supone que es el resultado de la actividad volcánica relacionada a la subducción de la Placa de Cocos por debajo de la Placa Caribe. Las estructuras que limitan este bloque son poco conocidas. El lineamiento escarpado de Hess limita este bloque por el noreste, mientras que el sistema de fallas de Panamá lo separan del bloque Choco por el este **(Fig. 3)**.

Capítulo 3

Marco Geológico Regional

Nicaragua está dividida en cinco provincias geológicas y fisiográficamente importantes que son: Planicie Costera del Pacífico, Depresión de Nicaragua, Meseta Central, Tierras Altas del Norte y la Planicie Costera del Atlántico (McBirney y Williams, 1965; Hodgson, 1978) (**Fig. 5**). Estas provincias se describen a continuación:

- Planicie Costera del Pacífico: Constituye una estrecha franja de terrenos paralelos a las costas del pacífico, con un ancho inferior a los 30 km. Desde el punto de vista geológico estos terrenos están formados por sucesiones de sedimentos marinos poco profundos como: detritos y rocas volcanoclásticas con intercalaciones de lava, con rango de edad del Cretácico tardío al Mioceno (Parsons Corporation, 1972). Estas rocas se organizan básicamente en cinco formaciones geológicas como: Formación Rivas (Cretáceo superior), Formación Brito (Eoceno), Formación Masachapa (Oligoceno), Formaciones El Fraile y Tamarindo (Mioceno) y Formación El Salto (Plioceno).

- Meseta Central: Caracterizada por la presencia de rocas volcánicas del Terciario y Cretácico, compuestas por extensos depósitos piroclásticos y lavas de composición basáltica, andesítica y dacítica.

- Tierras Altas del Norte: Comprende las rocas más antiguas del norte y centro de Nicaragua. Está caracterizada por unidades de rocas de edad Paleozoica a Mesozoica, las que han experimentado deformaciones acompañadas con metamorfismo regional y constituyen el basamento metamórfico y de rocas plutónicas de Nueva Segovia.

- Planicie Costera del Atlántico: Localizada a lo largo de la línea costera y llanos de la Costa Atlántica. Está compuesta de rocas sedimentarias del Pleistoceno y aluviales recientes, las cuales sobreyacen a rocas sedimentarias del Terciario.

- Depresión Nicaragüense: Compreendida dentro de la fosa tectónica Nicaragüense, con 70 km de ancho y 300 km de longitud, con dirección NO-SE. Atraviesa el territorio Nicaragüense en el sector occidental, paralelo a la Costa del Pacífico y a la Fosa Mesoamericana. Esta provincia engloba sucesiones de rocas y materiales lacustres (Woodward-Clyde Consultants, 1975), que se subdividen en dos grandes grupos: El Grupo Las Sierras del Pleistoceno constituido por ignimbritas y el Grupo Managua del Cuaternario, compuesto por depósitos piroclásticos poco

consolidados. La depresión de Nicaragua esta ocupada por depósitos piroclásticos y lacustre recientes con espesores de 2000 m (Weinberg, 1992).

Diferentes autores han realizado trabajos sobre geología, petrografía, vulcanología y estratigrafía en la depresión de Nicaragua, especialmente en el área de Managua, entre los que destacan: Sapper (1925), Burri y Sonder (1936), Williams (1952a), McBirney (1955a), McBirney y Williams (1964, 1965), Kuang (1971), Parsons Corporation (1972), Woodward-Clyde Consultans (1975), Dames y Moore, 1978) y Bice (1985). A continuación se presenta una breve descripción de la columna estratigrafía de Managua propuesta por estos autores, y en especifico uno de los trabajos mas reciente publicado por (Kutterolf et al, 2007) que atribuyen los depósitos de Managua a los volcanes Masaya, Apoyo al sureste y Apoyéque al noroeste. Este autor propone que la estratigrafía de Managua esta compuesta por tres formaciones principales: Formación La Sierra, Formación Managua y la Formación Chiltepe. Ver columna estratigráfica compuesta de Managua en la figura 14.

3.1 Formación La Sierra:

Constituye el basamento del Grupo Managua y está compuesto por rocas piroclásticas relativamente consolidadas de gran espesor y extensión. Es típicamente de color gris oscuro, y a menudo presenta fracturas rellenas de carbonato de calcio. Su edad fue estimada entre 100, 000 y 1, 000, 000 años, basada en datos de potasio-argón (Bice, 1980c).

Recientemente esta formación fue dividida por (Kutterolf et al, 2007) en dos unidades principales separadas por un paleosuelo y son:

3.1.1 Tefra Unicif: Consiste de un depósito de pómez de caída masivo de 20 a 65 cm de espesor. Se caracteriza por presentar una gradación inversa en su base y normal en su cima. Esta pómez esta cubierta por sedimentos localmente variable como, lahares y depósitos epiclásticos con abundante contenido de lapilli acrecional.

3.1.2 Tefra Fontana: Primeramente descrita por Bice (1985) como Fontana la pilli. Es una de las secuencia más extensa y fácilmente reconocible del Grupo Managua,

con espesores promedio de 3 m y que fueron productos de erupciones plinianas de la Caldera Masaya. Es un depósito de caída compuesto por escoria de color negro con fragmentos bien clasificados y se le ha asignado una edad de 25,000 a 35,000 años (Bice, 1985).

3.2 Formación Managua:

La Formación Managua comprende siete unidades piroclásticas de composición basáltica y riolítica separadas por paleosuelos. Estas unidades fueron formadas por grandes erupciones explosivas de la Laguna de Apoyo y la Caldera de Masaya, ubicadas al sureste y sur de Managua.

3.2.1 Pómez de Apoyo: Primeramente descrita por Bice (1985) como tres unidades de depósito de caída de pómez separada por paleosuelo. Estas unidades las describe como Pómez de Apoyo Inferior con una edad de 20, 920 años, Pómez de Apoyo Medio con una edad de 16, 000 a 20, 000 años y Pómez de Apoyo Superior la cual no presenta datación. Según Bice estos depósitos de caída de pómez son de composición dacítico y difieren de otra pómez por el color rosa que presentan. El tamaño de las partículas en las capas superiores generalmente varía desde 1 cm en la base hasta 5 cm en el techo. Debido a la similitud en las texturas y gradación, las capas pueden solamente ser diferenciadas por su posición estratigráfica, cuando ambas se encuentran presentes.

Estudios recientes (Kutterolf et al, 2007) dividen la Pómez de Apoyo en dos unidades de depósito de caída separadas por un paleosuelo, y las definen como: Pómez de Apoyo Inferior y Superior. Estas unidades se caracterizan por tener cierta gradación inversa y están cubiertas por una secuencia de líticos, ceniza y pequeñas oleadas. De acuerdo a prueba de ^{14}C a la unidad de Apoyo Superior se le estimó una edad de 23,890+-240 años y Apoyo Inferior una edad de 24,650 +- 120 años.

3.2.2 San Antonio Tefra: Es un depósito de caída de escoria de color negro y que esta separado por sedimentos tobaceos y un paleosuelo de color amarillo. Los afloramientos proximales demuestran una alternancia de fragmentos grueso de escoria en su base y finos en su cima. Este depósito esta cubierto por oleadas que fueron encontrado al noroeste, norte y sur de la Caldera Masaya, donde la reconstrucción de su

espesor es limitado por los pocos afloramientos y la erosión que los afectó. A este depósito le fue estimada una edad de 6,100 años (Pérez y Freundt, 2006).

3.2.3 La Concepción Tefra: La Concepción Tefra se expone al sur de la Caldera Masaya. Se trata de un depósito de caída de escoria muy vesiculada de color negro con 2 m de espesor. Este depósito está separado por pequeñas capas de ceniza con un mayor contenido de pequeños líticos de composición básica hacia su cima.

3.2.4 Masaya Triple Layer: La Masaya Triple Layer se encuentra al noroeste de la Caldera Masaya y se define como una unidad poco potente pero distintiva. Esta compuesta por pequeñas capas de escoria muy vesiculadas con intercalaciones de ceniza compacta. Para este depósito fue estimada una edad de 2,120±120 (Pérez y Freundt, 2006) diferente a la edad estimada por (Bice, 1980c) de 7,000 a 9,000 años.

3.2.5 Masaya Tuff: Es un depósito de oleadas que se extiende a más de 35 km de la Caldera Masaya (Pérez y Freundt, 2006). Este depósito tiene un espesor de 50 a 100 cm y está compuesto por lapilli de color oscuro separadas por pequeñas capas de ceniza. A esta secuencia se le fecha con una edad de 2,000 años, mucho más joven a la edad estimada por Bice (1980 a.b) con una edad de 3,000 y 6,000 años.

3.2.6 Ticuante Lapilli: Se trata de un depósito de caída de escoria de color negro que cubre a la Masaya Tuff al oeste de la Caldera Masaya (Pérez y Freundt, 2006). Este depósito consiste de cuatro pequeñas capas de lapilli soportado grano a grano y separado por capas de ceniza muy ricas en líticos.

3.3 Formación Chiltepe:

Se define como una secuencia de depósitos volcanoclasticos que son divididos en seis unidades principales (Kutterolf et al, 2007).

3.3.1 Tefra de Apoyéque Inferior: Se localiza al oeste y noroeste de Chiltepe. Se trata de un depósito de pómez de caída de color blanco de composición dacítica. Este depósito está separado por una delgada capa de sedimentos tobaceos lo que fue erosionado y emplazado por la Pómez de Apoyéque Superior.

3.3.2 Tefra de Apoyéque Superior: Se trata de un depósito de pómez de caída de color blanca con gradación inversa. Presenta cierta variación en su espesor de 400 cm cerca de Chiltepe a menos de 50 cm hacia el sur. De acuerdo a prueba de ^{14}C se estimo una edad de 12,400+-100 años (Kutterolf et al, 2007) mucho mas antiguo que la edades publicadas por Bice (Bice, 1980c) de 6,590 años.

3.3.3 Tefra de Xiloá: Se trata de un depósito de pómez de caída con intercalaciones de oleadas muy erosionados. Este depósito se expone hacia este del la laguna de Xiloá. De acuerdo a prueba de ^{14}C se estimo una edad de 6,105+-30 años (Kutterolf et al, 2007).

3.3.4 Tefra Mateare: Es una unidad recién identificada que esta expuesta a lo largo del Lago de Managua. Esta compuesta por intercalaciones de pequeñas capas de lapilli y pómez los cuales varían en su composición. Este depósito presenta intercalaciones de ceniza y inclusiones de líticos de composición andesítica (Kutterolf et al , 2007).

3.3.5 Tefra Los Cedros: Es una unidad recién identificada y se trata de un depósito de pómez de caída de composición dacítica de 15 cm de espesor. Este depósito tiene intercalaciones de pequeñas capas de lapilli y se extiende hacia el oeste de Managua (Kutterolf et al , 2007).

3.3.6 Tefra chiltepe: Se trata de un depósito de pómez de caída de composición dacítico el cual fue producido por erupciones plinianas del volcán Apoyéque (Kutterolf et al , 2007). Este depósito es separado por pequeñas capas de ceniza y depósitos de surges que tiene inclusiones de líticos de composición basáltico.

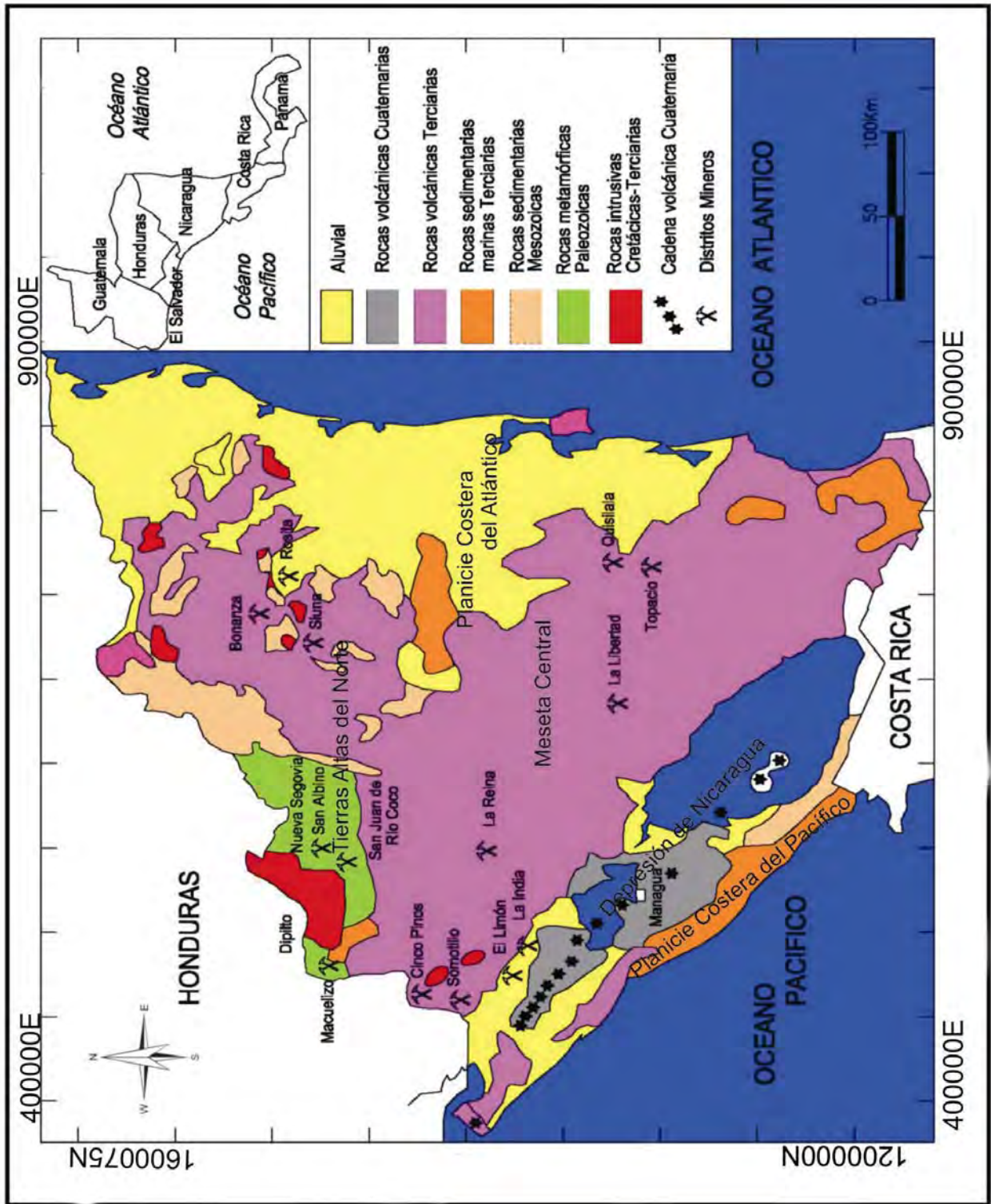


Figura 5. Mapa geológico de Nicaragua que muestra las diferentes unidades geológicas (Rodríguez, 1989).

Capítulo 4

Geología local

4.1 Estratigrafía del área de estudio

Las rocas que afloran en el área de estudio son de origen volcánico, con edades comprendidas del Terciario tardío hasta el Cuaternario. El basamento está formado por ignimbritas de la Formación La Sierra del Terciario tardío, el cual está cubierto por rocas volcánicas del Grupo Managua del Cuaternario.

Con base en la interpretación de fotografías aéreas, imágenes de satélite, modelos sombreados, mapas topográficos, así como levantamiento de campo, se realizó el mapa geológico del área de estudio, con descripción de las diferentes estructuras litológicas y sus depósitos (ver mapa geológico figura 13). Las estructuras volcánicas se dividieron en tres zonas debido a que presentan diferencias, en dimensión, morfología y forma de emplazamiento, estos son denominados:

- 1- Campo Volcánico Apoyéque-Xiloá.
- 2- Campo Volcánico Cuesta de El Plomo.
- 3- Campo Volcánico Ticomo.

4.1.1. Campo Volcánico Apoyéque-Xiloá

En este trabajo se propone al Campo Volcánico Apoyéque-Xiloá, localizado en la parte norte del área de estudio, en donde tiene una longitud de 8 km y un ancho de 5 km. Está conformado por una estructura mayor denominada Apoyéque y diez estructuras volcánicas monogenéticas, dentro de las que figuran: seis conos de escorias, denominados Conos de Escoria Chiltepe-Xiloá, el Maar Xiloá y tres domos dacíticos, denominados Domos Apoyéque.

4.1.1.1 Volcán Apoyéque.

Es un volcán compuesto, localizado en la parte norte del segmento, el cual tiene una orientación N15°O. Se caracteriza por pendientes externas inclinadas y paredes de lava de 200 m de altura con diámetro mayor de 1.5 y menor de 1 km (**Fig. 6**). Macroscópicamente la roca que conforma su estructura está compuesta de lavas masivas andesíticas, de color gris-oscuro, de textura porfídica. Se reconocen cristales de plagioclasa y horblenda distribuidos en una matriz afanítica. Sobre esta estructura

descansan concordantemente oleadas piroclásticas y depósitos de pómez denominados como Pómez de Apoyéque Inferior y Pómez de Apoyéque Superior de 12,400 años. La Pómez de Apoyéque Superior es una de las unidades con mayor distinción en los alrededores del volcán y es un marcador estratigráfico en el área de estudio y el resto de la ciudad de Managua, con una dispersión principal hacia el noroeste y suroeste. Se trata de un depósito de pómez de caída del tamaño de la grava gruesa y media soportado clasto a clasto con gradación inversa.

En las faldas del volcán Apoyéque afloran depósitos de talud emplazados principalmente hacia el sureste y suroeste del volcán, así como flujos de lavas y lahares distribuidas en forma radial alrededor del volcán. Estos consisten de varias unidades como: flujos de lavas y flujos de detritos.



Figura 6. Vista hacia el norte de la estructura mayor Volcán Apoyéque, con diámetro mayor de 1.5 km y diámetro menor de 1 km.

4.1.1.1.1. Flujos de lava Apoyéque

Unidad Ia

Son flujos de lava localizados en el costado noroeste de la estructura volcánica Apoyéque. Estos flujos se emplazaron hacia el oeste, abarcando una longitud de 3 km y un ancho de 1 km aproximadamente. Basado en el análisis macroscópico se trata de una andesita de color rosa con textura porfídica y estructuras tipo AA, dentro de las que se reconocen una superficie rugosa puntiaguda con textura vesiculada.

Unidad Ib

Este flujo de lava localizado en el extremo este de la estructura volcánica tiene una dirección de emplazamiento al sureste, abarca una longitud de 2.5 km y un ancho de 0.8 km aproximadamente. Se trata de un flujo de lava andesítico de color gris oscuro y textura porfídica, caracterizada por presentar superficies lisas y estructura en bloques. En muestra de mano se reconocen cristales de plagioclasa y en menor proporción horblenda y augita empotrados en una matriz afanítica.

Unidad Ic

Son flujos de lava localizados en el extremo sur del volcán con dirección de emplazamiento hacia el suroeste, que abarcan una longitud de 2 km y un ancho de 1 km. Son flujos andesíticos masivos de color oscuro y textura porfídica. Macroscópicamente, se reconocen fenocristales de plagioclasa y horblenda embebidos en una matriz afanítica

Unidad Id

Se trata de flujos de lava localizados en el extremo norte de la estructura, y que presentan dirección de emplazamiento hacia el noroeste y sureste, tienen una longitud de 3 km y ancho de 4 km. Son andesitas masivas de color gris oscuro y textura porfídica. Presentan cristales de plagioclasa y horblenda alterados y embebidos en una matriz afanítica.

4.1.1.1.2 Flujos de detritos Apoyéque

Unidad II a

En la porción noroeste de la estructura volcánica Apoyéque se observa un depósito de flujo de detritos, con longitud de 4 km y ancho de 2 km. Es masivo, heterolitológico, de 2 a 5 m de espesor, color café oscuro, constituido por clastos de andesita y fragmentos de pómez. Este depósito tiene bloques soportados en una matriz fina de arcilla y arena. La forma de los bloques van desde angulosos a subangulosos, poco intemperizados y tamaños variables, desde 1cm a 1m. En muestra de mano los bloques tienen coloración gris oscura, con cristales de plagioclasas, y en menor proporción horblenda y augita.

Estratigráficamente arriba del flujo de detritos se observa la Pómez de Apoyéque Superior con un espesor de 2 m y soporte grano a grano con gradación inversa.

Unidad II b

En la porción oeste del volcán Apoyéque aflora otro depósito de flujo de detritos con longitud de 4 km y ancho de 3 km. Se trata de un depósito poco consolidado, de color gris oscuro, compuesto por grandes fragmentos de rocas de composición andesítica. La forma de los bloques van desde subredondeados y redondeado con tamaños variables de 1 cm a 2 m soportados en una matriz de arcilla y arena. Sobre este flujo descansa concordantemente la Pómez Apoyéque Superior.

4.1.1.2 Maar Xiloá

En el extremo norte del área de estudio se localiza el Maar Xiloá orientado N15°O y está cortando al volcán Apoyéque. Se caracteriza por tener pendientes externas suaves y paredes de lava de 100 m en las partes mas altas. El diámetro mayor de la estructura es de 2.5 km y el menor de 2.3 km (**Fig.7**). Macroscópicamente la roca que conforma su estructura está compuesta por lavas masivas de composición andesíticas, de color oscuro en muestra sana, que se altera a gris clara, con textura porfídica. Se reconocen cristales de plagioclasa y horblenda alterados, distribuidos en una matriz afanítica. Hacia la cima de esta estructura descansan oleadas piroclásticas y un depósito de pómez retrabajado de color blanco, con fenocristales de plagioclasa y cuarzo.

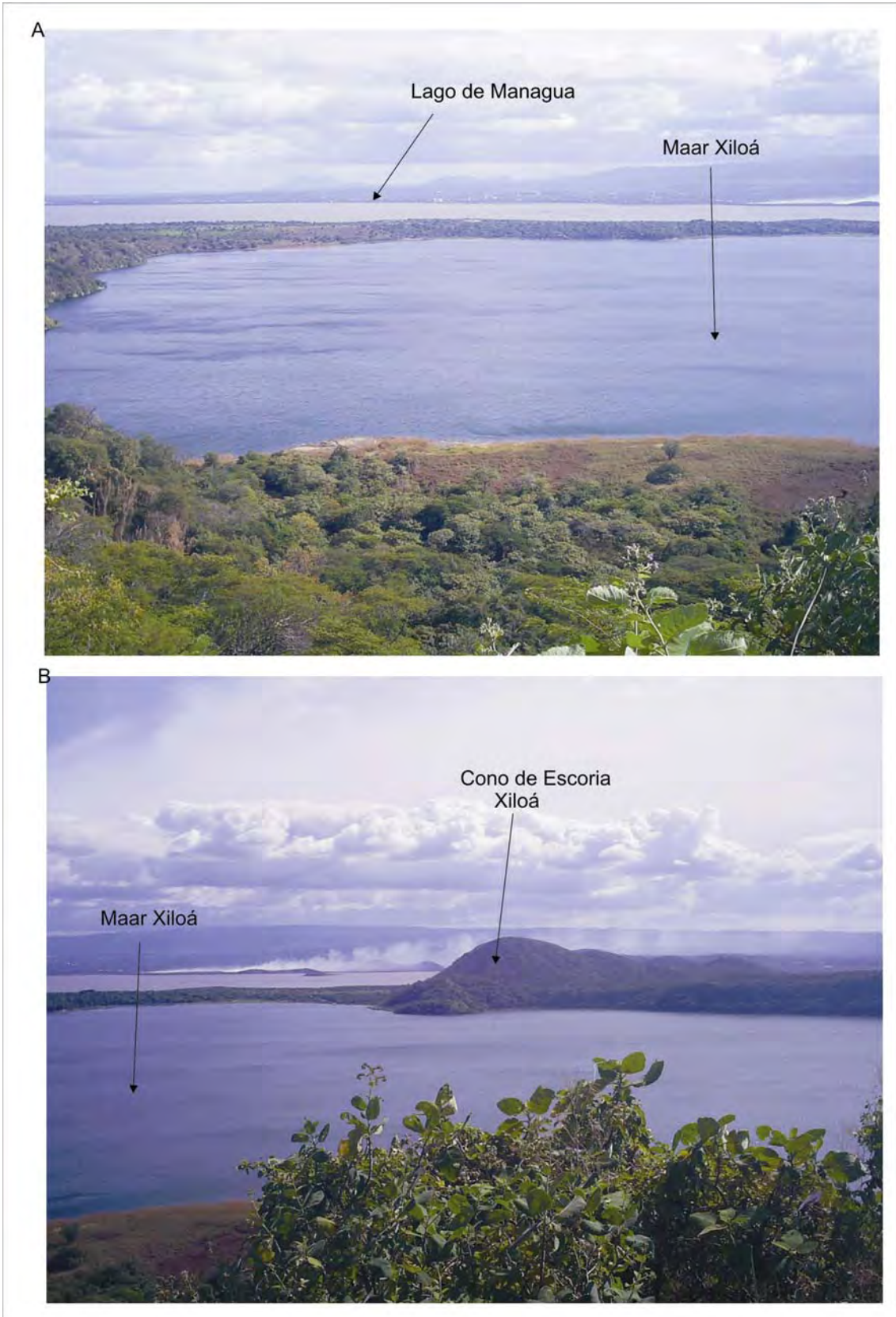


Figura 7. A) Porción noroeste del Maar Xiloá. B) Vista sureste de Xiloá se observan conos de escorias del Campo Volcánico Apoyéque-Xiloá.

4.1.1.3 Domos de Apoyéque

En este trabajo se propone como Domos Apoyéque, a tres estructuras dómicas ubicadas en la ladera este del volcán Apoyéque y están orientadas N10°O. El domo 1 y 2 presentan alturas de 518 m con diámetro mayor de 600 m y menor de 300 m. El domo 3 presenta una altura de 352 m con diámetro mayor de 500 m y menor de 200 m (**Fig. 8**). Los domos están compuesto por lavas dacíticas de color rosa claro, que altera a gris rojo, con textura porfídica. En muestra sana se reconocen fenocristales de plagioclasa poco alterados y minerales de cuarzo corroídos en sus bordes y empotrados en una matriz afanítica.

