

MARCO TECTÓNICO DE LA CADENA VOLCÁNICA MÁS SEPTENTRIONAL DE LA CORDILLERA CENTRAL DE COLOMBIA

Bohórquez, O. P.¹; Monsalve, M.L.²; Velandia, F.³; Gil, F.⁴; Mora, H.⁴

RESUMEN

El vulcanismo reciente más septentrional de Colombia, comprendido entre los volcanes Romerales al norte y Cerro Machín al sur, está limitado por grandes sistemas de fallas que cruzan transversalmente el país, los cuales se muestran en este trabajo dentro de un área seleccionada de 10.000 km² que se estudió a partir de imágenes de radar, Landsat y otros datos como localizaciones de sismos, cálculos de desplazamientos relativos de bloques, mapas de fallas activas y planchas geológicas publicadas. Se reconocieron tres direcciones predominantes de fracturamiento en la zona, una N-S paralela a los piedemontes de la Cordillera Central, otra SW-NE relacionada con fallas como Río Arma o La Pintada y la tercera tendencia SW-NE comparable con la dirección de Garrapatas e Ibagué. Además, se identificó la correlación existente entre las fallas y los volcanes recientes, se diferenciaron la actividad sísmica asociada con el vulcanismo y con las fallas; se determinó el grado de importancia en la zona de cada uno de los grupos de estructuras tectónicas identificadas y finalmente se reconoció el