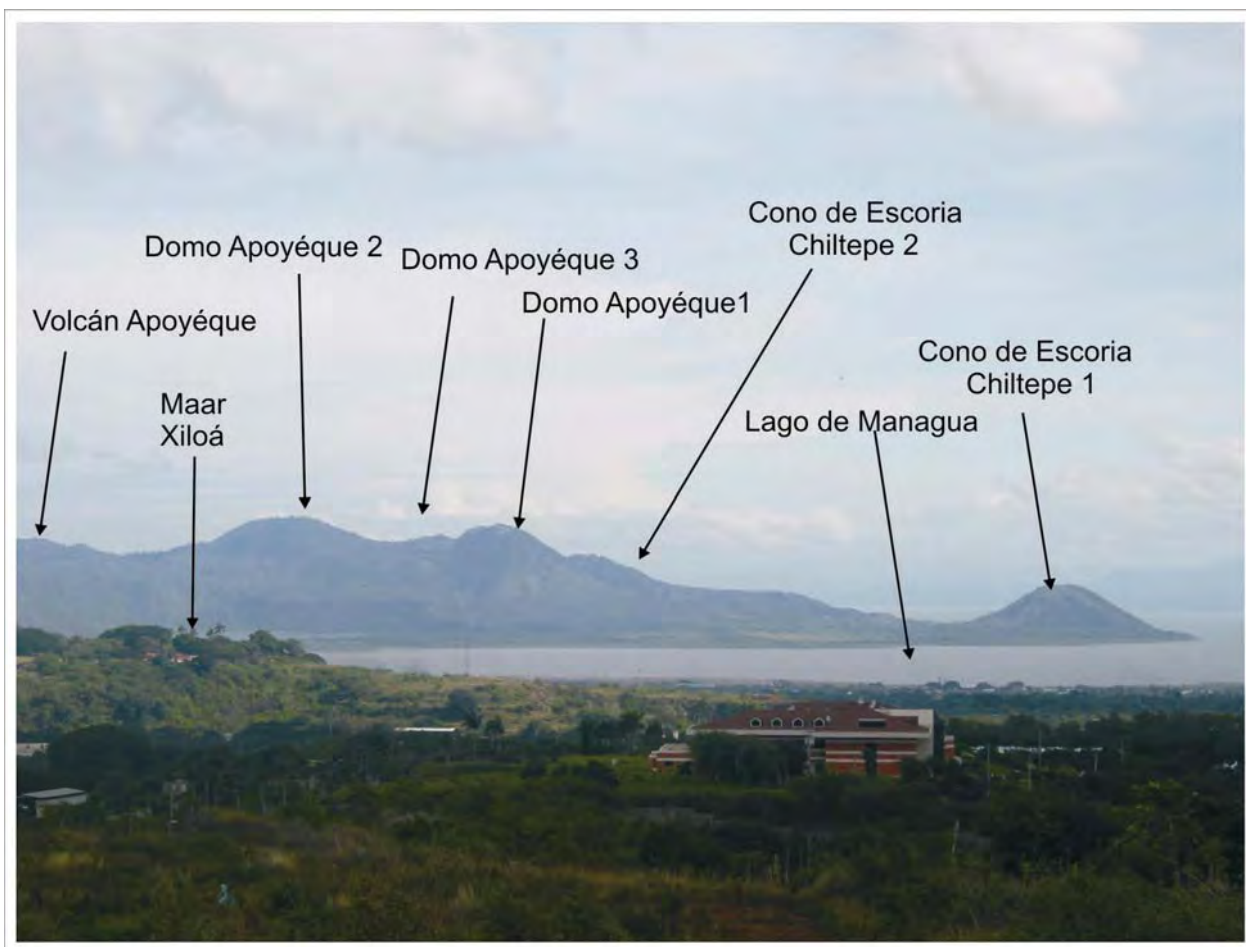


Figura 8. Domos Apoyéque ubicados en el Campo Volcánico Apoyéque- Xiloá. Vista hacia el norte se observa el Lago de Managua.

4.1.1.4 Conos de Escoria Apoyéque-Xiloá

Se trata de cinco conos de escorias localizados al sur y al norte del Campo Volcánico Apoyéque-Xiloá. Los conos de escorias ubicados al sur del Maar Xiloá, esta orientados N-S y presentan diámetro mayor de 900 m y menor de 600 m. Los conos de escorias ubicados al norte de Xiloá, se concentran al este del volcán Apoyéque y están orientados N10°O con diámetro mayor de 800 m y menor de 300 m. Estos son conos de escoria de forma ovalada, con alturas que varían desde 100 a 220 m y están compuestos por escoria de composición basáltica (**Fig. 9 y 10**). Litológicamente se tratan de lavas basálticas, de color rojo y textura porfídica. Se reconocen cristales de plagioclasa y olivinos dispersos en una matriz afanítica. En su cima se observa el depósito de Pómez de Apoyéque Superior muy erosionado.



Figura 9. A) Vista hacia el sur del Maar Xiloá se observan los conos de escoria. B) Detalle de los conos de escoria Xiloá.

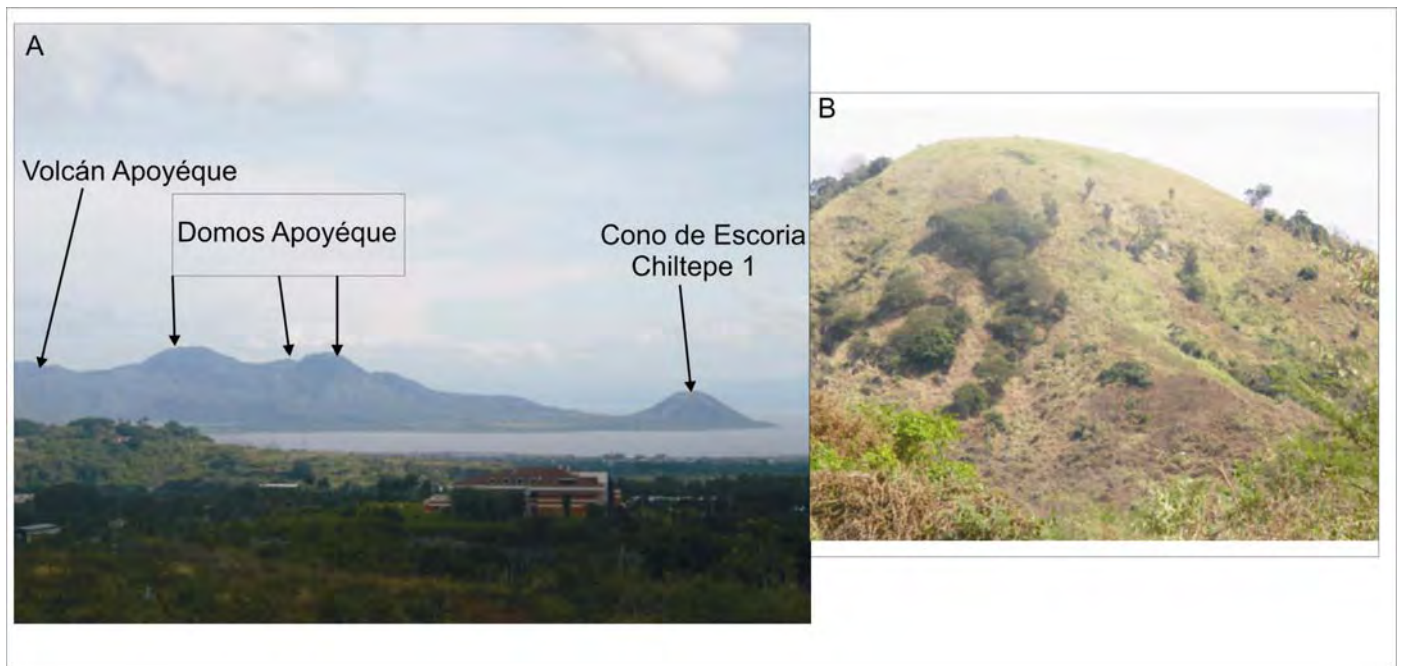


Figura 10. A) Cono de escoria ubicado al este del Volcán Apoyéque. B) Detalle del cono de escoria Chiltepe1.

4.1.2 Campo Volcánico Cuesta de El Plomo

Se propone con el nombre Campo Volcánico Cuesta El Plomo, a un conjunto de estructuras volcánicas localizadas en la porción central del área de estudio, que tiene una longitud de 7 km y un ancho de 3 km y que emplazan a las estructuras que conforman el Campo Volcánico Apoyéque-Xiloá. Está conformado por seis estructuras volcánicas monogenéticas, dentro de las que se encuentran: Anillo de Toba El Satélite, Refinería-Los Arcos, Cuesta El Plomo y Cerro Partido, todos cubiertos por la Pómez Apoyéque Superior de edad 12,400 años. Las otras dos estructuras se denominan Maar Asososca y Cono de Escoria La Embajada los cuales no están cubiertos por la Pómez Apoyéque Superior. Estas estructuras se describen a continuación.

4.1.2.1 Anillos de Toba Cuesta de El Plomo

El Anillo de Toba El Satélite tiene una dirección N5°O con altura de 100 m, con diámetro mayor de 0.4 km y menor de 0.2 km. El Anillo de Toba Refinería Los Arcos tiene una dirección N10°O con altura de 160 m, con diámetro mayor de 1 km y menor de 0.5 km. El Anillo de Toba Cuesta el Plomo tiene dirección N15°O con altura de 200 m, diámetro mayor de 2 km y menor de 800 m. El Anillo de Toba Cerro Partido tiene dirección N8°E con altura de 160 m, con diámetro mayor de 3.5 km y menor de 1 km.

De estos conos de escorias solo se exponen los extremos oeste ya que son estructuras rotas y colapsadas hacia el este. Para el Anillo de Toba Cerro Partido se infirió un diámetro hacia el este de 2.1 km hasta la Isla del Amor, la cual presenta una estratigrafía similar. Para el Anillo de Toba El Satélite se infirió un diámetro de 1 km hasta el Maar Asosca. Estos conos de escorias están compuestos por oleadas piroclásticas con intercalaciones de paleosuelos y la pómez de caída de Apoyéque Superior.

En las paredes de los anillos de toba se reconocieron las siguientes características estratigráficas, la parte basal está compuesta por intercalaciones de 25 horizontes de oleada piroclásticas compactas de 5 m de espesor. La parte basal de estos horizontes esta constituido por ceniza y lapilli cuyo tamaño varia desde 1 cm hasta 10 cm generalmente de color oscuro; la cima esta compuesto de ceniza y con un 30% de líticos. Posteriormente arriba de estos horizontes se sobrepone un paleosuelo de 50 cm de espesor de color marrón, el cual está cubierto por un paquete de oleadas piroclásticas con espesores que varían desde 3 a 8 m el cual esta afectado por impactos balísticos. Hacia la cima se localiza un paleosuelo de 60 cm de espesor de color marrón y un paquete de pómez de caída de Apoyéque Superior de 70 cm de espesor y de coloración gris blanca con cristales de plagioclasa y cuarzo. Descansando concordantemente se encuentra otro paquete de oleada piroclásticas de aproximadamente 12 m de espesor con estructuras en forma de dunas y antidunas, con estructuras de impactos de bloques de tamaño de 30 cm, de color gris oscuro y textura porfídica, donde se reconocieron cristales de plagioclasa y horblenda embebidos en una matriz afanítica (**Fig.11**).

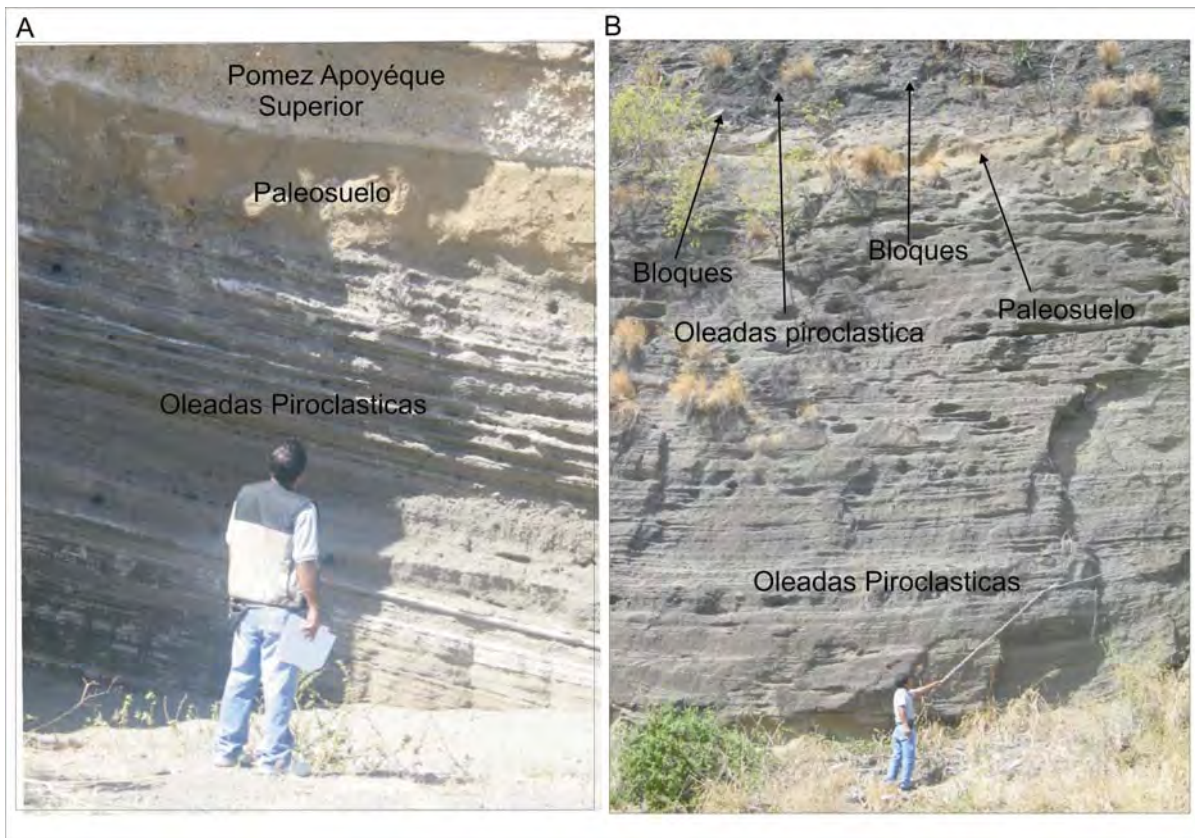


Figura 11. A) Intercalaciones de oleadas piroclásticas con la Pómez de caída Apoyéque Superior y un paleosuelo. B) hacia la base secuencia de oleadas piroclásticas cubierta por un paleosuelo de 50 cm de espesor. En su cima oleadas piroclásticas afectadas por impactos balísticos.

4.1.2.2 Maar Asososca

En el extremo sur del campo volcánico Cuesta El Plomo, se localiza el Maar Asososca. Está orientado E-O y se caracteriza por tener pendientes externas suaves y paredes de lava de 100 m de altura, con un diámetro mayor de 1 km y menor de 800 m donde su estructura es la de un anillo de toba. Asososca se considera como una de las estructura más jóvenes de este campo volcánico, ya que presenta una morfología completa y no presenta colapso como las estructuras antes descritas. En sus paredes se presentan diques con dirección N-S. Su estructura está compuesta de lava andesítica, de color gris-oscuro, de textura porfídica. Se reconocen cristales de plagioclasa y horblenda poco alterados empotrados en una matriz afanítica. Descansando concordantemente se encuentran secuencias de oleadas piroclásticas (**Fig. 12**).

En el extremo sur del Maar Asososca se localiza un cono de escoria de 200 m de altura con un diámetro mayor de 500 m y menor de 400 m, orientado N5°E. Esta

compuesto por flujos de lavas basáltica, de color rojo y textura porfídica. Esta afectado por estructuras sigmoides de hasta 3 m de altura.

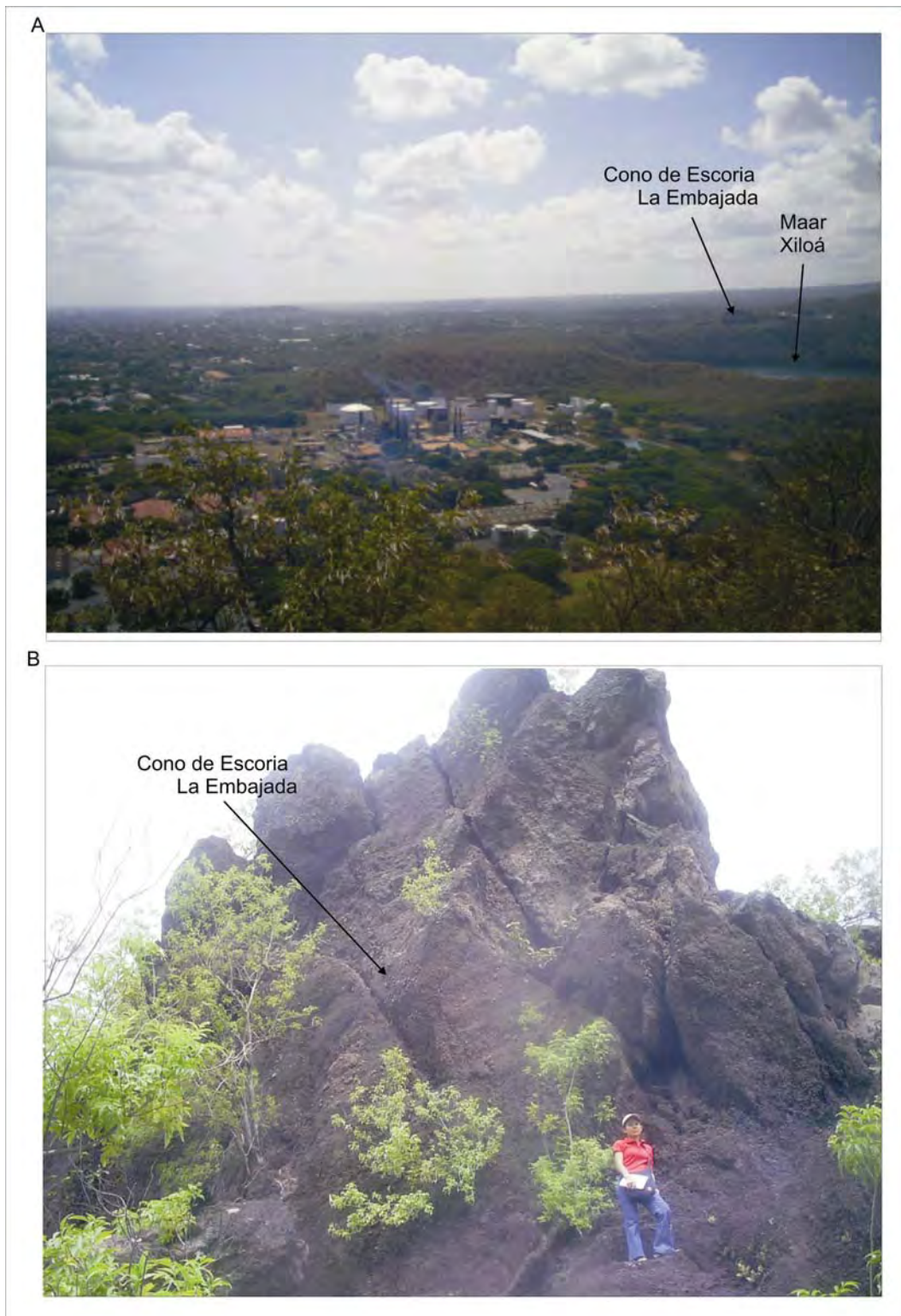


Figura 12. A) Maar Asososca y Cono de Escoria La Embajada localizado en la porción sur de Asososca costado oeste de la Embajada de los EE.UU. B) Detalle del Cono de Escoria La Embajada.

4.1.3 Campo Volcánico Ticomo

En este trabajo se propone con el nombre de Campo Volcánico Ticomo a las estructuras ubicadas en la parte sur del área de estudio. Estas estructuras emplazan a las estructuras volcánicas del Campo Volcánico Central. Tiene una longitud de 4 km y un ancho de 2 km. Conforman ocho estructuras volcánicas monogenéticas, que son: Anillo de Toba Ticomo Sur, Central y Norte, Domo Dacítico Ticomo, Anillo de Toba Nejapa Sur y Norte, Cono de Escoria Pista Sub-urbana los cuales están cubiertos por la Pómez de Apoyéque Superior con edad de 12,400 años, Triple Layer de edad de 2,100 años y Masaya Tuff con edad de 2,000 años (Kutterolf et al, 2007). y Cono de Escoria Motastepe.

4.1.3.1 Anillos de Toba Ticomo

Se denominan Anillos de Toba Ticomo a las estructuras volcánicas ubicadas en el extremo sur del Campo Volcánico Ticomo. Están orientadas N5°O y se caracteriza por presentar pendientes externas suaves con paredes de lavas de 180 m de altura. El Anillo de Toba Ticomo Sur tiene un diámetro mayor de 600 m y menor de 200 m. El Central con un diámetro mayor de 2 km y menor de 800 m y el Anillo de Toba Norte tienen un diámetro mayor de 400 m y menor de 100 m. Estas estructuras están compuestas de rocas andesíticas de color gris oscuro y textura porfídica. En muestra de mano se reconocen fenocristales de plagioclasa y anfíboles alterados, dando a la roca un color gris verdoso. Descansan concordantemente a esta estructura, depósitos piroclásticos como, depósitos de caída de Apoyéque Superior con edad de 12,400 años, Triple Layer de edad de 2,100 años y Masaya Tuff con 2,000 años.

En la parte oeste del Anillo de Toba Ticomo se localiza un domo de composición dacítica, orientado N-S. Tiene 330 m de altura con un diámetro mayor de 1 km y menor de 600 m. Está compuesto por lava de color gris clara con textura porfídica. Se reconocen fenocristales de plagioclasa y cuarzo empotrados en una matriz afanítica. En la parte superior del domo se exponen depósitos de caída de Apoyéque Superior.

4.1.3.2 Anillo de Toba Nejapa

El Anillo de Toba Nejapa se ubica en el extremo norte del Campo Volcánico Ticomo. Tiene una dirección N2°O y se caracteriza por pendientes externas suaves con paredes de lava de 160 m, con diámetros de 2 km y de 1 km. Su estructura se compone de lavas andesíticas de coloración gris oscuro, de textura porfídica. En muestra de mano se reconocen cristales de plagioclasa y horblenda muy alterados embebidos en una matriz afanítica. En la cima de la estructura se exponen depósitos piroclásticos y depósitos de caída de Apoyéque Superior con edad de 12,400 años, Triple Layer de edad de 2,100 años y Masaya Tuff con 2,000 años.

En la porción noreste del Anillo de Toba Nejapa, se localiza el Cono de Escoria Motastepe, el cual está orientado E-O con una altura de 350 m, con diámetro de 1 km y de 0.7 km. Está compuesto por oleadas piroclástica de color gris con intercalaciones de pequeñas capas de arcillas.

4.1.3.3 Conos de Escoria Pista Sub-urbana.

Es un pequeño cono de escoria, ubicado en la Pista Sub-urbana, dentro del Campo Volcánico Ticomo. Está orientado N2°E con una altura de 230 m, con diámetros de 300 m y de 200 m. Está compuesto por lavas muy vesiculadas con incrustaciones de líticos e impactos balísticos como bombas en forma de corteza de pan, con tamaños variables desde 10 cm a 1m². En la cima de este cono se exponen el depósito de Apoyéque Superior. Ver columna estratigráfica compuesta de Managua en la figura 14.

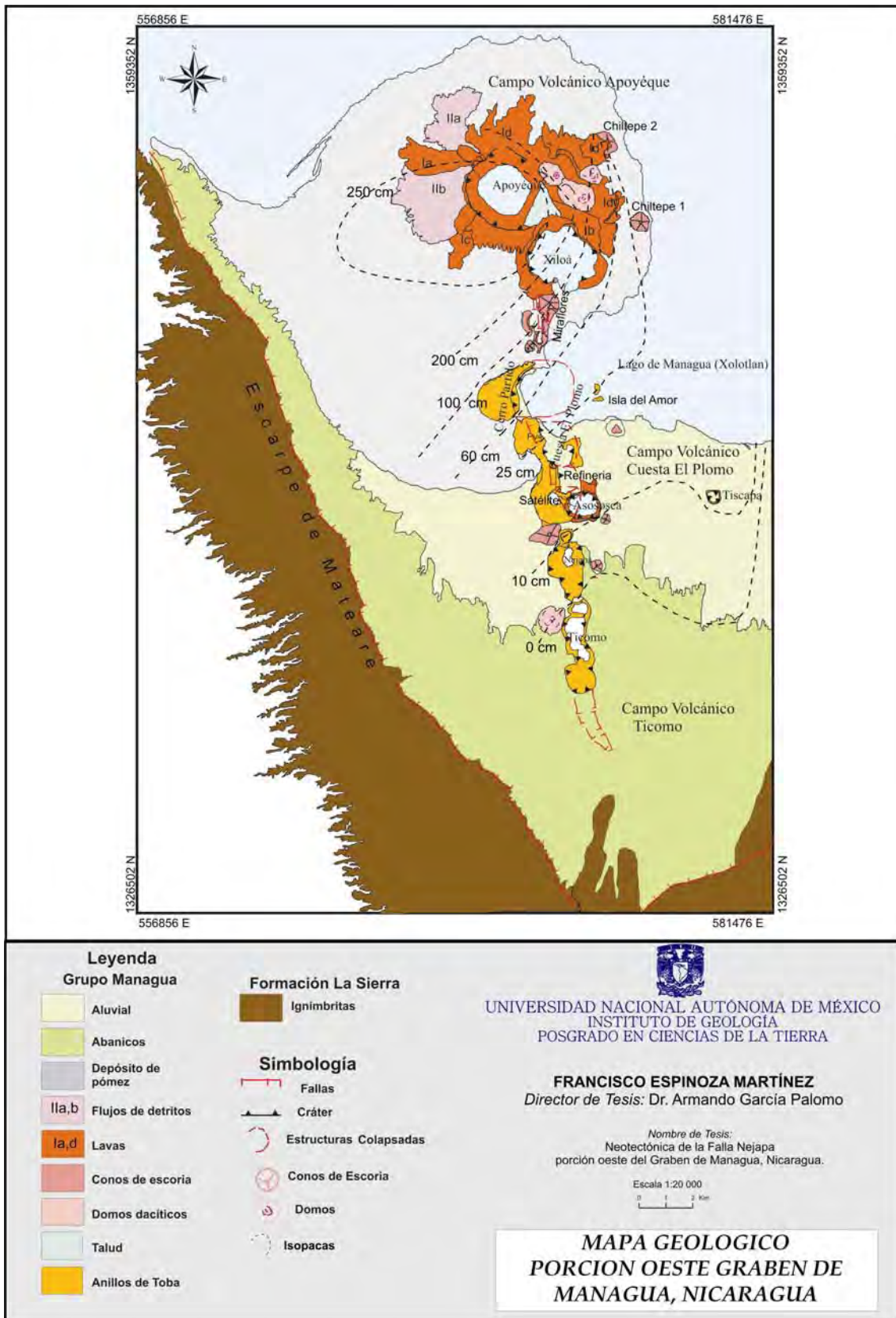


Figura 13. Mapa geológico del área de estudio (porción oeste de la ciudad de Managua). Se observa las Isopacas y eje de dispersión de depósitos de pómez de Apoyéque Superior en el área de estudio, Bice (1980).

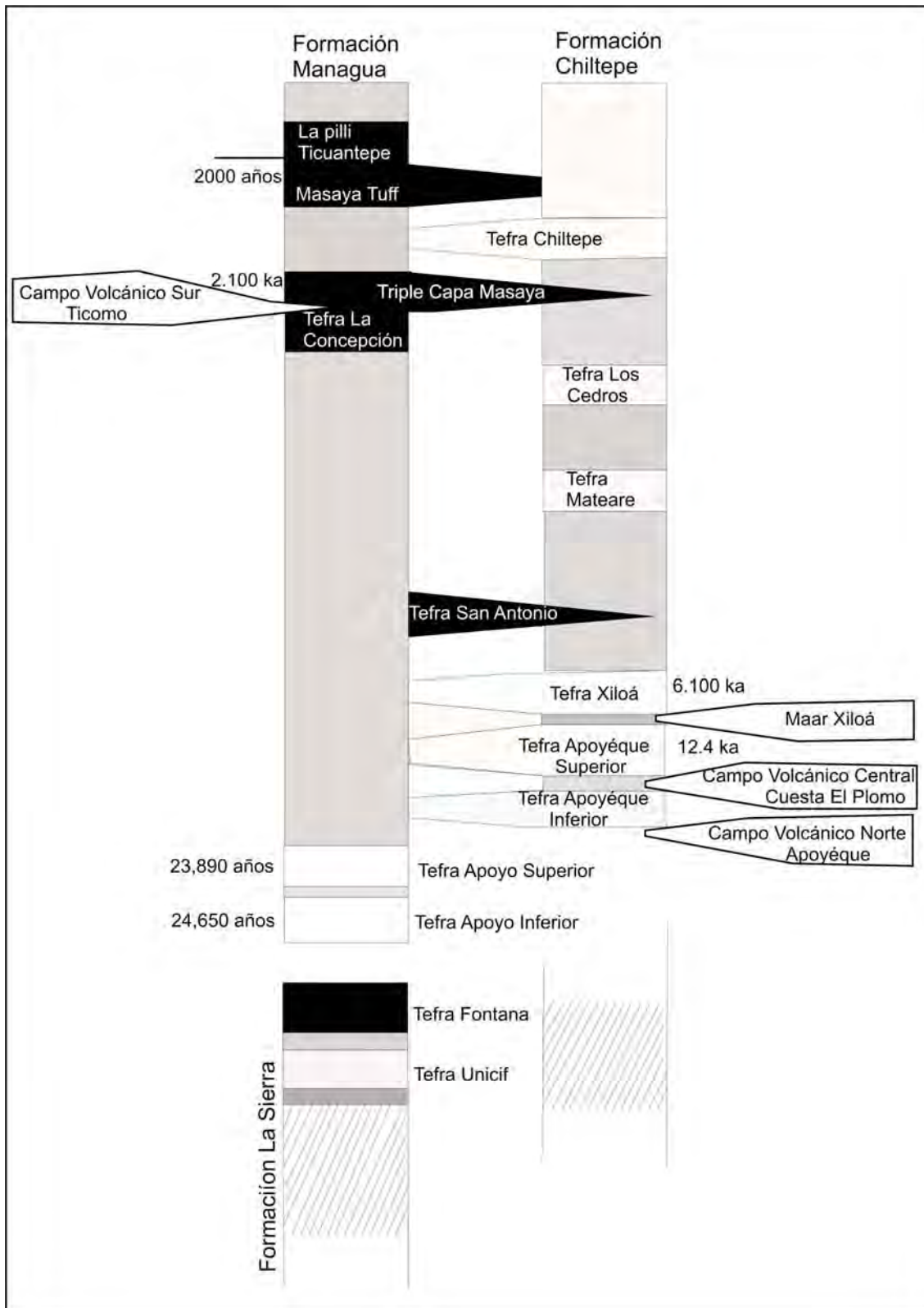


Figura 14. A) Columna estratigráfica compuesta de Managua, (Kutterolf et al , 2007). Tomando como referencia las edades publicadas por este autor, se ubican los diferentes campos volcánicos localizados en la zona de estudio.

Capítulo 5

5. Geología Estructural

Estructuralmente, el área de estudio se ubica en la zona de relevo de la cadena volcánica Nicaragüense, entre el alineamiento del volcán Madera hasta el volcán Masaya en el sur y alineamiento de los volcanes Mombacho hasta el Cosigüina al norte. Esta zona de relevo se ha considerado como un **pull-apart** (Frischbutter 2002) y como una fosa tectónica (Mc Birney y Willians 1965), la cual tiene una longitud de 36 km y un ancho de 15 km, hacia el sur y 26 km, hacia el norte y está limitada al oeste por la Falla Mateare y al este por la Falla Cofradía.

5.1. Morfología

Para un mejor análisis e interpretación de la cartografía geológica-estructural del área de estudio, se elaboraron los mapas topográfico, altimétrico, de pendientes, y modelo de relieve sombreado. Con el fin de determinar y corroborar las diferentes estructuras de la región.

5.1.1 Mapa topográfico

Con el análisis del comportamiento de las curvas de nivel se determinaron tres zonas principales en el área de estudio.

La primera zona se localiza en el extremo oeste del área, donde se expone un rasgo estructural alineado y basculado hacia el este, marcando curvas de nivel de 700 m, poco espaciadas y alargadas hacia el oeste. Este rasgo se relaciona con la Falla Mateare que marca el límite oeste de la Fosa de Managua.

La segunda zona se localiza en la porción central del área de estudio, se pueden observar curvas de nivel cerradas y discontinuas formando pequeñas estructuras circulares, las cuales corresponden a maares y anillos de tobas; de igual forma se presentan curvas de nivel concéntricas, indicando la presencia de pequeños conos de escoria y estructuras dómicas con alturas promedio de 300 m. La tercer zona es la que representan las planicies o zonas bajas donde las curvas de nivel marcan 180 m, en esta zona esta asentada la ciudad de Managua (**Fig. 15 A**). Las tres zonas están separadas por rasgos y alineamientos topográficos denominados Mateare y Nejapa.

5.1.2 Mapa altimétrico

El mapa altimétrico es la representación de las diferentes altitudes topográficas por medio de tramas de colores, los cuales se diferencian por tonos muy marcados.

En este caso se utilizaron tramas de colores que van de menor intensidad para las partes bajas y mayor intensidad para las partes altas. La diferencia en los tonos de colores permitió visualizar con exactitud rasgos estructurales y alineamientos de estructuras volcánicas.

Al oeste del área de estudio se determinó la presencia de un pilar tectónico denominado en este trabajo como Mateare. Es un rasgo morfológico alienado N-S que sobresale en comparación con las áreas en su contorno, se encuentra marcado por alturas que varían desde 450 hasta 720 m. En la parte sur se observa la mayor altura del área de estudio marcada por tonos fuertes y alturas que varían desde 700 hasta 900 m. esta corresponde con una curvatura que forma la Falla Mateare (Frischbutter, 2002).

En la parte central se aprecian cuatro estructuras circulares que están alineadas casi N-S. Dos de estas estructuras están ubicadas al sur del área de estudio, el Anillo de Toba Nejapa con altura de 200 m y el Maar Asososca con 100 m de altura. Las otras dos estructuras se ubican al norte del área de estudio y se conocen como volcán Apoyéque con altura de 416 m y el Maar Xiloá con altura de 100 m. **(Fig. 15 B)**.

La variación en los tonos de fuertes a bajos se observa de sur a norte y de oeste a este hacia la ciudad de Managua.

5.1.3 Mapa de pendientes

El mapa de pendientes se obtiene a partir de las diferencias en las alturas de las curvas de nivel, lo que permite visualizar los diferentes patrones geomorfológicos, basados en los cambios de coloración de sus pendientes. Para la zona de estudio se obtuvieron 4 patrones geomorfológicos que van de menor a mayor pendiente; valle de 0°-15°, 16°-30° para los conos de escoria, 31°-45°, laderas y > 45° para zonas pronunciadas o escarpadas. Las zonas con pendientes altas se observan como zonas escarpadas y basculadas hacia el este que sugiere la presencia de zonas de falla con dirección N-S, y estructuras alineadas con dirección N-S y con mayor concentración de estas en la parte norte **(Fig. 16 C)**. Hacia la parte sur del área de estudio se observa un

alto topográfico con dirección E-O y con una dirección de drenaje hacia el norte donde está asentada la ciudad de Managua.

En los cuatro mapas anteriores se observan claramente o de manera relevante varios rasgos morfológicos. El primero es el alineamiento de la Falla Mateare, con un escarpe bien pronunciado con un basculamiento hacia el SO. El lineamiento N-S de las estructuras volcánicas de la Falla Nejapa y con un ángulo entre ambas de 30°; también es claro un ángulo de apertura de la Falla Nejapa, cuyo ápice se localiza en la porción sur de Ticomo y su mayor apertura en la porción norte de Apoyéque-Xiloá.

5.1.4 Mapa de modelo sombreado

El mapa de modelo de relieve sombreado en conjunto con el mapa topográfico y las fotografías aéreas, ayudó a visualizar en forma precisa las características morfoestructurales y litológicas de la región.

Este mapa permite visualizar el área en tres dimensiones, lo que facilitó trazar los diferentes contactos litológicos, dirección de flujos y rasgos morfoestructurales. Desde el punto de vista estructural se define que la zona presenta un escalonamiento en bloques de oeste a este, hacia la parte más baja en la ciudad de Managua, separados por rasgos morfológicos bien pronunciados y alineaciones de estructuras volcánicas (**Fig.16 D**). En este trabajo se les denomina a estos bloques como: Mateare, Nejapa y Managua.

En el extremo oeste se localiza el bloque más alto denominado Mateare, presenta una dirección de drenaje hacia el oeste y en menor proporción hacia el este. Hacia la parte central se localiza el bloque Nejapa el cual se caracteriza por albergar estructuras volcánicas con dirección N-S. De acuerdo a sus características morfológicas y un arreglo geométrico en **échelon** derecho que presentan estas estructuras se pueden separar en tres segmentos, aquí denominados: Segmento Norte, donde se concentra el mayor número de estructuras volcánicas monogenéticas y el volcán compuesto Apoyéque el cual tiene asociado flujos de detritos y flujos de lava. Segmento Central el cual se caracteriza por presentar estructuras rotas con colapso hacia el este, también se observa al Maar Asososca como una estructura intacta. El Segmento Sur se caracteriza por albergar estructuras volcánicas completas como es el Anillo de Toba Nejapa y Ticomo.

Hacia la porción este y fuera del área de estudio se localiza el bloque Managua el cual se caracteriza por albergar el mayor número de fallas que afectan la ciudad de Managua.

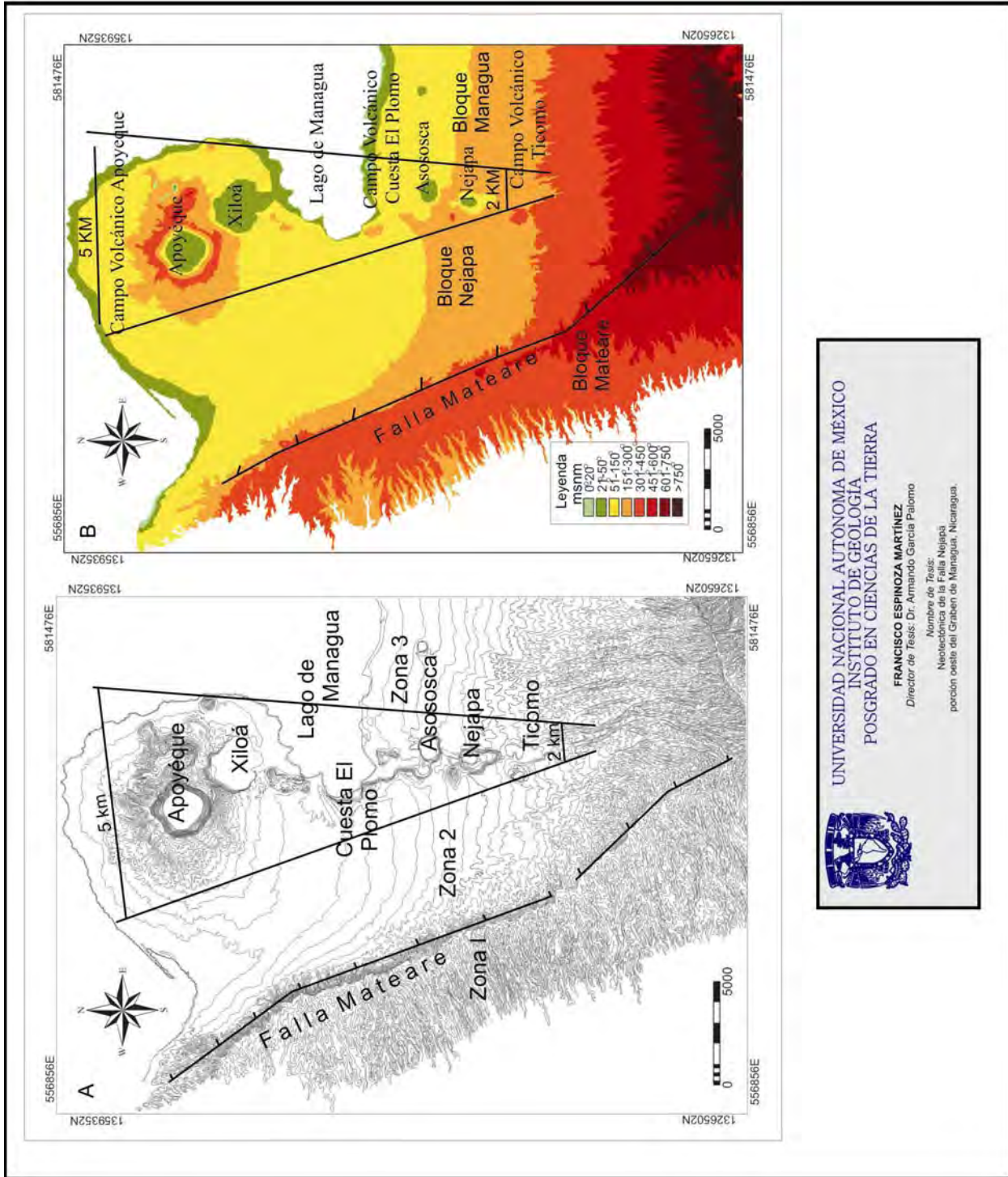


Figura 15. A) Mapa topográfico donde se puede diferenciar las tres zonas basado en el comportamiento de las curvas de nivel. B) altimétrico que diferencias zonas altas y bajas basado en el trama de colores.

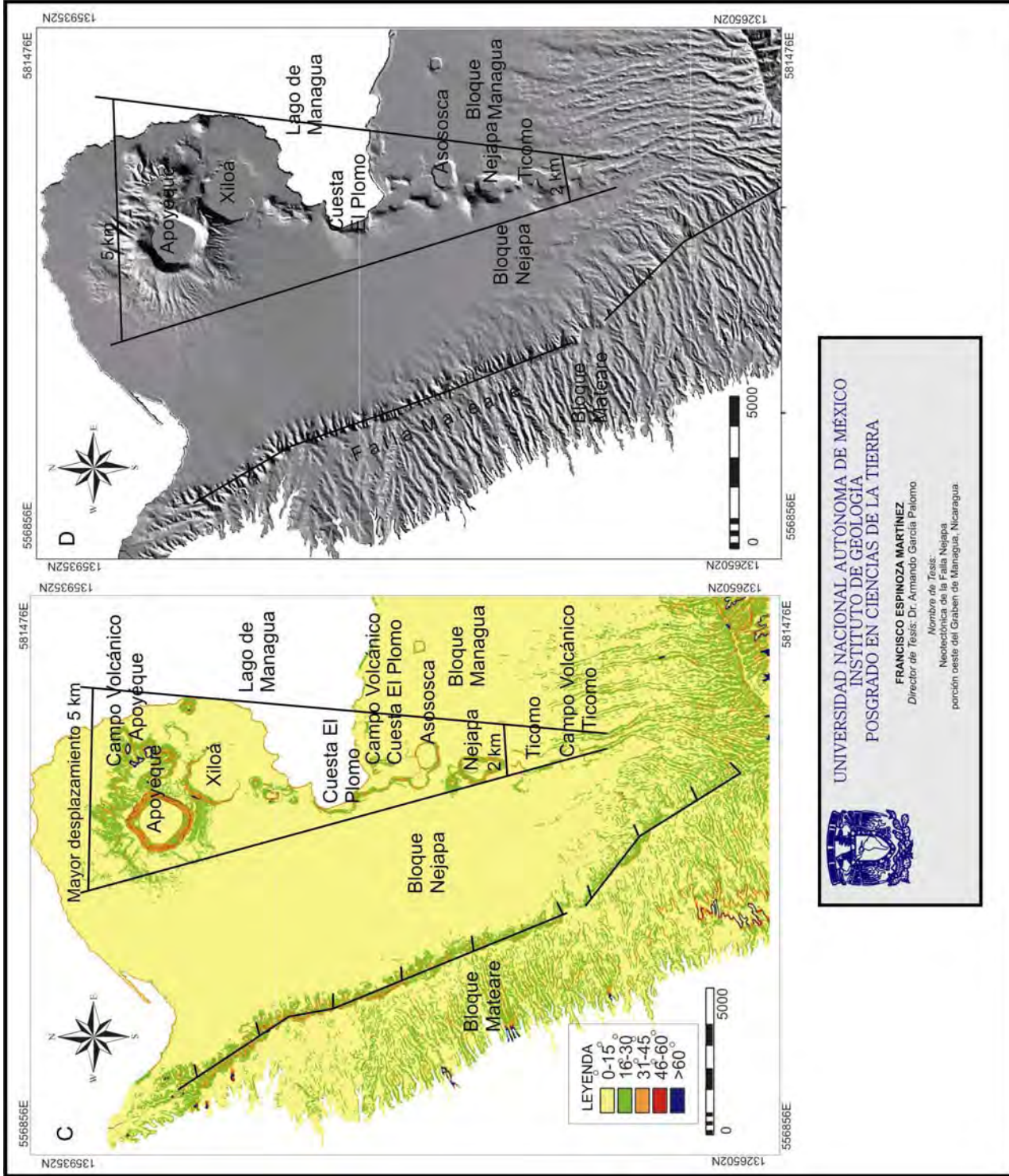


Figura 16. A) Mapa de Pendiente donde se visualiza diferentes patrones geomorfológicos que van de menor a mayor pendiente. B) Mapa de relieve de modelo sombreado donde se observa un escalonamiento en bloque hacia el oeste, así como la alineación de estructuras volcánicas.

5.2 Neotectónica

Muchos autores han propuesto diferentes definiciones sobre la neotectónica. El primero en introducir el término neotectónica fue Obruchey (1948) y la describe como el estudio de los movimientos recientes que dieron lugar a finales del Terciario e inicios del Cuaternario. Sin embargo, una de las definiciones más completas es la de Morner (1990) el cual la define como una rama de la tectónica, que estudia los procesos de deformación que ocurren en tiempo y espacio, y permite la interpretación de los sistemas de fallas, tanto como de su deformación como de su cronología.

Para el estudio e interpretación de la neotectónica existen diferentes disciplinas entre las que destacan la sismotectónica y la morfotectónica. La primera se define como el estudio de los aspectos geológicos como, deformación de sedimentos y análisis de fallas que presentan un alto índice de actividad sísmica, y que generalmente coinciden con las estructuras tectónicas mayores. Como por ejemplo, en zonas de subducción donde los sismos mayores se concentran en los bordes de las placas. Barka y Kadinsky (1988), proponen que durante un sismo muchas estructuras activas pueden romperse y separarse en segmentos cortos o largos, que van desde pocos a miles de kilómetros y las definen como segmentos de fallas sísmicas donde las características estructurales están basadas en la geometría de la falla. Otra disciplina fundamental de la neotectónica es la morfotectónica que se define como el estudio de todos los aspectos relacionados entre la geología estructural y las formas del terreno como son alineamientos y morfología de estructuras.

De acuerdo a estas definiciones y para la interpretación de la zona de falla en el área de estudio se tomaron en cuenta seis de estos parámetros fundamentales de la neotectónica que son:

- 1- Lineamientos de estructuras volcánicas monogenéticas.
- 2- Colapso de las estructuras volcánicas monogenéticas.
- 3- Morfología de las estructuras.
 - 1- Mecanismos focales.
 - 2- Fallas.
 - 3- Indicadores cinemáticos sobre planos de fallas.

Estructuralmente la zona de estudio se encuentra en un régimen frágil que afecta a ignimbritas de la Formación La Sierra y a rocas piroclásticas del Grupo Managua. En este tipo de régimen frágil se originan una serie de indicadores cinemáticos que en la zona de estudio son:

- 1- Fallas conjugadas.
- 2- Presencia de sigmoides.
- 3- Zonas de relevo.
- 4- Desplazamientos de estratos guías.
- 5- Estructuras en dominó.

5.3 Neotectónica de la zona de Falla Nejapa

5.3.1 Falla Nejapa

Con base en el análisis estructural cinemático, estratigráfico y volcánico se propone que el Lineamiento Nejapa constituye la Falla Nejapa. La falla es de tipo normal con un componente lateral. Tiene una dirección N-S con una longitud de 24 km y un ancho de 2 km en su extremo sur y de 5 km en su extremo norte, ver mapa estructural en la figura 39.

Dentro de la zona de falla se encuentran alineadas 25 estructuras volcánicas de edad Cuaternaria como son: conos de escorias, domos dacíticos, anillos de toba, maares y un volcán compuesto. La falla esta expuesta desde el Campo Volcánico Apoyéque en su parte norte, hasta el Campo Volcánica Ticomó en su parte sur.

Paralelas a la falla principal se exponen una serie de fallas discontinuas de poca longitud, con diferentes indicadores cinemáticos que son: desplazamiento de estratos guías, estructuras conjugadas, estructuras en dominó y sigmoides verticales.

Se realizaron 13 estaciones estructurales (**Fig.17**) de donde se obtuvieron más de 100 datos estructurales, los cuales fueron procesados con el paquete SPHERISTAT (Versión 2.0). Se obtuvieron una serie de diagramas de rosas que posteriormente se ubicaron sobre el mapa estructural con el fin de conocer su dirección preferencial. Este análisis permitió definir la dirección predominante de la zona de

estudio, con un 60% en dirección N-S, 30% en dirección N10°O y 10% en dirección N5°E.

La Falla Nejapa presenta una geometría en **échelon** derecho con zonas de relevo aproximadamente de 0.8 km en la parte sur y 0.9 km en la parte norte. De acuerdo con sus diferencias vulcanológica y estructurales se separó en tres segmentos principales: **(Fig. 18)**.

- 1- Segmento Norte, Campo Volcánico Apoyéque
- 2- Segmento Central, Campo Volcánico Cuesta El Plomo
- 3- Segmento Sur, Campo Volcánico Ticomo

De acuerdo a las relaciones estratigráficas y a su geometría, el segmento Norte se considera el más antiguo seguido del segmento Central y el segmento Sur. Las estructuras volcánicas más explosivas en el norte y menos explosivas hacia el sur. Las estructuras volcánicas del norte se caracterizan por erupciones plinianas Bice (1985). Las estructuras del segmento central se caracterizan por ser estructuras rotas con la apreciación de una semifosa tectónica y las estructuras del segmento sur caracterizadas por estructuras completas, pero con un ápice formado por una pequeña semifosa.

En términos generales la falla tiene un ángulo de apertura de 20° aproximadamente, localizándose su ápice en la parte sur y la mayor apertura en la parte norte con un desplazamiento de 5 km.

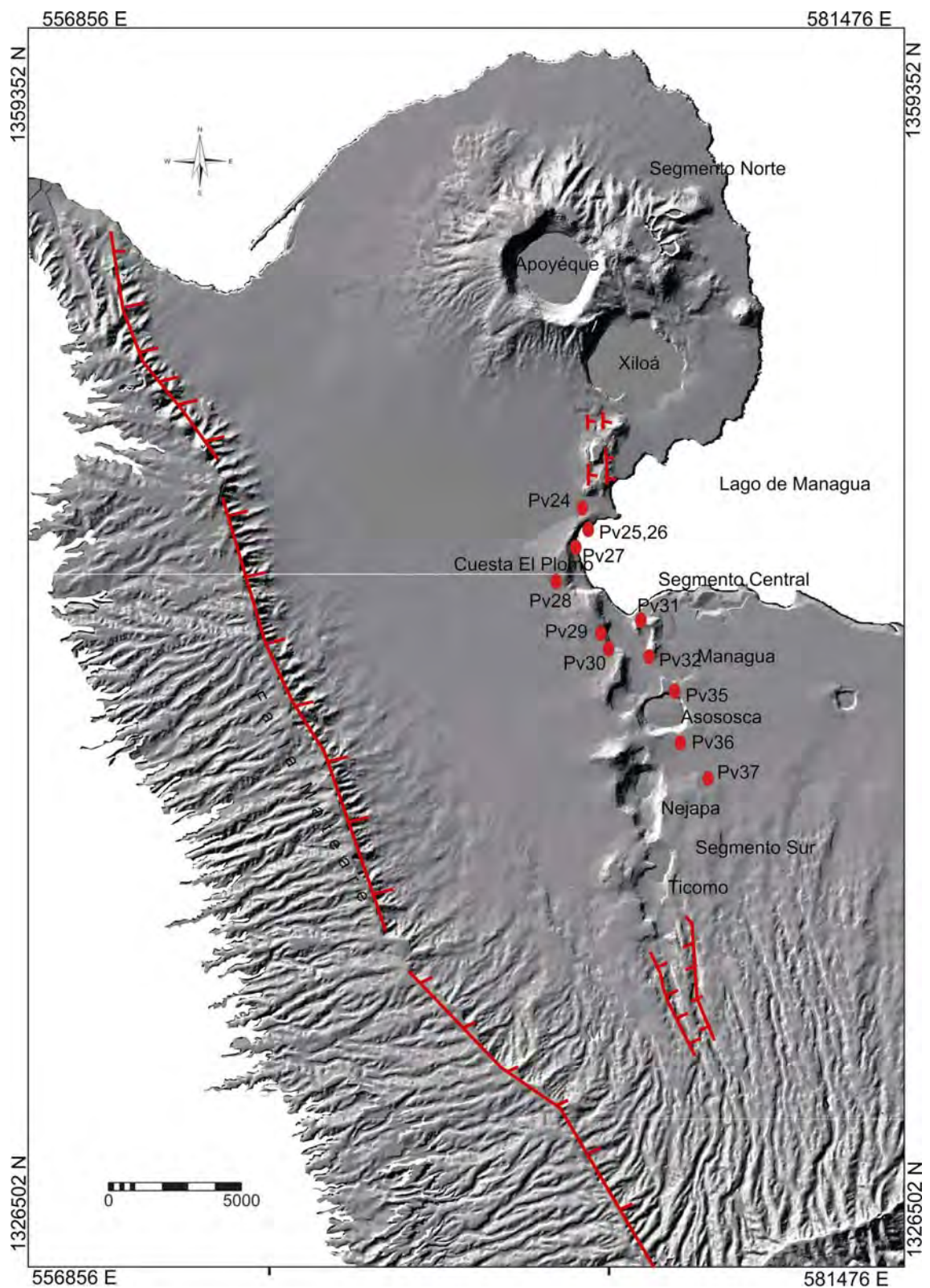


Figura 17. Mapas que muestra las diferentes estaciones estructurales que se realizaron a través de la Falla Nejapa.

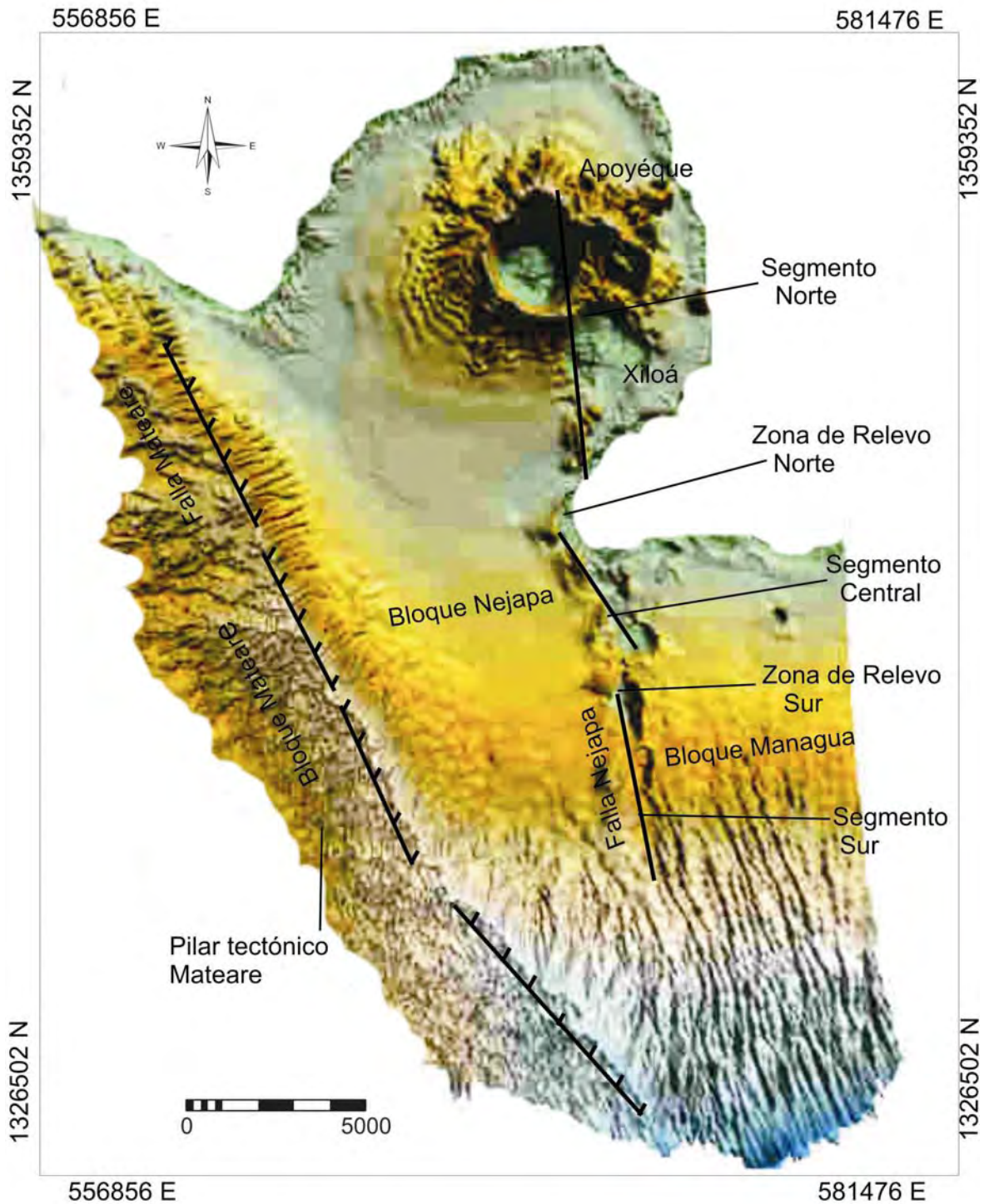


Figura 18. Modelo tridimensional de relieve del área de estudio. Se observa la delimitación y segmentación de la Falla Nejapa y su zonas de relevo de 0.8 km en la parte sur, y 0.9 km en la parte norte. También se aprecia el Pilar Tectónico Mateare con escalonamiento hacia el este, y los bloques propuestos de Mateare, Nejapa y Managua.

5.3.1.1 Segmento Norte, Campo Volcánico Apoyéque-Xiloá

Dentro del segmento Norte, se encuentra el Campo Volcánico Apoyéque-Xiloá. el segmento tiene una longitud de 8 km y un ancho de 5 km y está conformado por 11 estructuras volcánicas como son: conos de escoria, domos, maar y un volcán compuesto, todos antes descrito.

Basado en la morfología y estratigrafía, el segmento norte es considerado el más antiguo y de mayor longitud de la Falla Nejapa que alberga el mayor número de estructuras volcánicas y marca el límite norte de la zona de estudio. En el trabajo de campo no se observaron indicadores cinemáticos a nivel de afloramientos como consecuencia de la espesa vegetación y escasos afloramientos en la zona.

5.3.1.2. Segmento Central, Cuesta de El Plomo

El Segmento Central, Cuesta El Plomo, tiene una extensión de 7 km y un ancho de 3 km que esta conformado por seis volcanes monogenéticos, dentro de los que figuran: anillos de toba, conos de escoria y un maar.

A través del análisis de fotografías aéreas y observaciones de campo, las estructuras de este segmento son los más afectadas por la Falla Nejapa, ya que presentan colapsos hacia el este, exponiendo solamente sus porciones oeste de cada estructura. En el extremo sur de este segmento se ubica el Maar Asososca el cual no presenta fallas por lo que se considera como una estructura volcánica joven sobrepuesta, siendo su basamento parte del Anillo de Toba El Satélite. Sin embargo, es cortada por diques orientados N-S.

En esta zona se realizaron levantamientos estructurales. En los sitios PV24, 25, 26 y 27. En la parte norte del segmento central, en el Anillo de Toba Cerro Partido, se identificó una pequeña zona de fallas con desplazamiento de hasta 15 cm de los estratos guía. En el mismo sitio pero al costado sureste esta estructura se presentan bloques basculados hacia el sur, formando pequeñas estructuras en dominó que afectan a grandes paquetes de oleadas piroclásticas compactas. Las fallas presentan una dirección N5°O- 80°NE (**Fig. 19**).

En el extremo sur del Anillo de Toba Cerro Partido, en el sitio PV28 se presentan sistemas de fallas conjugadas con dirección de N5°E-80°SE y N10°O-85°NE (**Fig. 20**). Las rocas que son afectadas son oleadas piroclásticas compactas del Cuaternario.

En el corte de carretera de la Cuesta El Plomo, en el sitio PV29, 30, aparecen sistemas de fallas con rumbo N-S y echado hacia el este. Estas fallas fueron identificadas por brechas, harinas de falla y desplazamientos de horizontes guías. En el sitio PV31, 32 se presentan fallas identificadas por harina de falla y desplazamiento de estratos guía. La orientación de estas fallas es N10°O- 85°SO. Por el buzamiento opuesto de estas fallas con respecto a la de la falla principal, se interpretan como fallas antitéticas, las cuales forman una semifosa tectónica, que en este trabajo se denomina como semifosa Cuesta El Plomo (**Fig. 21 y 22**). Las rocas que afectan esta deformación son oleadas piroclásticas con intercalaciones de paleosuelos y depósito de pómez de caída.

En el extremo sur de este segmento en el sitio PC10 se ubica el Maar Asosoca, una de las estructuras más jóvenes de este segmento. Esta estructura está cortada por pequeños diques de dirección N-S cuya orientación es compatible con la tendencia general de la falla. En las paredes de esta estructura no se observan zonas de fallas. En el extremo sur del cráter en el sitio PC11, se localiza el Cono de Escoria La Embajada afectado por estructuras sigmoidales verticales de hasta 3 m y por diques con dirección N10°W. Las rocas deformadas son lavas del Cuaternario (**Fig. 23**).

5.3.1.3 Segmento Sur, Campo Volcánico Ticomo:

El segmento sur, tiene una extensión de 4 km y un ancho de 2 km. Este segmento con dirección N-S conforma ocho estructuras volcánicas monogenéticas tales como: anillos de toba, domos dacítico y conos de escoria.

Durante el trabajo de campo no fue posible identificar indicadores cinemáticos, debido a la ausencia de cortes y la espesa vegetación que cubre la zona. La cinemática de la falla en este segmento se interpretó con base en el arreglo en **échelon** derecho que presenta la falla y la dirección del colapso de las estructuras volcánicas del segmento central.

5.4 Semi-fosa Cuesta de El Plomo

En este trabajo se propone como semifosa Cuesta El Plomo a la estructura localizada en el segmento central del mismo nombre. Tiene una dirección N-S, con longitud de 2 km y un ancho de 0.8 km, y está delimitada por fallas antitéticas que buzanan hacia el SO. El escarpe que forma parte del bloque levantado alcanza alturas de 80 m con respecto a la parte central de la semifosa, la cual se encuentra rellena por materiales aluviales y productos piroclásticos. Asociada a esta estructura se han detectado enjambres sísmicos con eventos no mayores a 1 km de profundidad y magnitudes de 3.4 en la escala de Richter (INETER, 2000) (**Fig. 24**).

5.5 Pilares tectónicos

De acuerdo al análisis anterior se han definido en el área de estudio una serie de estructuras como el pilar tectónico Mateare que presenta un escalonamiento hacia el este y los bloques Mateare, Nejapa y Managua (**Fig. 18**).

5.5.1 Bloque Tectónico Mateare

El bloque Mateare se localiza al oeste de la zona de estudio. Este tiene la mayor expresión topográfica, con alturas que varía de 300 a 700 m y un ancho de 5 km. El bloque está limitado al este con la denominada Falla Mateare con extensión de 30 km dentro del área de estudio y está basculado hacia el oeste. Estratigráficamente está constituida por ignimbritas de la Formación la Sierra de edad Terciario tardío.

5.5.2 Bloque Tectónico Nejapa

El bloque Nejapa se localiza en la parte central de la zona de estudio. Tiene una longitud de 27 km, con un ancho de 6 km en el sur y 10 km en el norte y la altura varía desde 100 a 400 m. Este bloque limita al oeste con la Falla Mateare y al este con la Falla Nejapa, (**Fig. 31**). Estratigráficamente, su basamento está compuesto por ignimbritas pertenecientes a la Formación la Sierra, la que a su vez es sobreyacida por materiales piroclásticos perteneciente al Grupo Managua de edad Cuaternario. Sobre este bloque están alineadas 25 estructuras volcánicas monogenéticas. De acuerdo a la diferencia de altitudes este bloque también presenta un basculamiento hacia el oeste.

5.5.3 Bloque Tectónico Managua

El bloque Managua se localiza en el extremo este de la zona de estudio, tiene una longitud de 15 km, con un ancho de 8 km y una altura que varía desde 100 a 250 m. El bloque limita al oeste con la Falla Nejapa y al este con la Falla Cofradía, ésta última fuera del área de estudio. Estructuralmente este bloque contiene una serie de fallas que han causado los terremotos de 1931 y 1972. El basamento de este bloque está compuesto de ignimbritas pertenecientes a la Formación la Sierra, y una cobertura piroclástica del Grupo Managua.

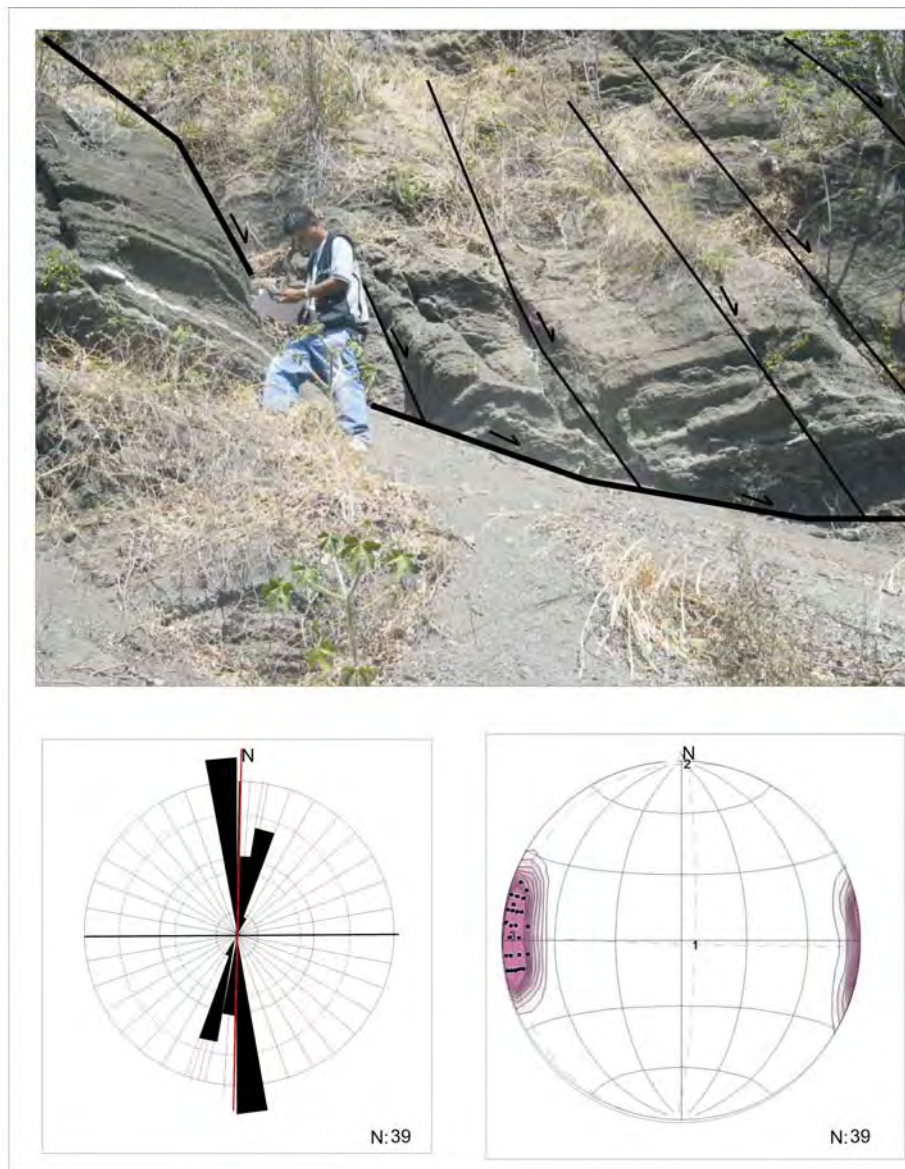


Figura 19. Geometría lístrica y en dominó, con una rotación contraria a las manecillas del reloj. El recuadro muestra la roseta de fractura con una tendencia predominante N5°O .Vista hacia el norte del Anillo de Toba Cerro Partido (Segmento Central).

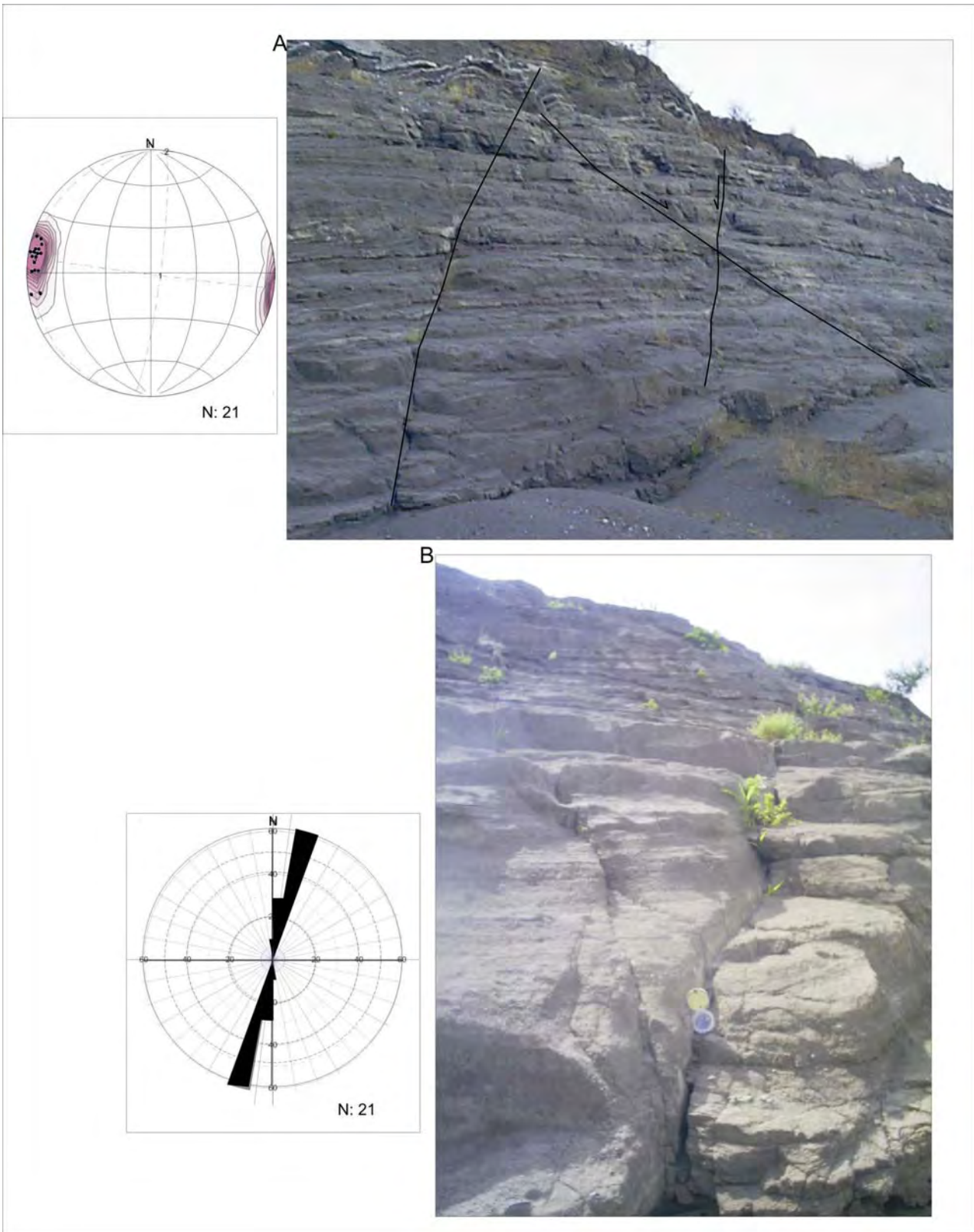


Figura 20. A) Sistema de fallas conjugadas afectando oleadas piroclásticas. B) detalle de las fallas con estructuras sigmoides. Vista hacia el noroeste del Anillo de Toba Cerro Partido.

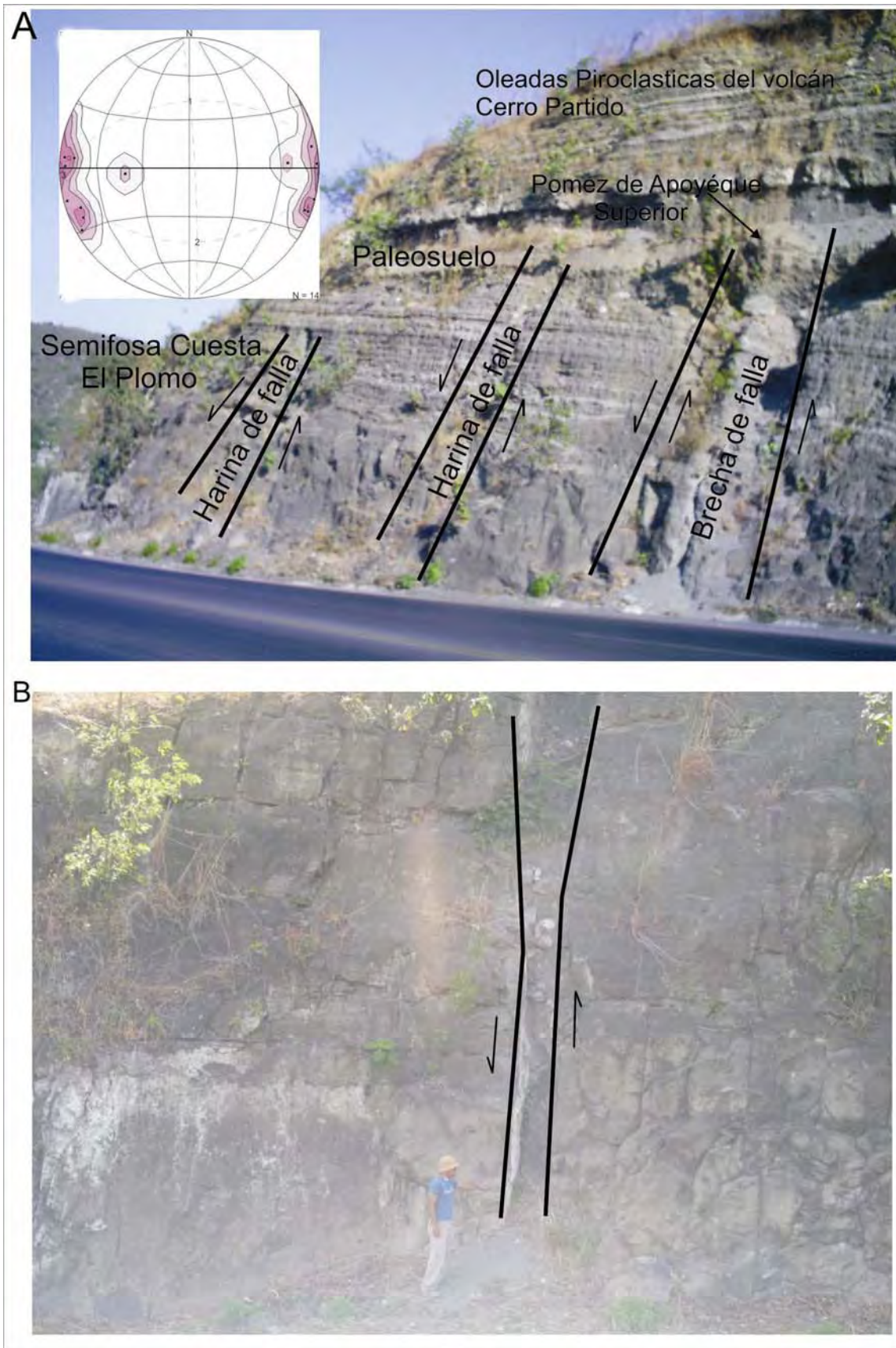


Figura 21. A) Vista hacia el oeste de la Cuesta El Plomo se aprecian zonas de falla. B) zona de falla parte SW de la Cuesta El Plomo (Segmento Central).

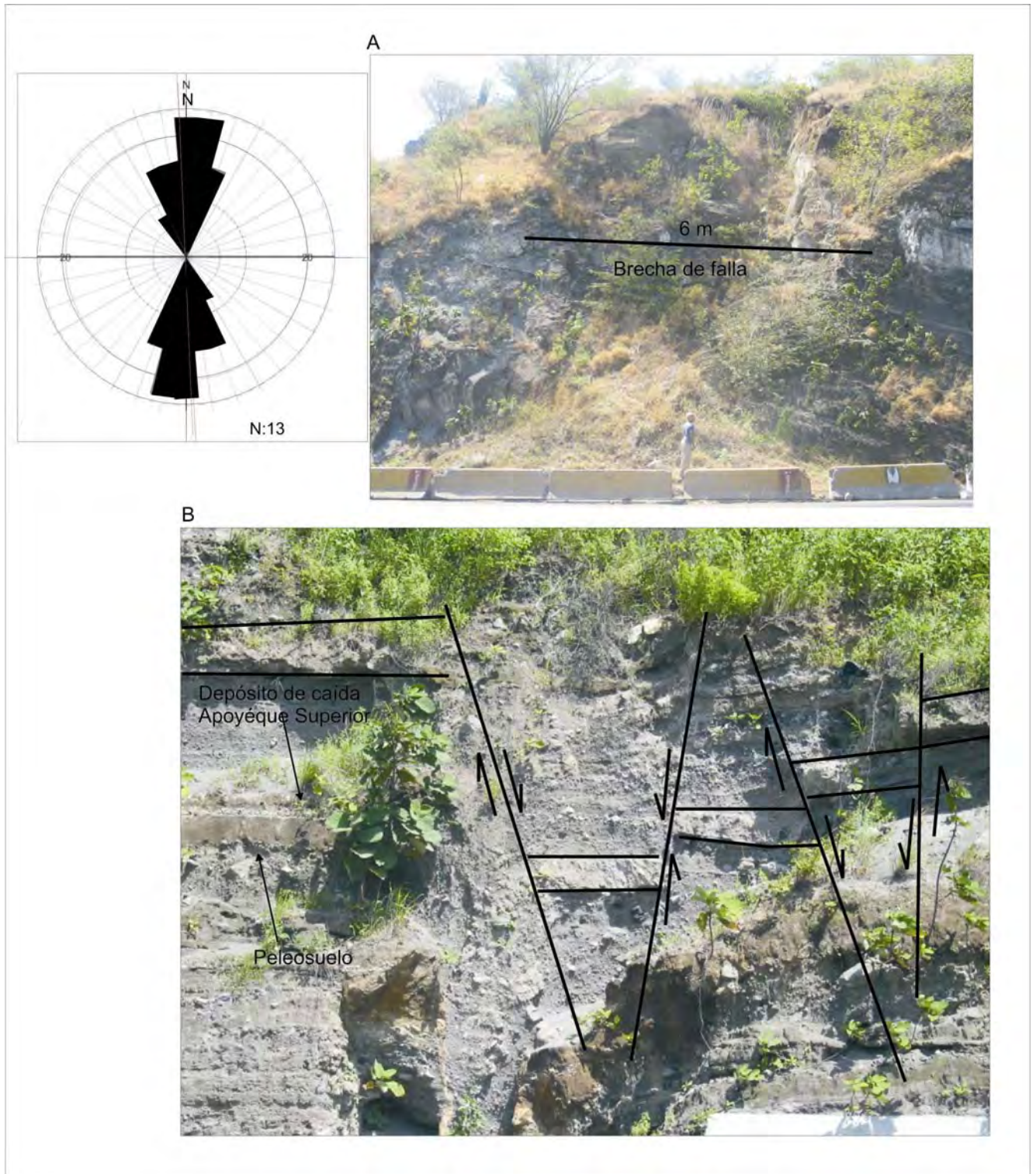


Figura 22. A) Vista hacia el oeste de la Cuesta El Plomo, Falla con dirección N-S, buzando hacia el NO y con brecha de falla de 6 m. B) Zona de falla de dirección N-S, formando fosas y pilares, que afectan oleadas piroclásticas y depósitos de caída de Apoyéque Superior (Segmento Central).



Figura 23. A) Diques con orientación N-S afectando paredes del Maar Asososca. B) Cono de escoria afectado por estructuras sigmoides en posición vertical con tamaños de hasta 3 m (Segmento Central).

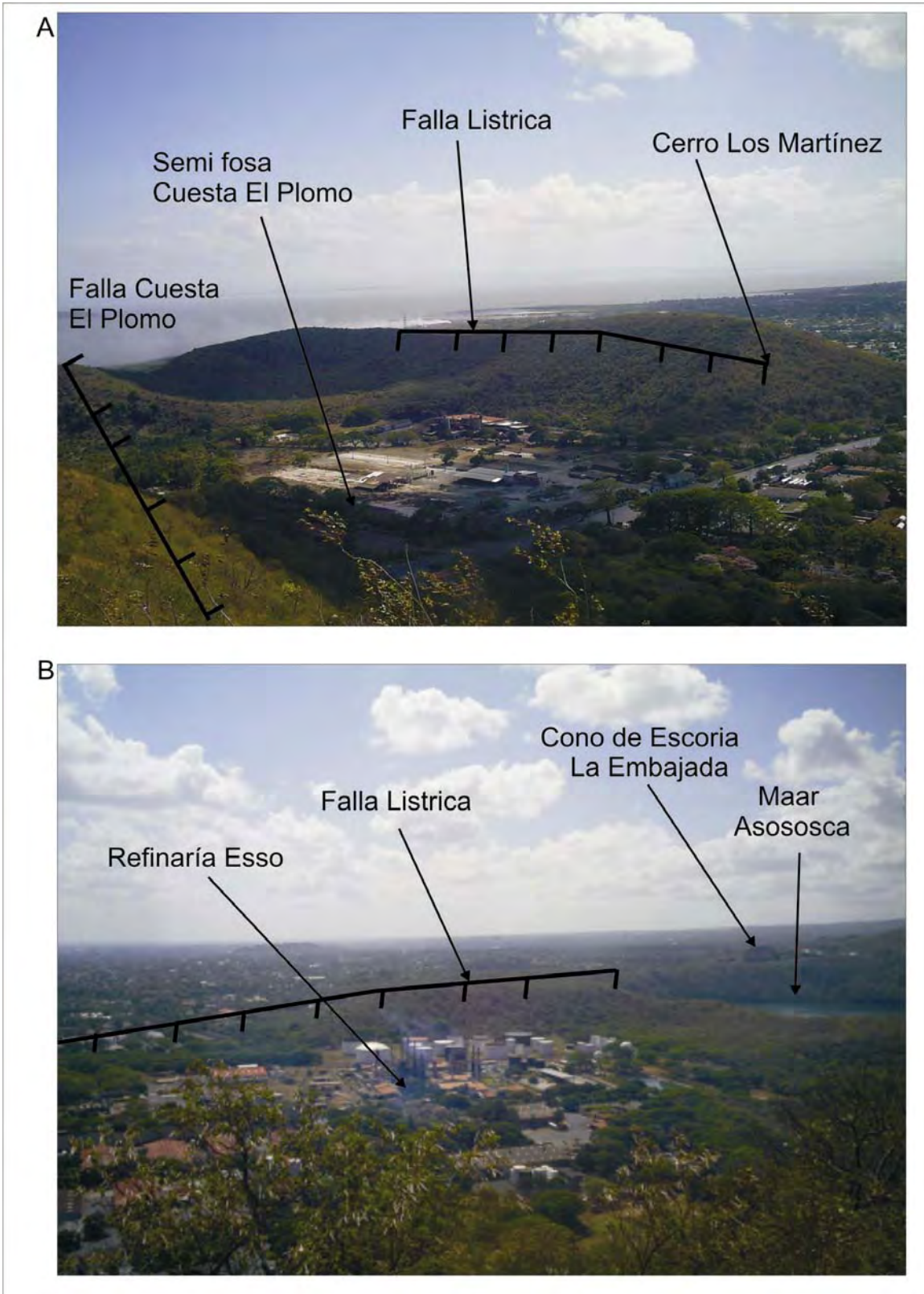


Figura 24. A) Vista hacia el sur se observa la semi-fosa tectónica Cuesta el Plomo. B) Refinería Esso, porción sur de la semi-fosa Cuesta el Plomo. Al fondo el Maar Asososca (Segmento Central).

5.6. Análisis morfológico volcánico

La relación entre vulcanismo, fallas y esfuerzo ha sido ampliamente estudiada por diferentes autores como Nakamura (1977) quien propuso que las eyecciones del magma hacia la superficie se originan a través de fracturas preexistentes, perpendiculares a la dirección del esfuerzo principal mínimo (σ_3), debido a que esta orientación requiere de menor esfuerzo por lo que el magma migra en fracturas que estadísticamente se encuentran orientadas perpendicularmente a dicho esfuerzo (**Fig. 25, 26**). Fink y Pollard (1983), relacionan el lineamiento de aparatos volcánicos con fracturas en superficie, ya que encontraron criterios estructurales que lo soportan como: alineamiento de aparatos volcánicos, elongación de conos y geometría de fracturas en superficie. Basado en estos criterios se deduce que el lineamiento de 25 estructuras volcánicas en el área de estudio como son: conos de escoria, domos dacítico, anillos de toba, maeres y un volcán compuesto, sugieren que existe un control estructural debido a la presencia de fallas y fracturas que afectan la corteza.

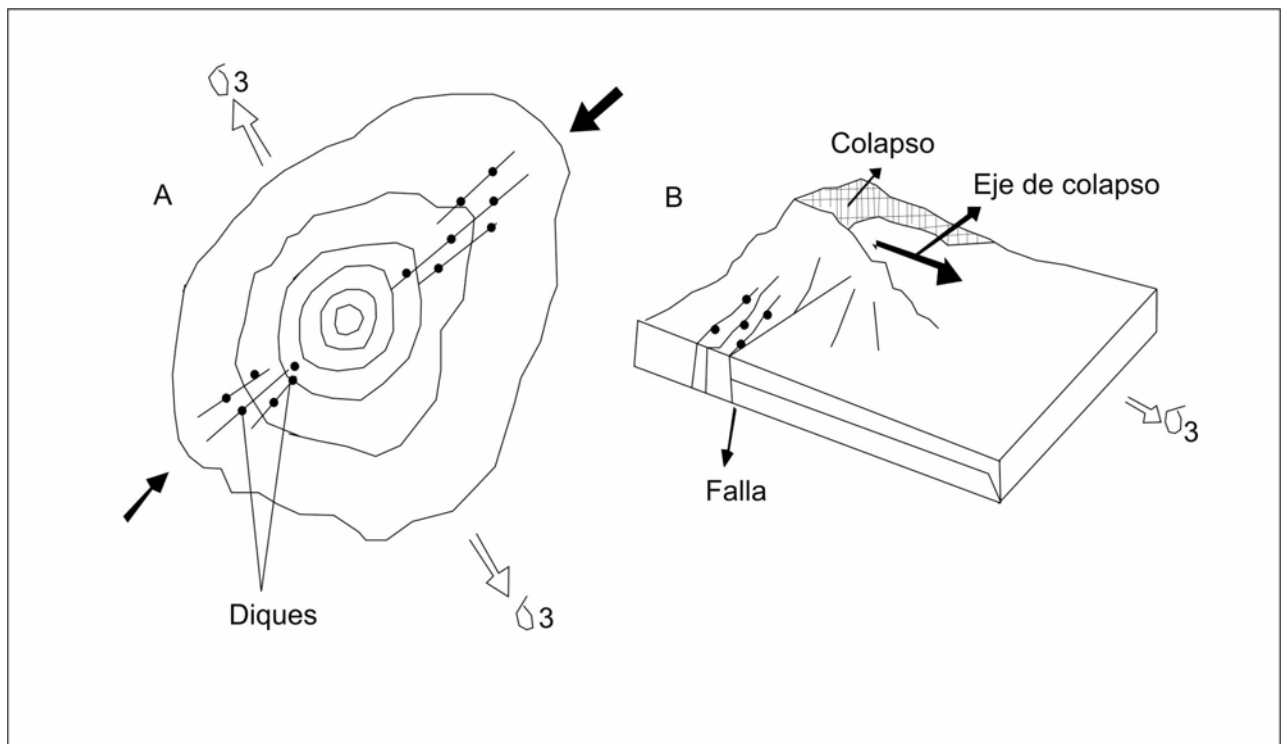


Figura 25. A) Elongación de estructuras volcánicas perpendicular a σ_3 . B) Colapso de la estructura volcánica paralelo a σ_3 (Nakamura, 1977).

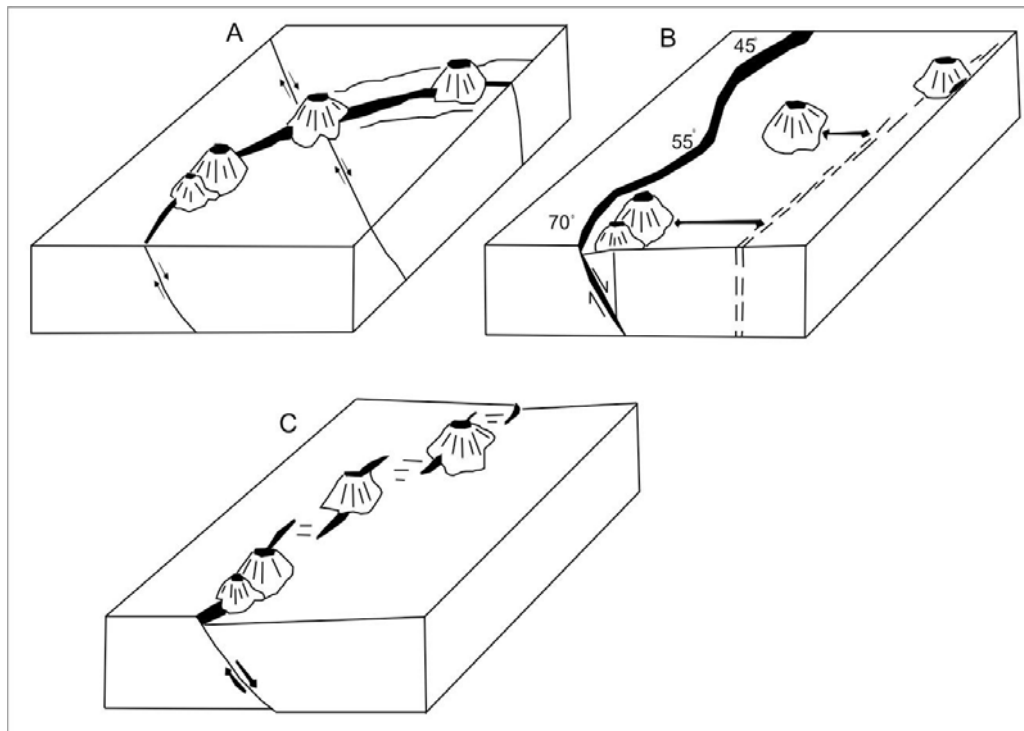


Figura 26. A) Intersección entre fallas de diferente orientación. B) Comportamiento de los conos de escoria de acuerdo al buzamiento del plano de la falla. C) Arreglo geométrico similar al de la falla Nejapa (Connor, 1995).

Los criterios antes descritos fueron utilizados para realizar un análisis morfométrico de las estructuras volcánicas del área de estudio y relacionarlos con la falla y fracturas existentes. Estos volcanes están divididos en tres segmentos, formando un arreglo escalonado con zonas de relevo de 0.8 y 0.9 km, por lo que se realizó un análisis bidimensional utilizando el método de los mínimos cuadrados para cada segmento. Para esto se toma en cuenta la posición de los centros eruptivos más cercanos y se grafican en el programa Excell. Basados en el resultado de estos análisis se obtuvo que para el segmento norte con 8 km de longitud y donde se tomaron en cuenta las estructuras volcánicas más cercanas, arrojó como resultado un coeficiente de correlación r de 0.99, con una separación de cada una de sus estructuras de 1 km. Para el segmento central con longitud de 7 km se consideraron cuatro estructuras, dando como resultado un coeficiente r de 0.98, con una separación de cada una de sus estructuras de 1.7 km. Para el segmento sur con una longitud de 4 km donde las estructuras volcánicas dan un coeficiente de correlación de 0.98 con una separación de cada estructura de 1.3 km (**Tabla 1**). Los resultados son un coeficiente r muy cercano a 1 indican que existe un control estructural N-S el cual coincide con la dirección de la Falla Nejapa (**Fig. 27**).

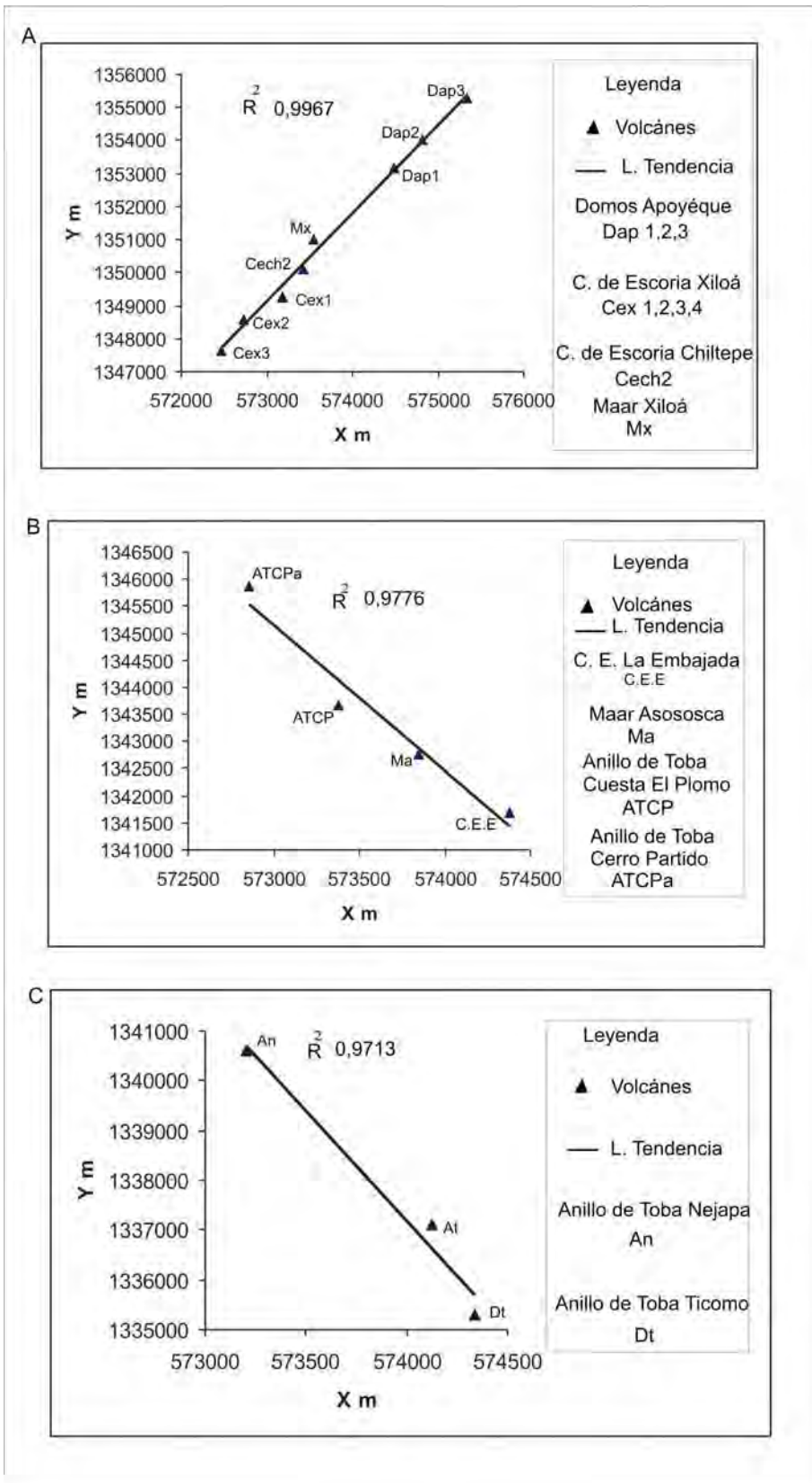


Figura 27.A) Segmento Norte. B) Segmento Central. C) Segmento Sur. Muestra la tendencia de regresión lineal de los aparatos volcánicos de la Falla Nejapa.

N°	X	Y	Rumbo	N° Volcánes	Longitud km	dist./volcán	Coef.re
Segmento Sur	57400	133600	N10°W	3	4	1.3 km	0.977
Segmento Central	57450	134100	N15°W	4	7	1.7 Km	0.971
Segmento Norte	57250	1347600	N-S	8	8	1 Km	0.976

Tabla 1. Resumen de los datos obtenidos en cada segmento de la Falla Nejapa, aplicando el método de los mínimos cuadrados que presentan un coeficientes de correlación (r) cercanos a 1 para las alineaciones de las estructuras volcánicas.

Posteriormente se midió el rumbo de los ejes mayores y menores de cada una de los volcanes y su dirección de colapso. El rumbo del eje mayor de cada volcán fue graficado en un histograma polar con un intervalo de clase de 5°. El 95% de los ejes mayores tienen dirección preferencial N5°O y el otro 5% tuvo una dirección E-O (incluye al Maar Asososca y al Cerro Motastepe). Posteriormente se determinó el grado de esfericidad de cada estructura volcánica emplazada en la Falla Nejapa. Para esto se tomó el valor del eje mayor y se ubicó en el ejes de las x contra el valor del menor en el ejes de las y. Este resultado permitió definir una buena elipsidad de los volcanes, la cual es paralela al rumbo de la falla principal y que indica un control estructural (**Fig. 28**). Nakamura (1977) sugiere que entre más elíptico es un cono, éste controlado por fallas paralelas a dicha elongación, donde el magma es inyectado a través de una estructura tabular como una falla o fractura alimentado por un dique más que a una estructura cilíndrica. La figura 28 muestra el grado de elipsidad de los conos con una correlación lineal de $r^2: 0.7957$ con una pendiente de la recta de $y: 0,5213x$ que muestra una buena elipsidad de los conos. El grado de elipsidad junto con la dirección preferencial de los ejes mayores presenta la misma dirección que la Falla Nejapa, lo que indica que ésta ha jugado un papel importante en el emplazamiento de las estructuras volcánicas.

Otro criterio utilizado para el análisis morfométrico de los conos fue medir la dirección de colapsos. Para ello se midieron 5 colapsos y se graficó en un histograma. Resulta una dirección de colapso preferencial E-O perpendicular al rumbo de la falla principal y paralelo al esfuerzo principal mínimo. La dirección preferencial de colapso hacia el este se debe a que la Falla Nejapa donde están emplazados estos conos buza hacia el este, por lo que el bloque del techo, que es el que se mueve hacia abajo es donde se genera la mayor inestabilidad (Tabla 2).

Segmento Sur	Eje Mayor	Eje Menor	Rumbo del Eje Mayor
Anillo de Toba Ticomo Sur	600 m	200 m	N 5 O
Anillo de Toba Ticomo Central	2 km	800 m	N 5 O
Anillo de Toba Ticomo Norte	400 m	100 m	N 5 O
Domo Ticomo	1 km	600 m	N-S
Cerro Motastepe	1 km	700 m	E-O
Anillo de Toba Nejapa Sur	2 km	1 km	N 2 O
Anillo de Toba Nejapa Norte	300 m	100 m	N 2 O
Cono de Escoria Pista-suburbana			
Segmento Central	Eje Mayor	Eje Menor	Rumbo del Eje Mayor
Maar Asososca	1 km	0.8 m	E-O
Cono de Escoria La Embajada	500 m	400 m	N5E
Anillo de Toba El Satélite	400 m	200 m	N5E
Anillo de Toba Refinería Los Arcos	1 km	0.5 km	N10E
Anillo de Toba Cuesta El Plomo	2 km	800 m	N15E
Anillo de Toba Cerro Partido	3.5 km	1 km	N8E
Segmento Norte	Eje Mayor	Eje Menor	Rumbo del Eje Mayor
Cono de Escoria Xiloá 1,2,3	900 m	600 m	N-S
Cono de Escoria Chiltepe 1,2	800 m	300 m	N10E
Volcán Apoyéque	1.5 km	1 km	N5O
Maar Xiloá	2.5 km	2.3 km	N15O
Domos Apoyéque 1,2,	600 m	300 m	N10O
Domo Apoyéque 3	500 m	200 m	N10O
Cono de Escoria Miraflores	900 m	600 m	N-S

La tabla2. Datos de los ejes y rumbo de las diferentes estructuras volcánicas emplazadas sobre la Falla Nejapa.

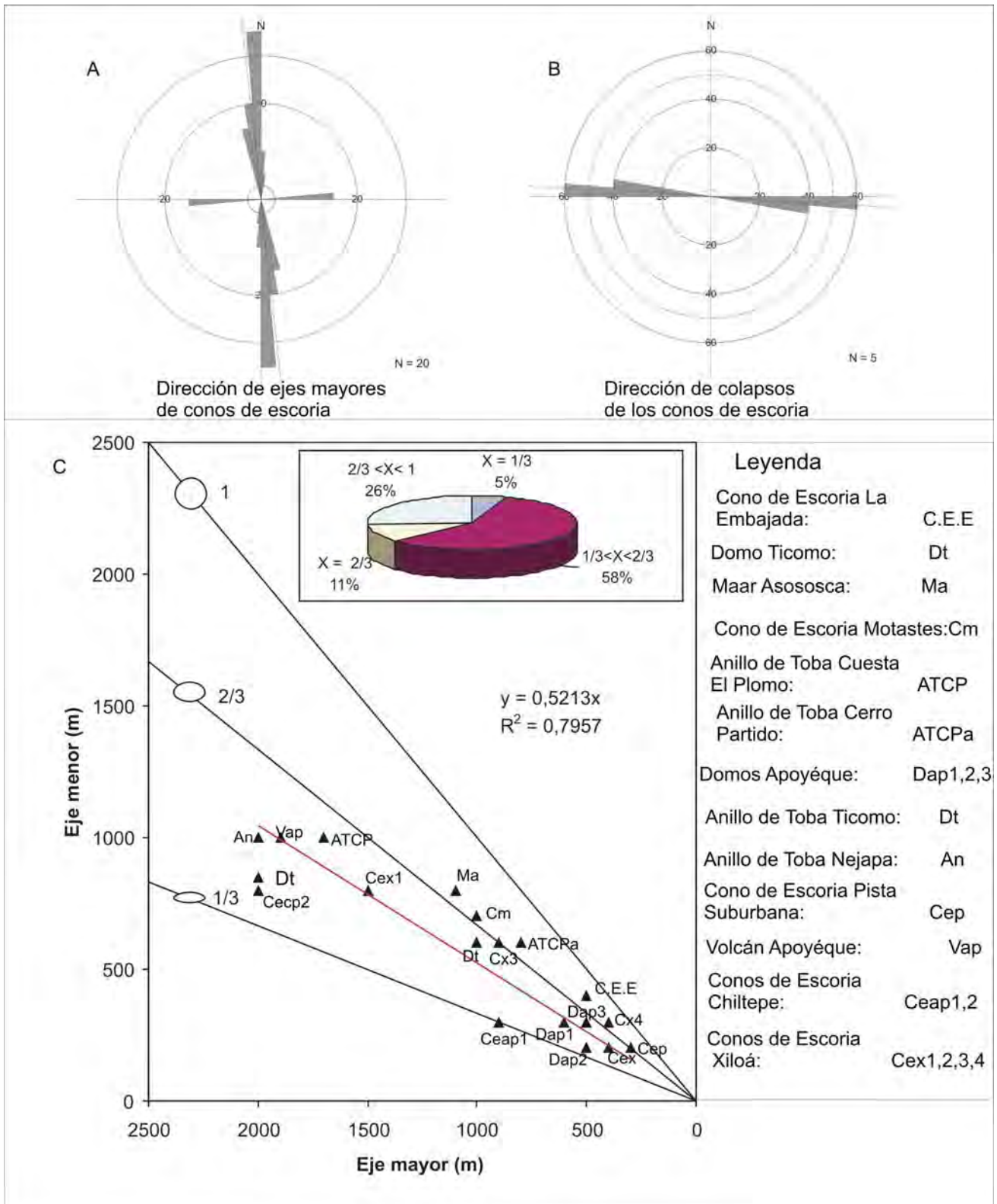


Figura 28. A) Direcciones preferenciales de los ejes mayores de los conos. B) Direcciones preferenciales E-O de colapsos de los conos. C) Relación entre los ejes máximos y mínimos de los conos emplazados en la Falla Nejapa. Los datos muestran una buena elongación de los conos (Tibaldi, 2005).

5.7 Geometría estructural

Para el análisis e interpretación del área de estudio, se elaboraron secciones y modelos tridimensionales (**Fig.29-30**).

El extremo oeste del área de estudio está delimitado por el pilar tectónico Mateare. Está compuesta por ignimbritas de la Formación la Sierra (Plioceno Superior) el cual forma parte del basamento de la región. El pilar tectónico Mateare presenta un escalonamiento en bloques hacia el este delimitados por fallas con dirección N-S tal como lo muestran las secciones y el modelo geométrico del área de estudio (**Fig.31**). El primero se denomina Mateare, está delimitado por la falla del mismo nombre y presenta una dirección N-S con buzamiento hacia el este, tiene una altura máxima de 700 m y esta compuesto por ignimbritas del Plioceno superior. El segundo bloque denominado Nejapa, tiene una altura máxima de 400 m y está delimitado al este por la falla del mismo nombre, la cual presenta una geometría en **échelon** con dirección preferencial N5°E y buzamiento al este (**Fig.32**). El bloque Nejapa se caracteriza por conformar estructuras volcánicas del cuaternario cuyos productos forman la estratigrafía del Grupo Managua que sobreyace a las ignimbritas de la Formación la Sierra. En el extremo sur de este bloque se localiza la fosa del ápice que forma parte del ángulo de apertura de la Falla Nejapa. tiene una dirección N-S, con una longitud de 2.0 km y ancho de 0.5 km. Hacia el norte sobre este mismo bloque se formó la semi-fosa Cuesta El Plomo delimitada por fallas antitéticas con dirección N10°O y buzamiento hacia el SO (**Fig.33**) ver secciones (**Fig. 34, 35,36**). El último bloque, es el bloque Managua, de menor elevación con altura máxima de 250 m. compuesto por rocas piroclásticas del Grupo Managua.

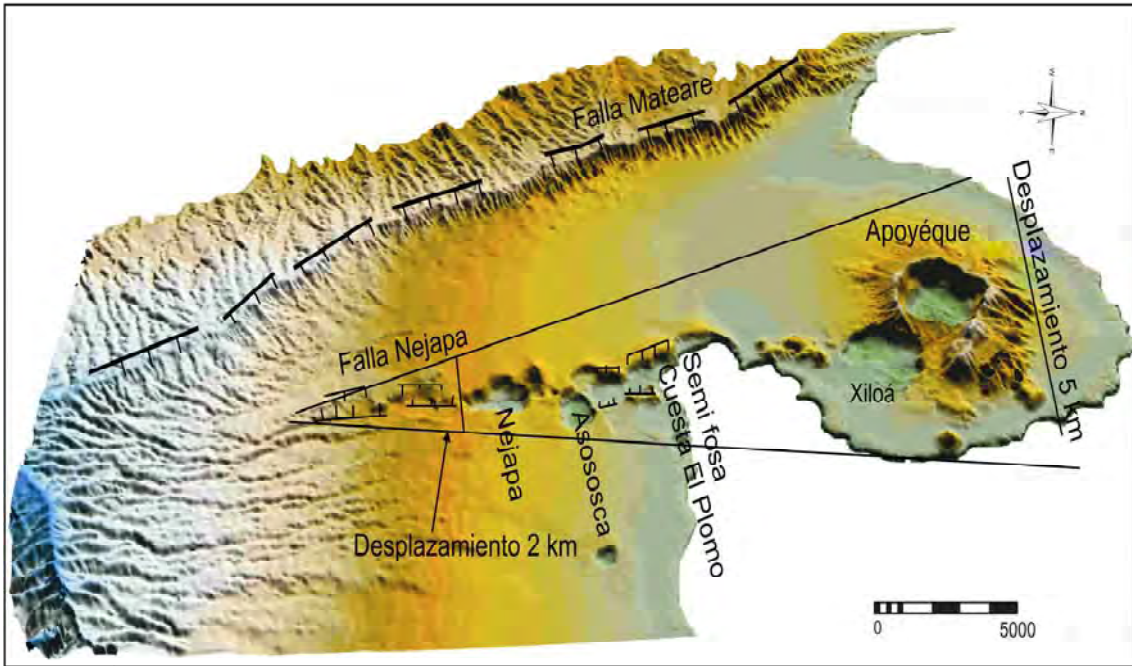


Figura 29. Modelo tridimensional de relieve del área de estudio con un ángulo de inclinación de 40° y una rotación de 260°. Falla Mateare caracterizada por su expresión morfológica, y la Falla Nejapa caracterizada por albergar estructuras volcánicas, con un desplazamiento mayor de 5 km en la parte norte.

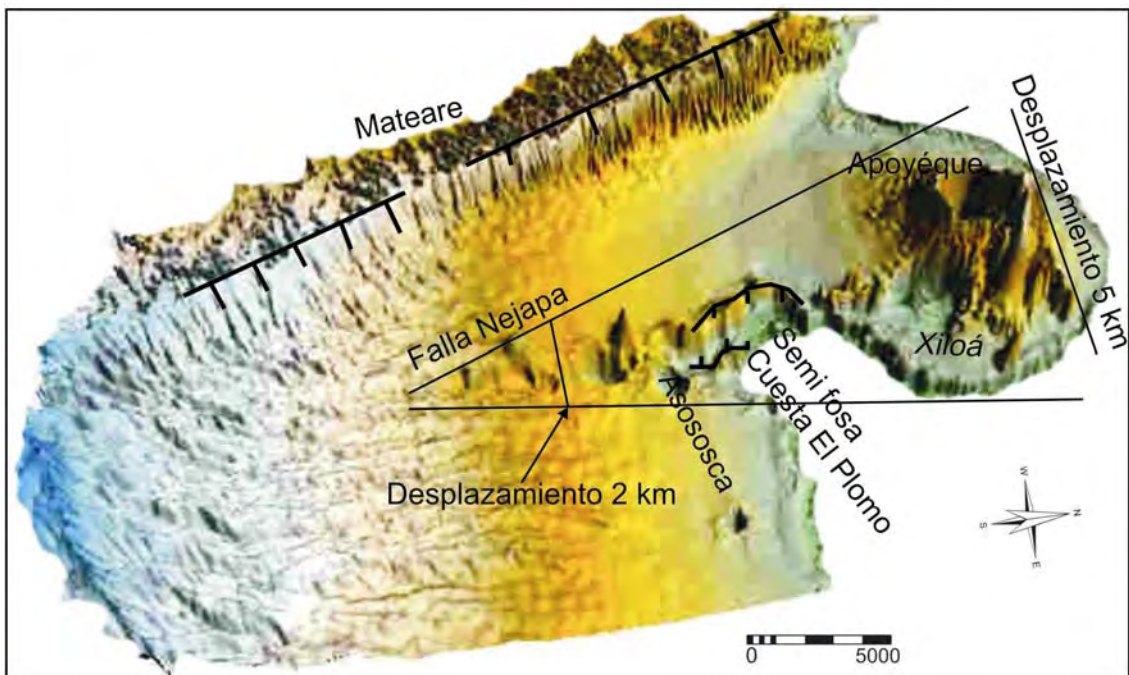


Figura 30. Modelo tridimensional de relieve del área de estudio con un ángulo de inclinación de 80° y rotación de 280°. Se observa la Falla Nejapa con un desplazamiento menor hacia el sur. En la parte centra la Semi fosa Cuesta el Plomo.

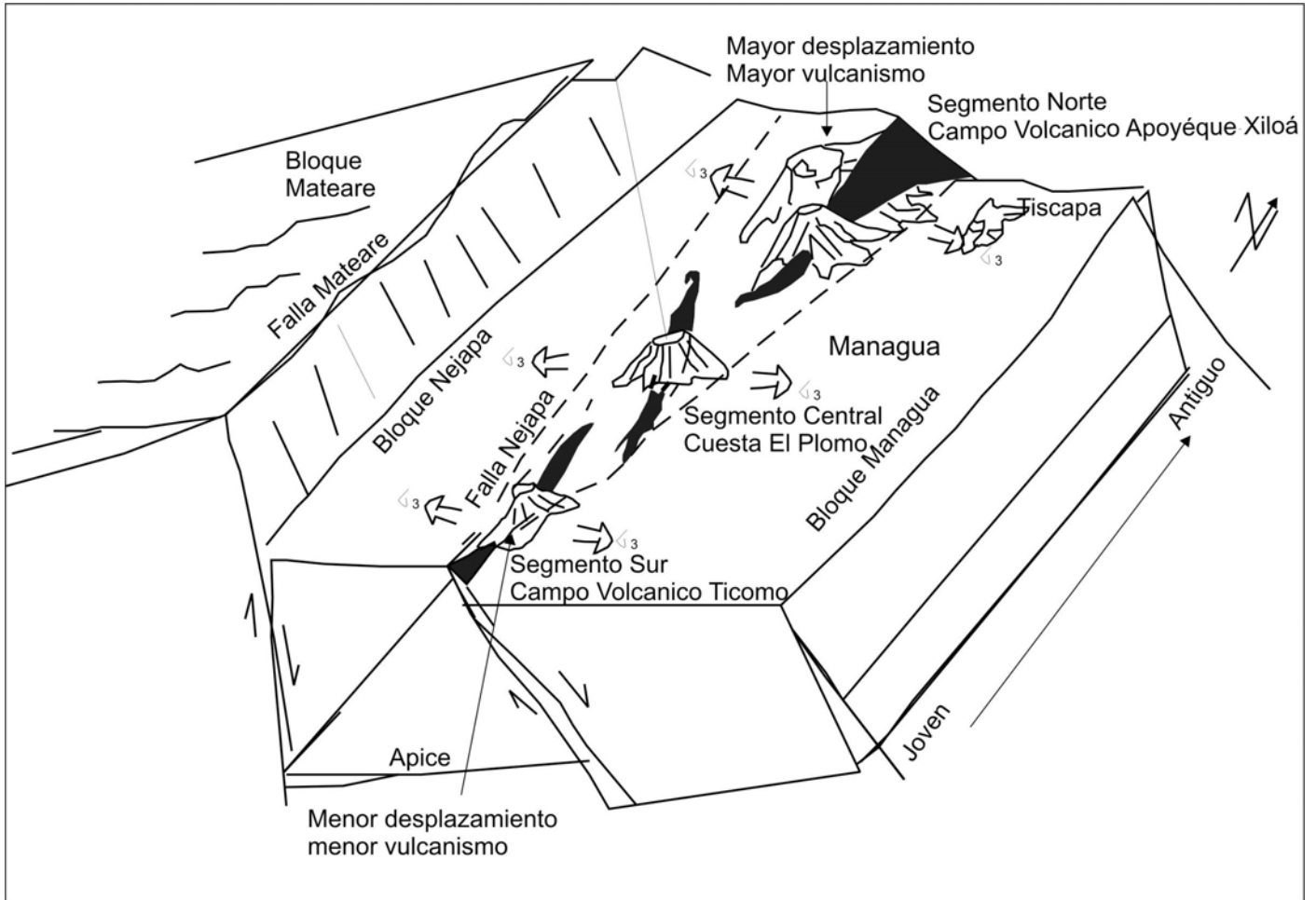


Figura 31. Modelo tridimensional del área de estudio que muestra el escalonamiento en bloques hacia el oeste, separados por las Fallas Mateare caracterizada por su expresión morfológica y la Falla Nejapa por albergar estructuras volcánicas y su geometría en **échelon**

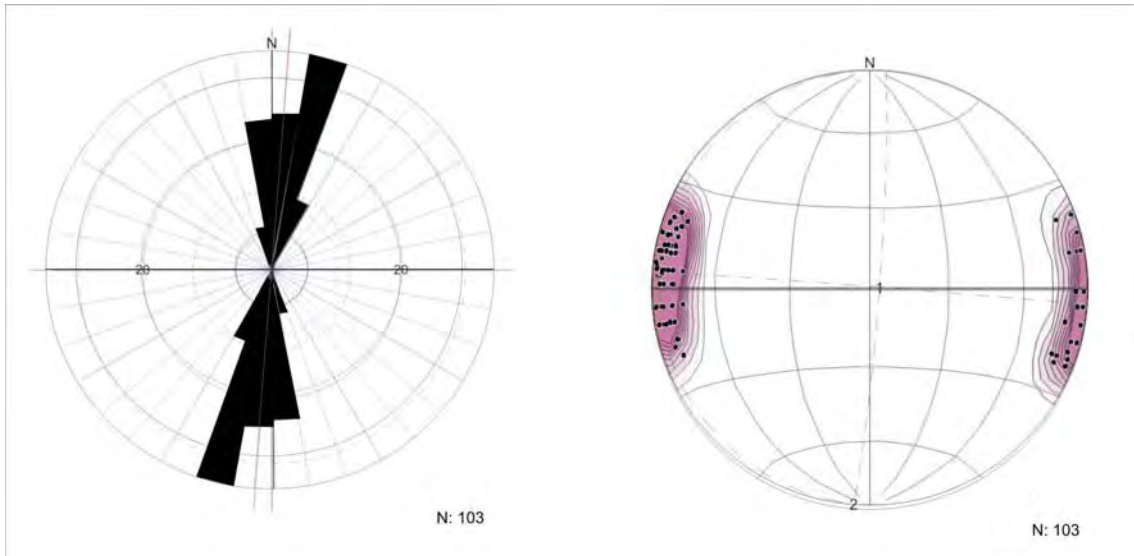


Figura 32. La roseta de fracturas muestran una dirección de N5°E para la Falla Nejava

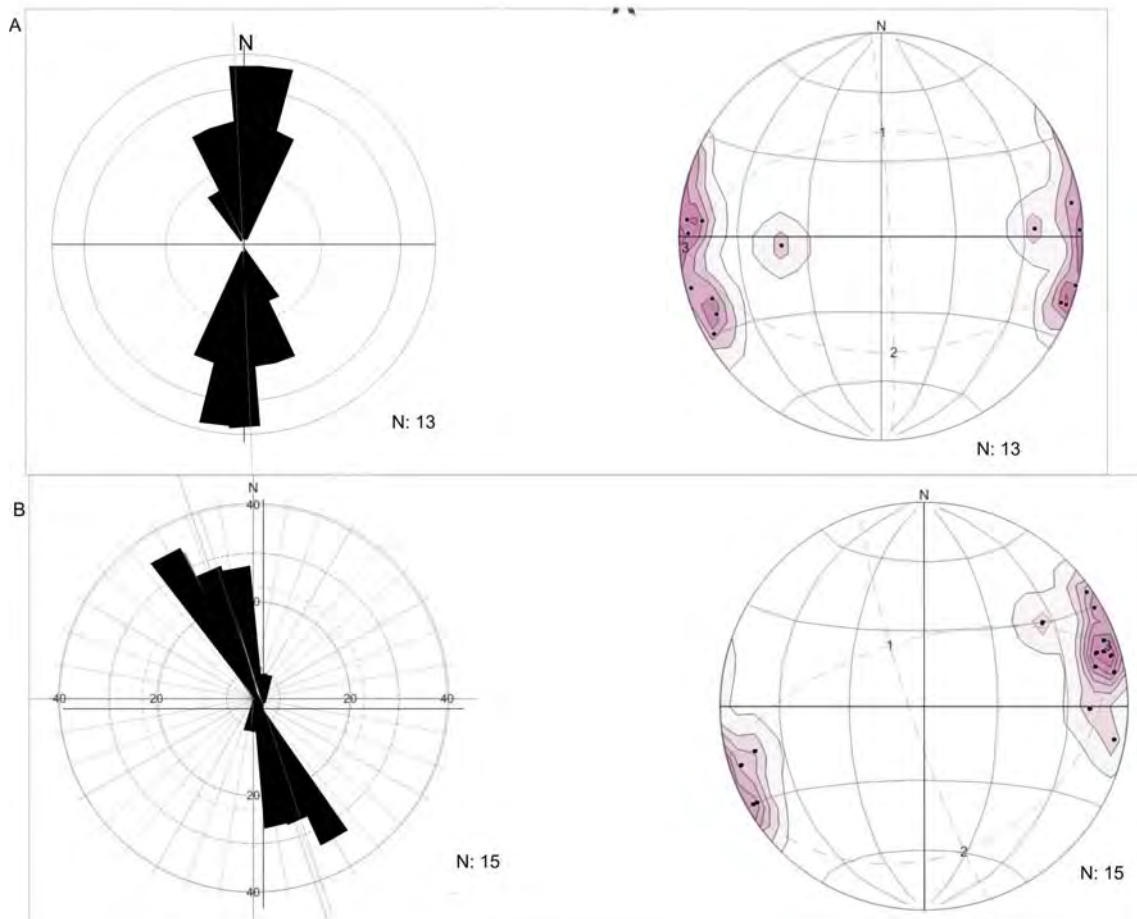


Figura 33. A) Los esterogramas muestran la dirección de las Fallas Cuesta El Plomo. B) Dirección de las fallas antitéticas que conforman la Semifosa-Cuesta El Plomo (Segmento Central).

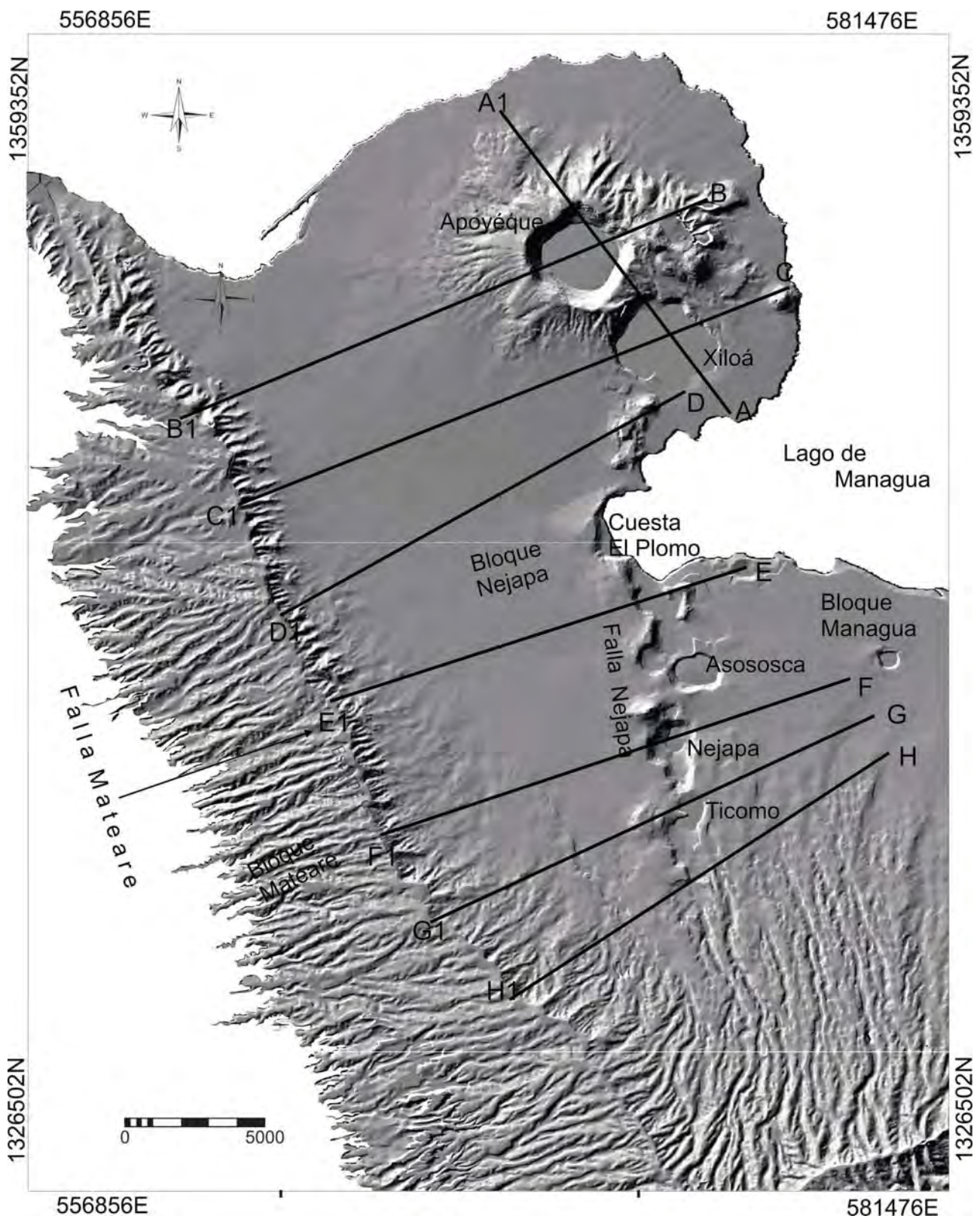


Figura 34. Mapas que muestra las secciones realizadas en la zona de estudio que tienen una dirección perpendicular a las estructuras volcánicas.

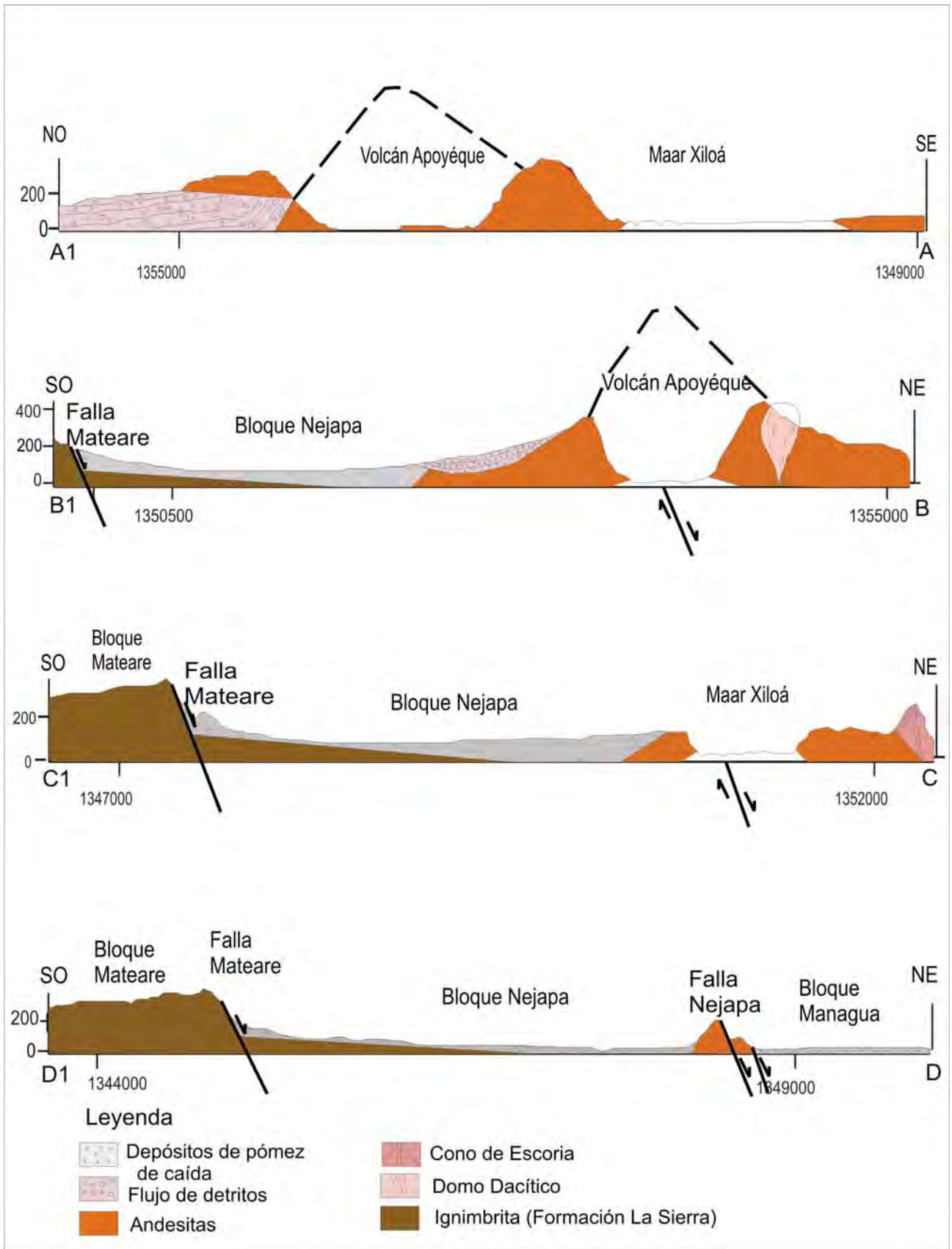


Figura 35. Se observa la estratigrafía del Grupo Managua y el escalonamiento en bloque hacia el este.

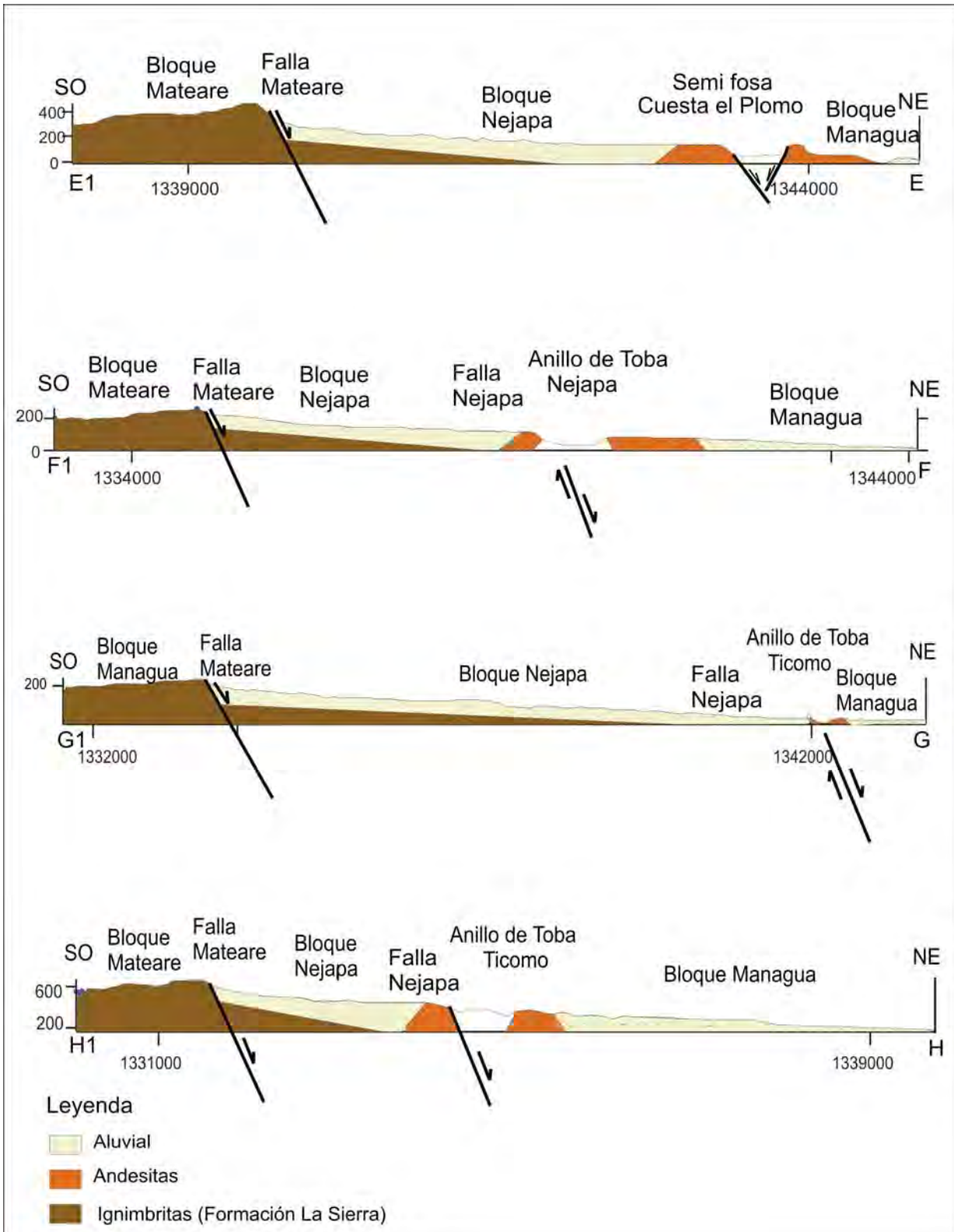


Figura 36. Se aprecian los bloques Mateare, Nejapa, Managua y la Semi-fosa Cuesta El Plomo.

5.8. Sismicidad de la zona de estudio

La actividad sísmica completa de Nicaragua ha sido estudiada a través de una base de datos que comprende el periodo de 1975 a 1982, y la dividen en cuatro grupos principales: 1) áreas intraplaca de baja sismicidad, que cubren la mayor parte de los países de Centroamérica, excepto la región pacífica costera. En este grupo los sismos constituyen los menos intensos y de profundidades variables. 2) actividad sísmica asociada a la cadena volcánica de Nicaragua, con sismos de profundidad inferior a los 40 km. 3) sismos de profundidad intermedia (40-120 km) relacionados a la subducción de la placa de Cocos en el pacífico y se localizan entre la trinchera y la costa del Pacífico de Nicaragua, y 4) sismos profundos de mas de 120 km de profundidad. La distribución de estos sismos muestra claramente una distribución paralela a la línea de costa (**Fig. 37**).

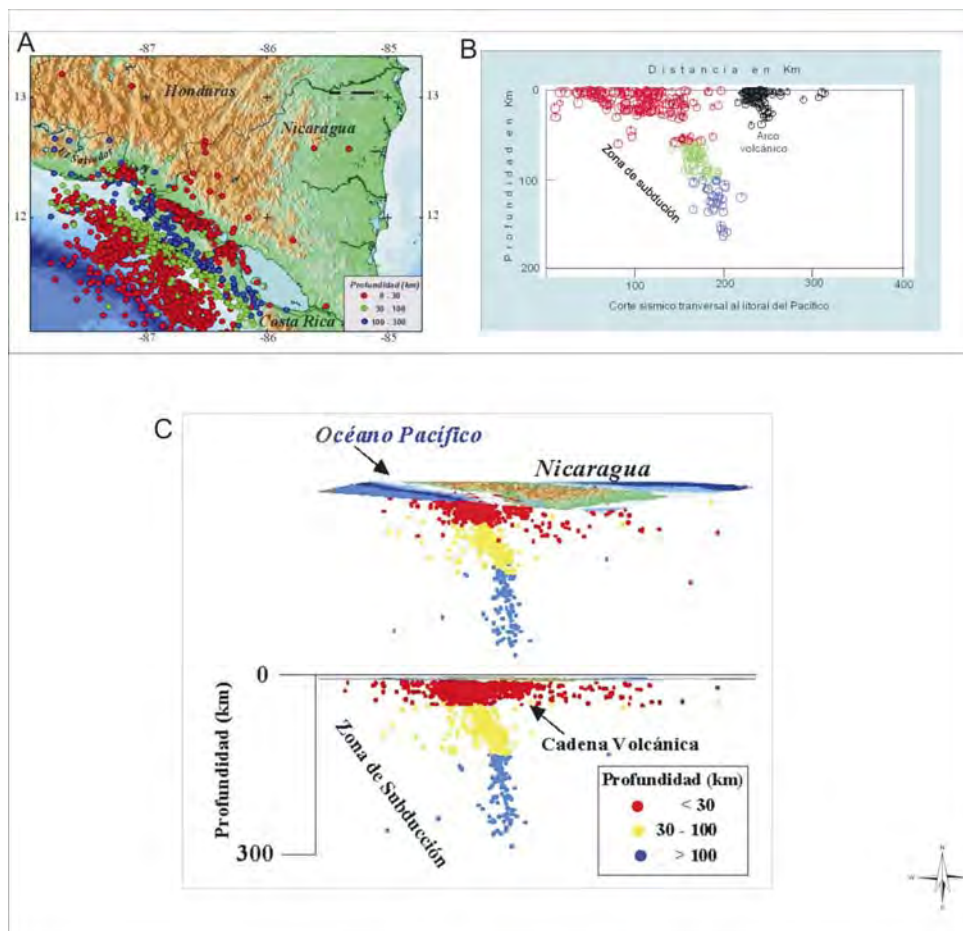


Figura 37. A) Mapa de epicentros de Nicaragua. B) Corte sísmico que señala la distancia en Km de la zona de subducción al arco volcánico. C) profundidad de los diferentes sismos, INETER (2000).

La sismicidad en el área de Managua es dominada por bajos eventos sísmicos a lo largo de la zona volcánica de Nicaragua. La mayor concentración de eventos sísmicos en la región coincide con los ejes de los centros volcánicos como, los volcanes Concepción, Masaya, Apoyéque y Momotombo.

Los catálogos sísmicos publicados por el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER, 2000) muestran que la Capital Managua han sido afectada por eventos sísmicos con magnitudes de 3.4 en la escala de Richter (White y Harlow, 1993) al que atribuye esta actividad sísmica al arco volcánico y sistemas de fallas que enmarcan el área capitalina.

El mapa de epicentros de la ciudad de Managua, muestra que los sismos se alinean con una dirección casi N-S, paralelos al rumbo de la Falla Nejapa. Además existe una mayor concentración en el segmento norte, propuesto como Segmento Apoyéque-Xiloá (**Fig. 38**).

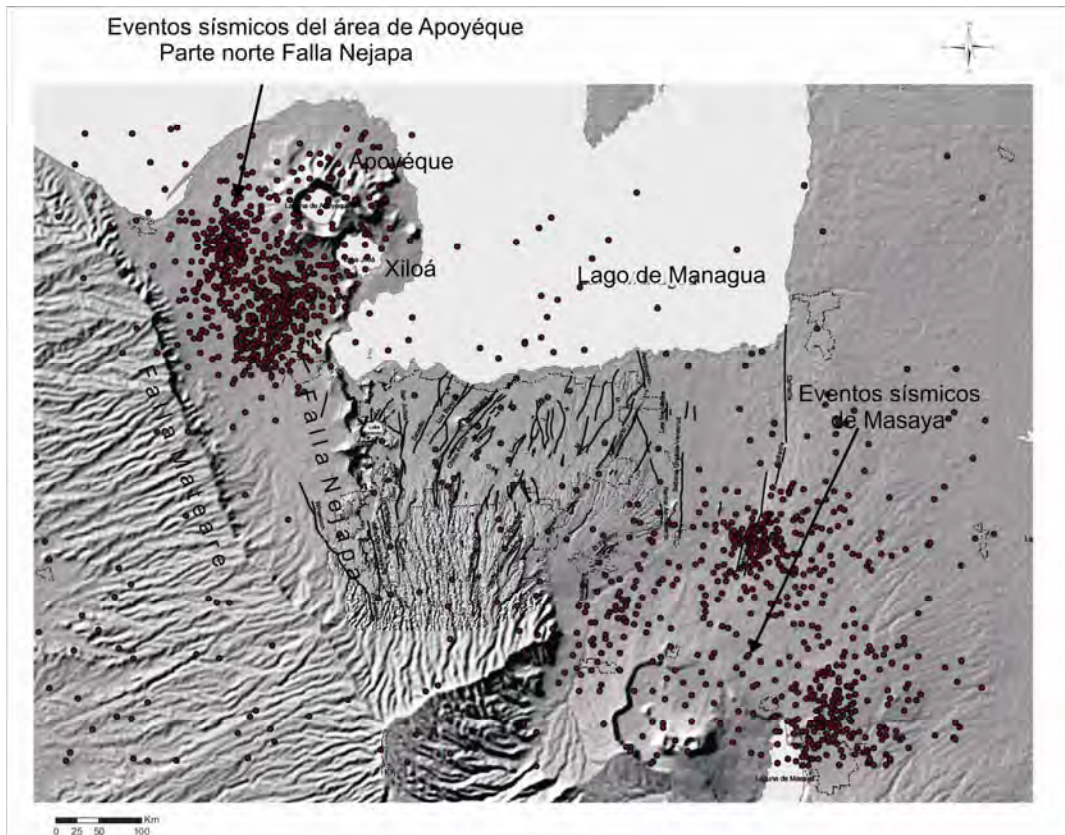


Figura 38. Mapa de epicentro de Managua que muestra la mayor concentración de sismo en la parte norte de la Falla Nejapa, INETER (2000).

5.9. Mecanismos focales

Un mecanismo focal resulta del arribo a superficie de las ondas generadas por sismos o terremotos. La caracterización completa del mecanismo focal de un sismo, provee información como: tiempo de arribo de la onda, localización del epicentro, profundidad del foco, magnitud y orientación espacial de los momentos de tensores mediante el cual podemos resolver la orientación y extensión de la falla. Las ondas emitidas pueden ser modeladas matemáticamente en tres dimensiones por un tensor simétrico, conocido con el nombre de tensor de momento, que puede ser descrito en términos de tres ejes ortogonales: P (presión; eje compresivo), T (tensión) y N (porcentaje de sismos). La orientación y magnitud de estos ejes puede ser resuelto por los datos recopilados de los sismógrafos que captan las ondas.

La figura 39 muestra un diagrama que representa un mecanismo focal donde se presentan dos cuadrantes negros y dos cuadrantes blancos separados por arcos de círculos orientados 90° el uno del otro. Estos círculos representan los planos de la falla donde uno de ellos coincide con la superficie de la falla que generó el sismo. El movimiento de la falla es indicado por una línea que une a los dos puntos en el círculo. Al instante del sismo el movimiento de la onda P a través del material que rodea el foco causa que las partículas en el cuadrante negro se alejen del foco, mientras las partículas en los cuadrantes blancos se desplazan hacia el foco (**Fig. 39, 40**).

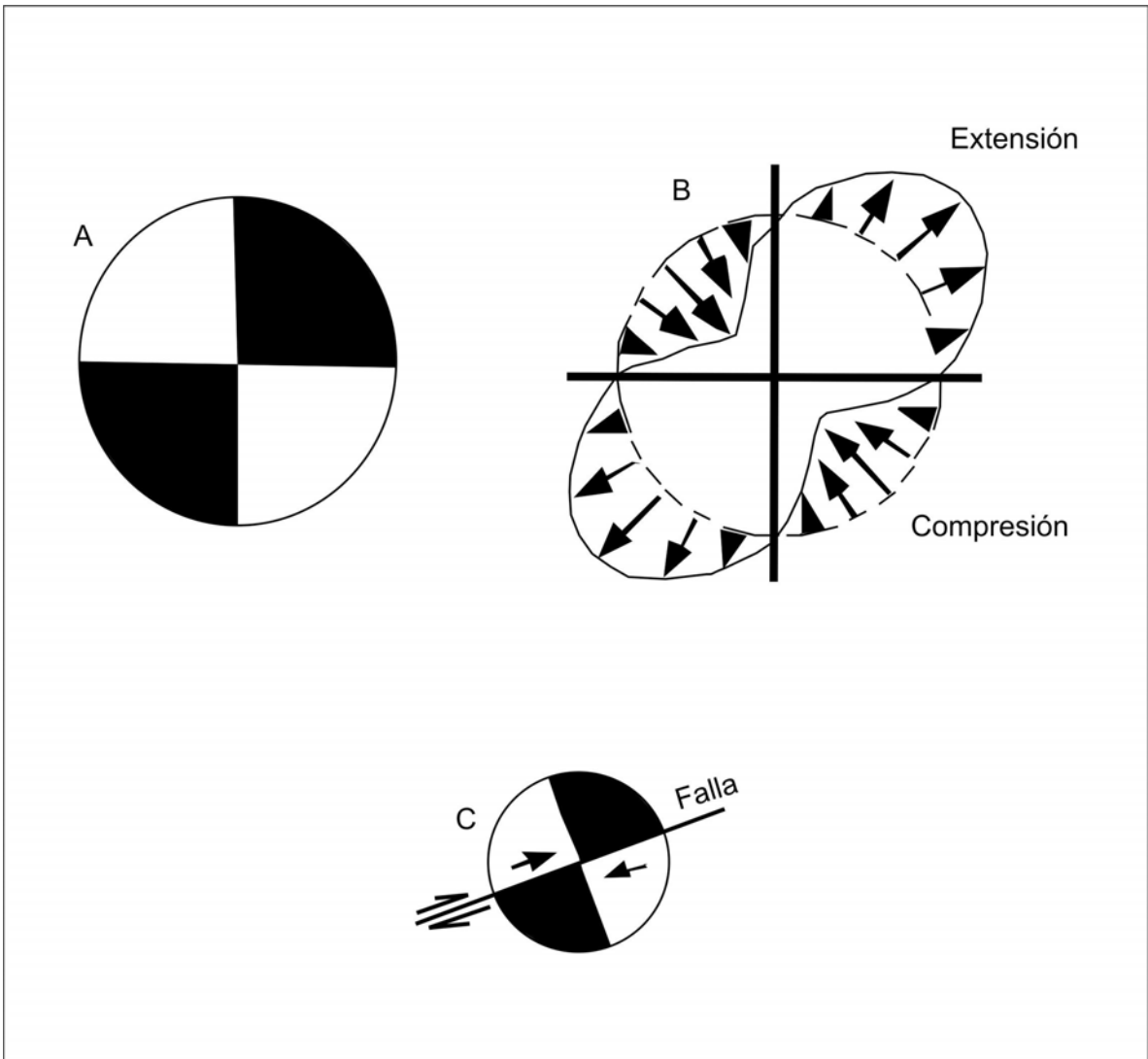


Figura 39. A) Mecanismo focal, el cual representa una falla lateral derecha. B y C) Las flechas indican la dirección de compresión en los cuadrantes blancos y extensión en los cuadrantes negros (Vincent, S., 2004).

Diagrama de Mecanismos Focales

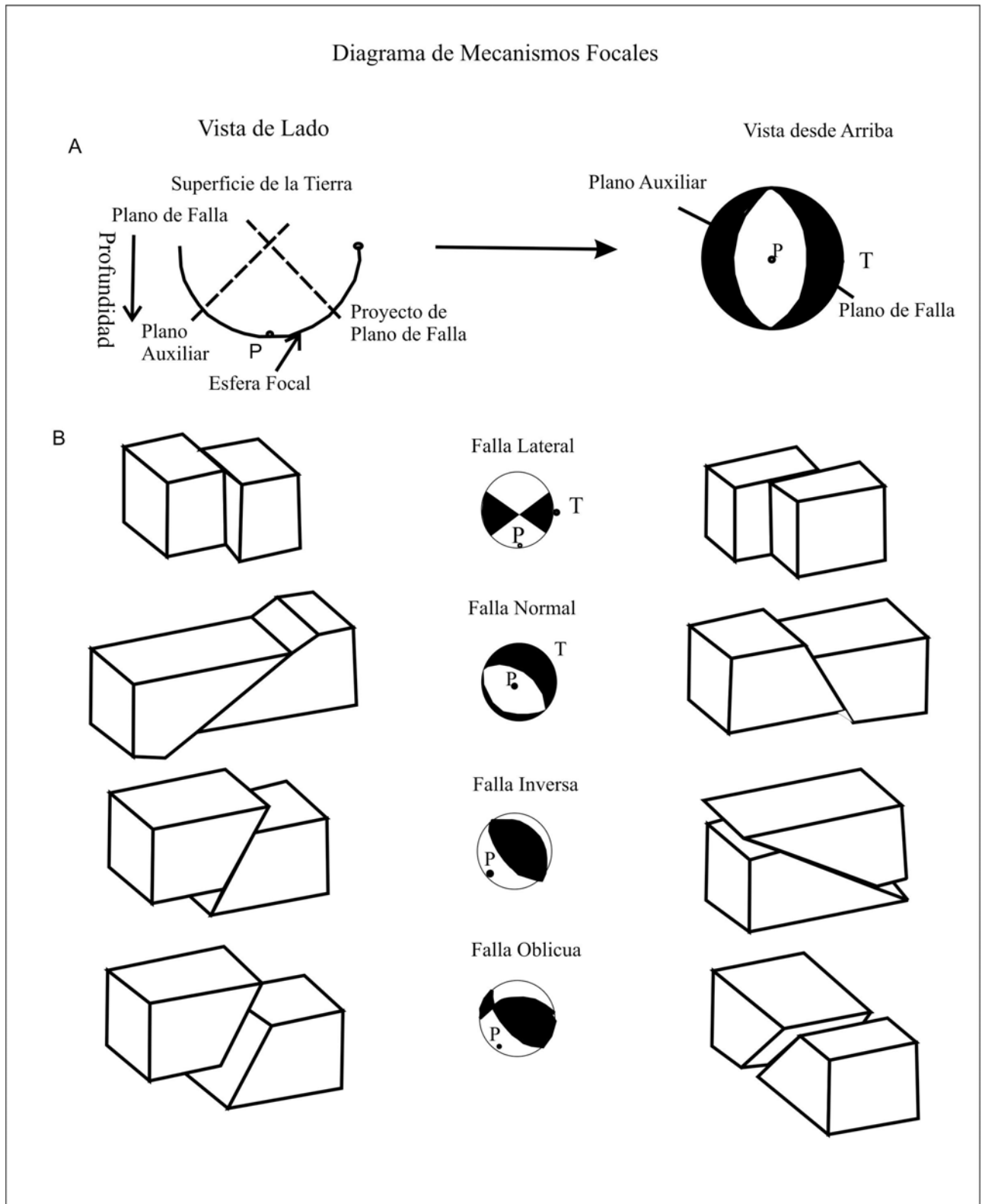


Figura 40. A) Planos auxiliares y de falla, indican la orientación del campo de esfuerzo al momento de la ruptura que se proyecta sobre el plano de falla, donde la onda P indica compresión y T extensión. B) movimiento de los tipos de fallas y su representación en la esfera focal (Vincent , 2004).

En lo que concierne a Nicaragua se han hecho interpretaciones de mecanismos focales obtenidos a lo largo de la depresión nicaragüense y en específico en Managua (Redondo et al., 1993). Estos mecanismos focales se han agrupado en tres categorías. El primer grupo incluye 46 mecanismos focales para Managua. El segundo grupo representa 49 mecanismos focales obtenidos de las diferentes partes de la depresión. El tercer grupo contiene 7 mecanismos focales obtenidos de eventos profundos relacionados con la subducción de la placa (**Fig. 41**).

El primer grupo de mecanismos focales, correspondiente al área de Managua, ha sido agrupado en siete diferentes concentraciones de epicentros como son: Centro Volcánico Momotombo, Lago de Managua, Estructura Volcánica Apoyéque, Falla Tiscapa, Zona de Falla Cofradía y Lago de Masaya. De esto los mecanismos focales que nos interesan son los del volcán Apoyéque que son del tipo lateral y otros oblicuos. Los cuadros blancos indican la zona de compresión en dirección N-S, con un esfuerzo principal máximo paralelo al rumbo de la falla, los cuadros negros indican la zona de extensión en dirección E-O y con un esfuerzo principal mínimo perpendicular al rumbo de la falla y paralelo al eje de los colapsos de los conos emplazados en la falla. Estos resultados coinciden con el movimiento de la Falla Nejapa. El mismo comportamiento presentan los mecanismo focales de otras áreas de Managua con excepción de dos mecanismos focales ubicados al SO de Apoyéque que presentan movimiento inverso, probablemente producto de la subducción de la placa en zonas profundas donde rigen zonas de compresión el NE-SO (Ward et al.,1974).

Los mecanismos focales correspondientes al segundo grupo obtenidos en la Depresión de Nicaragua, indican un movimiento oblicuo con una componente normal. Estos resultados coinciden con la tectónica general de la región, son producidos por la rotación del bloque como una repuesta a la dirección NE-SO a la subducción.

El tercer grupo de mecanismos focales corresponden a la subducción en partes profundas con un movimiento oblicuo con componente lateral. Esto contrasta con lo esperado ya que a estas profundidades se esperarían mecanismos focales inversos. Esto puede ser explicado por un cambio en el ángulo de subducción de la placa en profundidades intermedias donde las partes profundas son estacionarias (Ward et al.,1974).

Para comprobar la dirección de extensión y compresión que muestran los mecanismos focales de la ciudad de Managua, se utilizó el método de los diedros rectos. Este método fue desarrollado por Pergoraro (1972) y consiste en un método gráfico basado en el uso del plano axial que define los diedros de compresión y extensión de un sistema de falla. El plano auxiliar es perpendicular al plano de falla y su polo es el pitch. Sobre poniendo cada diedro se obtiene las direcciones de extensión o compresión total de los mecanismo focales. Para este análisis se graficaron los datos del plano principal y auxiliar de cada mecanismo focal y se obtuvo una dirección de extensión y compresión. La dirección de extensión es colocada en color negro mientras que la de compresión en color blanco (ver figura 43). La dirección de extensión obtenida es E-O perpendicular al rumbo de la falla que es N-S, lo cual coincide con el análisis estructural de la falla y los mecanismos obtenidos del área de estudio (**Fig. 41**).

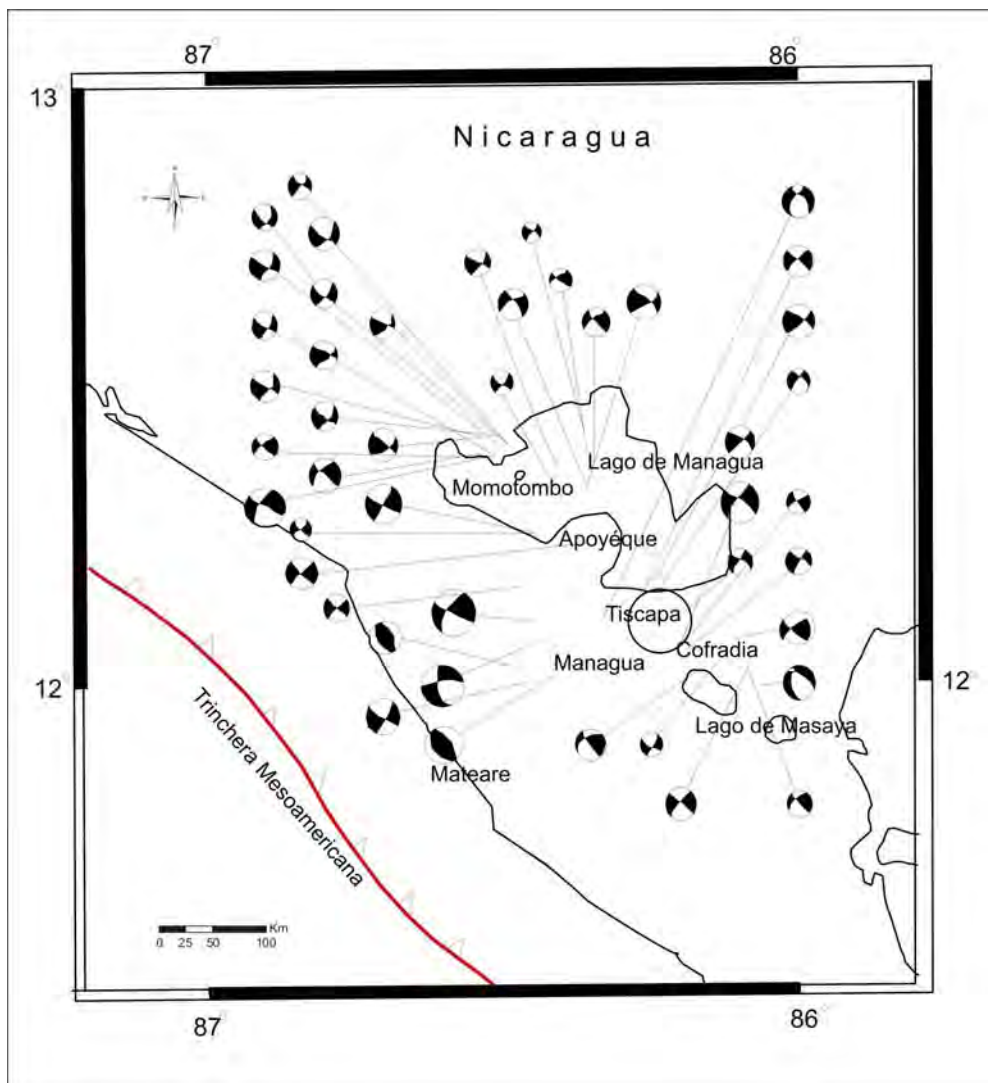


Figura 41. Distribución de los siete grupos de mecanismos focales en la ciudad de Managua-Nicaragua, (Redondo et al., 1993).

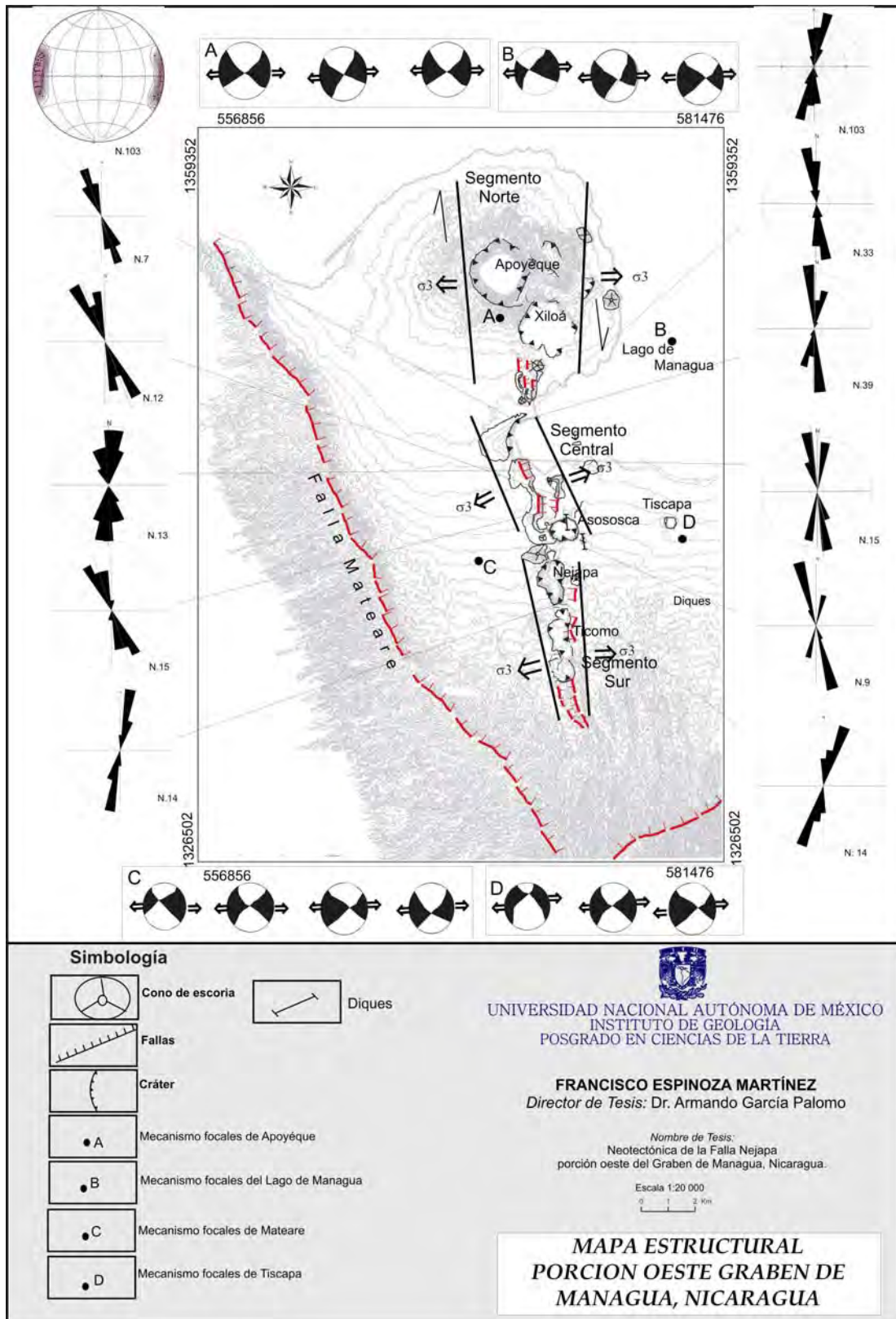


Figura 42. Mapa estructural del área de estudio, con el análisis de las rosetas de fractura que muestran una dirección preferencial N-S de la Falla Nejapa, lo que coincide con los mecanismo focales de la zona con una extensión E-W.

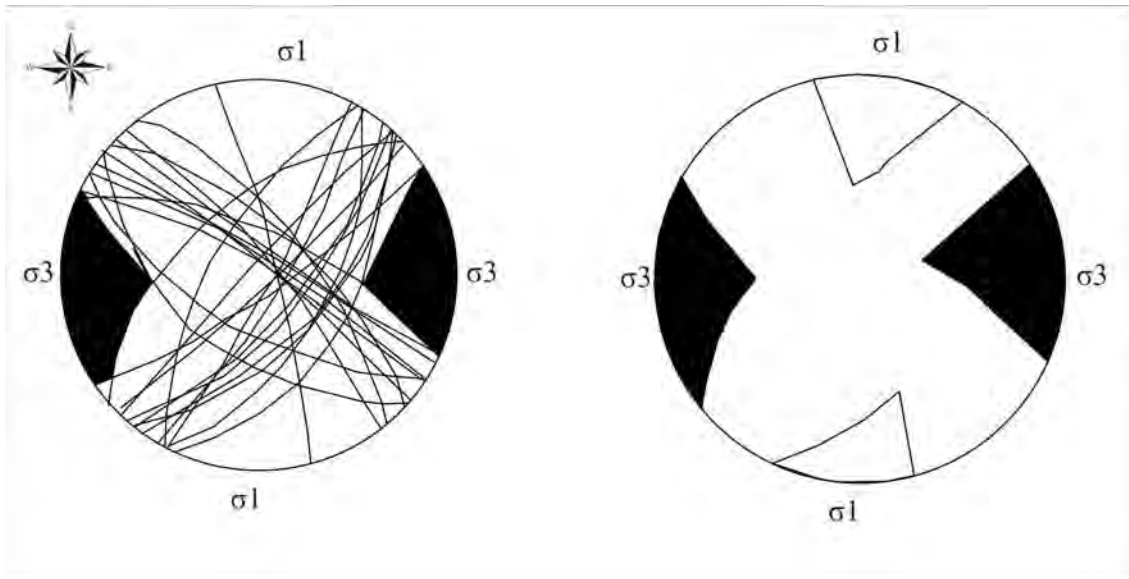


Figura 43: Método de los diedros rectos donde se observa el grado de extensión marcado en color negro.

Capítulo 6

Interpretación

La Fosa de Managua está delimitada por una serie de fallas en dirección NO-SE y es tectónicamente activa. El origen de esta estructura ha sido materia de controversia, ya que se ha considerado como una fosa tectónica (McBirney y Williams, 1965) o bien, como una estructura tipo *pull-apart* (Frischbutter, 2002). Aunque no se pretende debatir acerca del origen de la fosa, este análisis aporta nuevos datos para entender el comportamiento cinemático y dinámico de una de las fallas que constituyen a esta estructura, la Falla Nejapa. Tectónicamente esta fosa se encuentra dentro de la Cadena Volcánica Nicaragüense, la cual se origina por la subducción de la Placa de Cocos debajo de la Placa del Caribe a una distancia aproximada de 200 km de la trinchera. Esta cadena está formada por un frente volcánico constituido por una orientación general NO-SE pero dividida en dos importantes zonas. Una conformada por los volcanes Concepción, Madera, Mombacho y Masaya; y la otra constituida por los volcanes Momotombo, Momotombito, El Hoyo, Cerro Negro, Telica, San Cristóbal y Cosíguina. La geometría de la zona de subducción de la Placa de Cocos en esta región tienen importantes implicaciones estructurales y volcánicas. Por un lado el frente volcánico se caracteriza por una segmentación definida por el alejamiento del segmento volcánico Concepción-Masaya con respecto al Momotombo-Cosíguina. Esta separación se acomoda a través de grietas de tensión, perpendiculares al frente volcánico y sobre la cual se emplazan conos volcánicos pequeños (Smicke, 2004). (**Fig. 44**). Por otro lado, la subducción oblicua de la placa de Cocos por debajo de la placa Caribe, se lleva a cabo con un azimut oblicuo aproximado de 15° entre las coordenadas 86° O y 12° N (Bullard, 1965; Manton, 1987; La Femina et al, 2002) con un ángulo de inclinación de 25° en la parte superficial y de 84° a profundidades mayores a los 100 km (Brown et al., 1973; Molnar y Stykes, 1969; White, 1991). Esta subducción oblicua genera que la deformación se acomode en el frente volcánico mediante fallas laterales derechas (Stoiber y Carr, 1973) (**Fig. 45**).

Por lo tanto y de acuerdo a este escenario la Falla Nejapa se encuentra dentro de la separación del frente volcánico, cuyas dimensiones son aproximadamente de 15 km. La falla Nejapa presenta una geometría en **échelon** derecha con zonas de relevo de 0.8 km en la parte sur y 0.9 km en la parte norte. Tiene una dirección general N-S y

longitud de 24 km, con un ángulo de apertura de 20° aproximadamente, localizándose su ápice en la parte sur en Ticomo y la mayor apertura en la parte norte en Apoyéque-Xiloá. El análisis cinemático indica que esta estructura se formó bajo un régimen de esfuerzos diferentes: En el Segmentos Norte con una dirección E-O, en el Segmento Central N75°E y para el Segmento Sur N80°E (**Tabla.3**). Esta dirección de extensión es compatible con la deformación oblicua que esta afectando a esta parte del frente volcánico. El arreglo en **échelon** de la Falla Nejapa indica que está constituido por fallas o fracturas coalescentes y activas (**Fig.45**).

Parámetros	Segmento Norte	Segmento Central	Segmento Sur
Fallas	E-O	N75°E	N80°E
Mecanismo Focales	E-O	E-O	-
Diques	-	E-O	-
Elongación de conos	N5°O	N5°O	N5°O
Colapso de conos	E-O	E-O	-

Tabla 3. Datos que indican la dirección de extensión de la Falla Nejapa, porción oeste de la fosa de Managua.

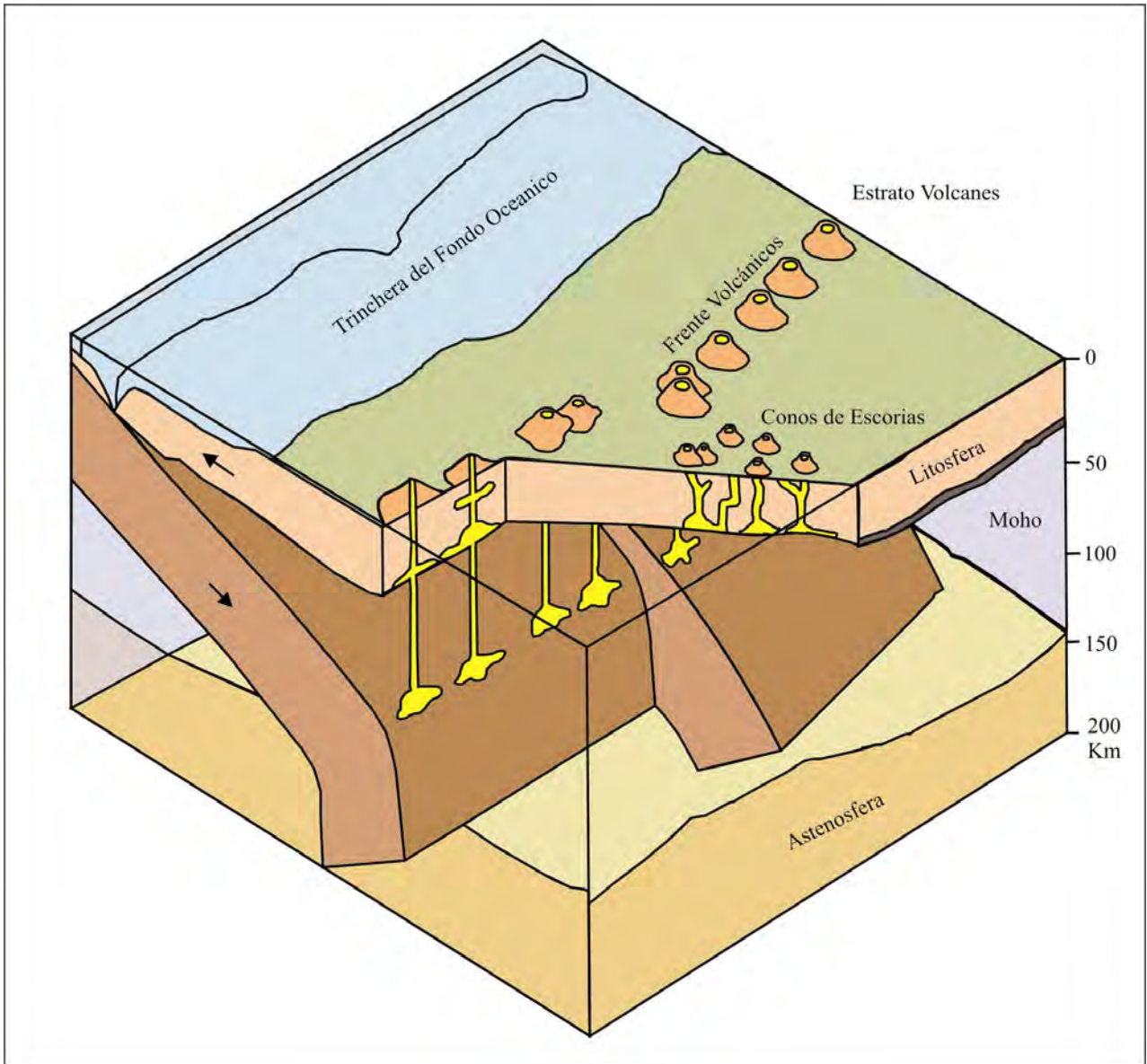


Figura 44. Segmentos de frentes volcánicos con zonas de relevos ocupados por conos de escorias (Schmincke, 2004).

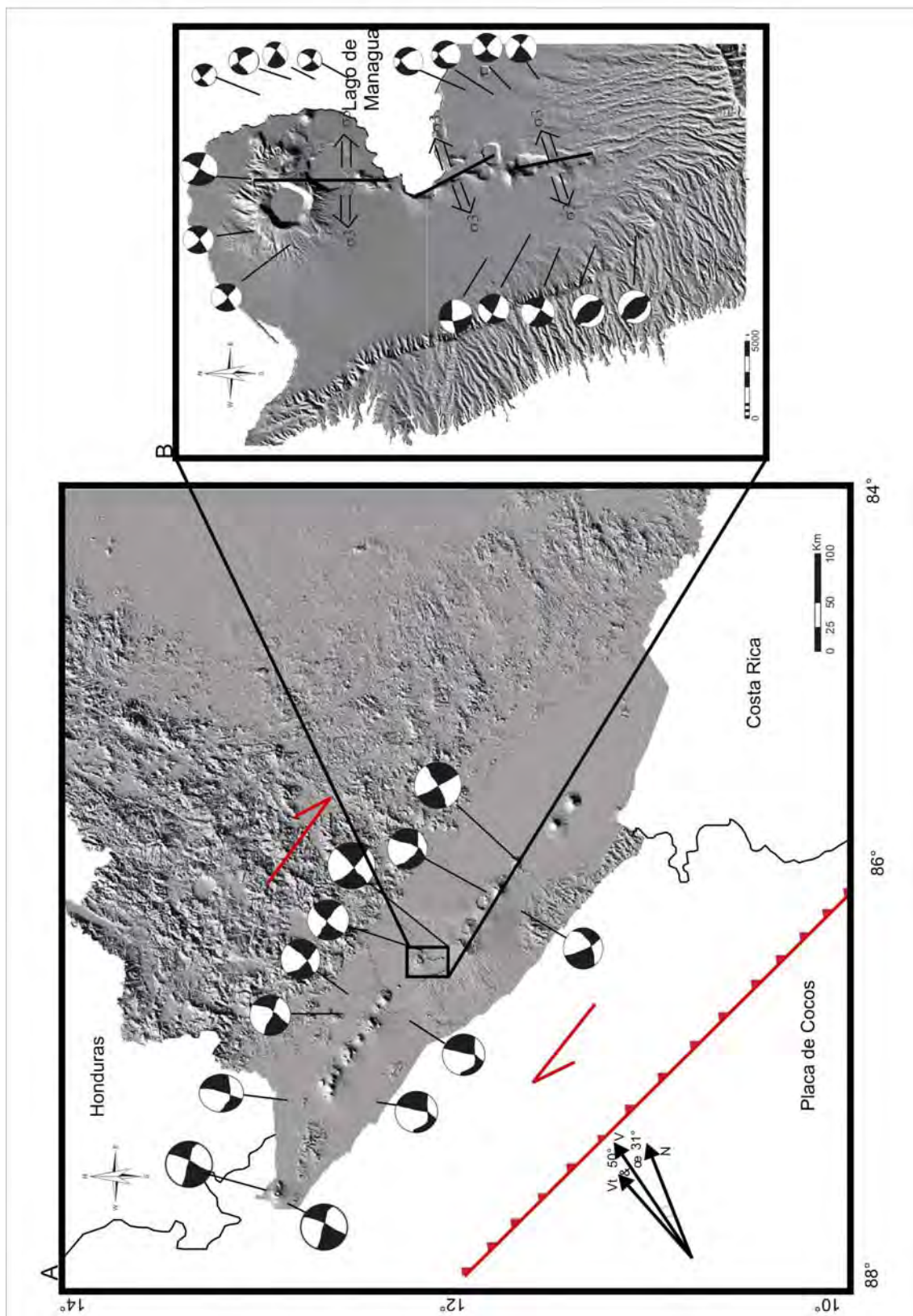


Figura 45. A) Geometría en échelon de la Cadena Volcánica Nicaragüense. B) Zona de relevo donde los mecanismos focales indica una extensión E-W del área de estudio.

Capítulo 7

Conclusiones y recomendaciones

- Se determinó el lineamiento de 25 estructuras volcánicas monogenéticas y un volcán compuesto emplazados en la Falla Nejapa, siendo los productos de esta estructura los que conforman la estratigrafía del Grupo Managua.

- Se identificó y estudió a detalle la cinemática de la Falla Nejapa y las estructuras emplazadas en ella.

- Se identificaron colapsos de conos de escorias en dirección E-O perpendicular al rumbo de la Falla Nejapa que emplaza estas estructuras con dirección N-S. Lo que implica que la zona de estudio está afectada por una extensión hacia el E-O.

- Basado en el comportamiento de las curvas de nivel se distinguieron tres zonas de gran relevancia como son: curvas poco espaciadas y alargadas con dirección N-S, curvas de nivel cerradas y discontinuas formando pequeñas estructuras circulares alineadas en dirección N-S y curvas de nivel muy espaciadas y de poca elevación.

- Con base en el mapa tridimensional se explica que la zona de estudio presenta un escalonamiento en bloques hacia el este, denominados Mateare, Nejapa y Managua.

- De acuerdo con 46 mecanismos focales obtenidos de los sismos ocurridos en Managua, colapso de estructuras y diques orientados N-S, se demuestra que la zona de estudio está expuesta a un régimen extensivo E-O y una compresión N-S.

- El hecho que se hayan emplazado 25 estructuras volcánicas jóvenes sobre la Falla Nejapa, así como datos de alta sismicidad indican que la zona es tectónicamente y volcánicamente activa. Por lo que desde el punto de vista de peligro y riesgo se debe de tomar en cuenta para el desarrollo urbano.

En este análisis se consideró que la Falla Nejapa es una falla normal con un componente lateral derecho, con dirección N-S, longitud de 24 km y un ancho de 2 km en su extremo sur y de 5 km en su extremo norte con un ángulo de apertura aproximado de 20°. Se encuentra limitada al oeste por el bloque Mateare y al este por el bloque Managua conformado por una serie de fallas de dirección N-S.

Dentro de la zona de estudio se ubica la semifosa tectónica Cuesta El Plomo con dirección N-S delimitada por fallas antitéticas que buzcan hacia el SO, tiene una longitud de 2.0 km y un ancho de 0.8 km y asociada a esta se encuentra enjambre sísmico.

Recomendaciones

- Realizar un análisis estructural detallado en cada uno de los segmentos de la Falla Nejapa.

- hacer trincheras perpendiculares sobre cada uno de los segmentos de la Falla Nejapa.

- Se propone la realización de estudios geofísicos (sobre la Falla Nejapa) a detalle como, sondeos eléctricos verticales y georadar para determinar con exactitud profundidad de la falla.

- Hacer un análisis de tiempos de recurrencia para determinar la edad de la Falla Nejapa.

- Se propone la realización de un plan de ordenamiento territorial para evitar el crecimiento urbano sobre la Falla Nejapa, con el fin de evitar muertes y daños a la infraestructura ante cualquier eventualidad sísmica ocasionada por esta.

- Realizar dataciones radiométricas en cada una de las estructuras volcánicas que se emplazan sobre la Falla Nejapa.

Bibliografía

- Barka, A. and Kadinsky-Cade, K., 1988. Strike-slip geometry in Turkey and its influence on earthquake activity. *Tectonics* 7, 663-684.

- Bice, D. C., 1980a. Eruption rate in Central America estimated from volumes of pumice deposits: *American Geophysical Union Transactions*, v. 61, no. 6, p. 70.

- Bice, D. C., 1980b. Origin of the Masaya Caldera, Nicaragua: *Geological Society of America Abstracts with Programs*, v. 12, no. 3, p. 98.

- Bice, D. C., 1980c. Tephra stratigraphy and physical aspects of recent volcanism near Managua, Nicaragua {Ph.D. Thesis}: Berkeley, California, University of California, 422 p.

- Bice, D. C., 1983. Comment on "Plinian airfall deposits of basaltic composition": *Geology*, v. 11, p. 34-92.

- Bice, D. C., 1985. Quaternary volcanic stratigraphy of Managua, Nicaragua: Correlation and source assignment for multiple overlapping plinian deposits: *Geological Society of America Bulletin*, v. 96, p. 553-566.

- Brown, Jr., R.D., Ward, P.L. and Plafker, G., 1973. Geologic and seismologic aspects of the Managua, Nicaragua, earthquakes of December 23, 1972. *Geol. Surv. Prof. Pap.* 838. 34 pp.

- Burri, C. and Sonder, R. A., 1936. Beitrage zur Geologie and Petrographie des jungtertiären and rezenten vulcanismus in Nicaragua. *Zeitschrift für Vulkanologie*, Bd. 17, p. 34-92.

- Bullard, E.C., Everett, J.E. and Smith, A.G., 1965. The fit of the continents around the Atlantic; A symposium on continental drift, *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, A258, 41-51.

- Burbach, G. V., Frohlich, C., Pennington, W.D. and Matumoto, T., 1984. Seismicity and tectonics of the subducted Cocos plate, *J. Geophys. Res.*, 89, 7719-7735.

- Carr, M. and Stoiber, R., 1977. Geological setting of some destructive earthquake in Central America. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 88, 151-156.

- Case, J.E., Holcombe, T.L. and Martin, R.G., 1984. Map of geological provinces in the Caribbean region, in *The Caribbean-South American Plate Boundary and Regional tectonics*, eds Bonini W.E., Hargraves, R.B & Shagam, R., *Geol. Soc. Am. Mem.*, 162, 1-30.

- Cesar R, R.V. and Ernst F., 2000. A cross section of the convergent Pacific margin of Nicaragua: Institute for Geophysics, v. 19, p. 335-357.

- Connor, C.B. and Hill, B.E., 1995. Three nonhomogeneous poisson model for the probability of basaltic volcanism: application to the Yucca Muntain region, Nevada, U.S.A.

- Dames and Moore-LAMSA., 1978. Estudio geológico de las ciudades del sistema metropolitano: Managua, Nicaragua, Vice Ministerio de Planificación Urbana, 143 p

- Dengo, G., 1969. Problems of tectonic relations between Central America and the Caribbean, *Trans, Gulf Coast Assoc. geol.Soc.*, 29, 311-320.

- Dengo, G., 1973. Estructuras geológicas, historia tectónica y morfología de América Central: Guatemala, Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnológica Industrial.

- Di Marco, G., 1995. Late Cretaceous-early Tertiary paleomagnetic data and a revised tectono-stratigraphic subdivision Of Costa Rica and western Panama, *Geol. Soc. Am. Spec. Publ.*, 295, 1-27.

- Duncan, R.A. and Hargraves, R.B., 1984. Plate tectonic evolution of the Caribbean region in the mantle reference frame, in *The Caribbean-South American Plate Boundary and Regional tectonics*, eds Bonini W.E., Hargraves, R.B & Shagam, R., *Geol. Soc. Am. Mem.*, 162, 81-84.

- Elming, S.A., Layer, P. and Ubieta, K., 2001. A palaeomagnetic study and age determination of Tertiary rocks in Nicaragua, Central America: *Geofisica Internacional*, v. 147, p. 294-309.

- Escalante, G., 1990. The Geology of Southern Central America and western Columbia, in the *Geology of North America*, Vol. H, pp. 201-230, eds Dengo, G. & Case, J.E., GSA.

- Fink, H. J. and Pollard, D., 1983. Structural evidence for dikes beneath silic domes, Medicine Lake Highland volcano, California. *Geology* 11,161-185.

- Frischbutter, A., 2002. Structure of the Managua graben, Nicaragua, from remote sensing images: *Geofisica Internacional*, v. 41, p. 87-102.

- García - Palomo, A., 2002. *Vulcanismo y Geología Estructural de la Región de Apan, Edos. de Hidalgo, Tlaxcala, Puebla y México [Tesis Doctoral thesis]: México, Universidad Nacional Autónoma de México.*

- Guillan Girard, B.V., 2004. The Managua Graben and Las Sierras-Masaya volcanic complex (Nicaragua); Pull-apart localization by and intrusive complex: France, Blaise-Pascal.

- Hernandez, Z., 1994. Seismicity and Tectonics near Managua, Nicaragua: Managua, INETER, p. 1-16.

- Hodgson, G., 1971. Levantamiento geológico de la planicie NW y de la precordillera occidental.

- Hodgson, V. G., 1978. *Geología de Nicaragua. Servicio Geológico Nacional, Managua, Nicaragua. 105p.*

- Hugh Cowan, C.P., Daniela Pantosti, Paolo de Martini. and Wilfried Strauch, 2002. Late Holocene Earthquakes on the Aeropuerto Fault, Managua, Nicaragua: *Sismological Society of America*, v. 92, p. 1694-1707.

- INETER., 1988. Topographic map series, scale 1: 50.000, Managua- Nicaragua.

- INETER., 2000. Boletín de sismos y volcanes de Nicaragua. Julio, p. 29.

- INETER., 2002. Estudio Geológico-estructural de las fallas activas del área de Managua: Nicaragua, Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales.

- Kuang, J., 1971. Estudio Geológico del Pacifico de Nicaragua. División de Geología, Informe 10, Catastro e Inventario de Recursos Naturales. Managua, Nicaragua, 55p.

- Kutterolf, A.F., W. Perez, H. Wehrmann, H. and Schmincke., 2007. Late Pleistocene to Holocene temporal sucesion and magnitudes of highly expositive volcanic eruptions west-central Nicaragua: Journal of volcanology and geothermal research, v. 3659.

- La Femina, P. C., Dixon, T. H. and Strauch, W., 2002. Bookshelf faulting in Nicaragua. Geology 30, 751-754.

- Manton, W., 1987. Tectonic interpretation of the morphology of Honduras: Tectonics, v. 6, p. 633-651.

- Martinez, W., 2003. The interrelationship between volcanic and seismic activity to subduction-related tectonics in Western Nicaragua: Geological Society of Japan, v. 99, p. 185-194.

- McBirney, A. R., 1955a. Thoughts on the eruptions of the Nicaraguan Volcano Las Pilas: Bulletin Volcanology, Series II, v. 17, p. 113-117.

- McBirney, A. R., and Williams, H., 1964. Volcanic history of Nicaragua: University of California Publications in the Geological Sciences, v.55, p. 1-69.

- McBirney, A. R. and Williams, H., 1965. Volcanic history of Nicaragua: University of California Publications in the Geological Sciences, v.55, p. 1-69.

- Molnar, P. and Sykes, L. R., 1969. Tectonics of Caribbean and Middle American regions from focal mechanisms and seismicity, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 80, 1639-1684.

- Morner, N., 1990. Neotectonics and structural geology; general introduction. *Bull. Int. Quat. Ass. Neotect. Comm.* 13, 87.

- Nakamura, K., 1977. Volcanoes possible indicators of tectonic stress orientation : *J. Volcanol. Gheotherm. Res.*, v. 2, p. 1-16.

- Nakamura, K., 1986. Volcanology and the plates tectonics (in Japanese with english abstract): *Bull. Volcanol.* v.10.

- Naturales, C.E.I.d.R., 1973. Tectónica y Sísmica de la Región de Managua: Managua, Ministerio de Economía, Industria y Comercio.

- Obruchev, V., 1948. Osnovnyje certy kinetiki plastiki neotectoniki. *Izv. Akad. Nauk SSSR Ser. Geol.* 5.

- Parsons Corporation., 1972. The geology of western Nicaragua: Nicaragua, Tax Improvement and Natural Resources Inventory Project, Final Technical Report, Volume IV.

- Pergoraro., 1972. Methods of paleostress analisis with fault populations. *Right Dihedral*, <http://wzar.unizar.es/acad/fac/geoestruc/research/paleostress.html>.

- Peraldo, G. and Montero, W., 1999. Sismología histórica de América Central.- 347 Págs. IPGH, México.

- Peter C, L.F., 2002. Bookshelf faulting in Nicaragua: *Geological Society of America*, v. 30, p. 751-754.

- Perez, W. and Freund, A., 2006. The Youngest Highly explosive basaltic eruptions from Masaya Caldera (Nicaragua): Stratigraphy and Hazard assessment. In: W.I. Rose, G. J. S. Bluth, M. J. Carr, J. Ewert, L.C. Patino and J. W. Vallance (Editors), Volcanic hazards in Central America. Geol. Soc. Am. Spec. Publ., pp. 189-2007.

- Pindell, J. and Dewey, J.F., 1982. Permo-Triassic reconstruction of western, Pangea and the evolution of the Gulf of Mexico/Caribbean area, *Tectonics*, 1, 179-212.

- Pindell, J.L., 1985. Alleghenian reconstruction and subsequent evolution of the Gulf of Mexico, Bahamas and Proto-Caribbean Sea, *Tectonics*, 4, 1-39.

- Protti, M., Guendel, F. and McNally, K., 1993. The geometry of the Wadati-Benioff zone under southern Central America and its tectonic significance: results from a high-resolution local seismographic network, *Phys. Earth planet. Inter.*, 84, 271-287.

- Redondo, D., Lindholm, C. and Bungum, H., 1993. Earthquake focal mechanisms in Central America. Report under the project.

- Rodríguez, D., 1989. Estudio geológico-Estructural y de alteraciones hidrotermales del área Mina de Agua – Rincón de García, Nicaragua. Tesis de licenciatura. Escuela Centro-Americana de Costa Rica.

- Sapper, C., 1925. Los volcanes de América Central: Verlag, Halle, Max Niemeyer, 116 p.

- Schmicke., 2004. Volcanism: Germany, Dept. of Volcanology and Petrology GEOMAR. 32/31 41/ LT.

- Segura, F., 1997. Amenaza sísmica para el centro de la ciudad de Managua, Nicaragua: México, Universidad Nacional Autónoma de México.

- Segura F. y W. Rojas.,1997. Estudio de la Amenaza Sísmica de Nicaragua, Managua.

- Sigurdsson, H., 2000. Enciclopedia of volcanoes. San Diego, Acedemic, 1417P.
- Steven, M., 1972. The Geology Of. Western Nicaragua, Incorporated and International Aero Service Corporation. Parsons Corporation.

- Stoiber, R and Carr, N., 1973. Quaternary volcanic and tectonic segmentation of Central America. Billetin of Volcanology.

- Tibaldi, C.a., 2005. Fracture control on Type , morphology and distribution of parasitic volcanes cones: Journal of volcanology and geothermal research, p. 177-194.

- Vincent, S., 2004. A Draft Primer on Focal Mechanism Solutions For Geologist.

- Ward. P, Gibbs. J, Harlow. D. and Aburto. A, 1974. Aftershocks of the Managua, Nicaragua, Earthquake and the Tectonic Significance of the Tiscapa Fault. Bull. Seism. Soc. A. 64, 1017-1029; Berkeley.

- Weinberg, R. F., 1990. The Neogene structural development of western Nicaragua, Rep. URAP 90002, Swed. Agency for Res. Coop. with Dev. Countries, Inst. Nicaraguense de Minería, Swedish Geological A.B., Lulea, Sweden.

- Weinberg, R. F., 1992. Neotectonic development of Western Nicaragua, Tectonics 11, 1010-1017.

- Weinberg, R.F., Elmings.A.S, Windelfalk.L. And Rodríguez, D, 1998. Desarrollo Neotectonic de Nicaragua occidental: Suecia, Universidad Tecnológica de Luleá.

- White, R., 1991. Tectonic implications of upper-crustal seismicity in Central America.

- White, R. and Harlow, D., 1993. Destructive upper-crustal earthquakes of Central America since: *Seismological Society of America Bulletin*, v. 38,p. 1115-1142.

- Williams, H., 1952a. Geologic observations on the ancient human footprints near Managua, Nicaragua, Central America (Ph.D. thesis): New Brunswick, New Jersey, Rutgers University, 143 p.

- Woodward-Clyde Associates, 1975. Investigation of active faulting in Managua, Nicaragua and vicinity. Final report to Vice Ministerio de Planificación Urbana, Gobierno de la Republica de Nicaragua, Woodward-Clyde Associates, Oakland, CA.

- Woodward-Clyde Consultants, Inc., 1975. Summary report of investigation of active faulting in Managua, Nicaragua and vicinity: Managua, Nicaragua, Vice Ministries de Pacification Urbana.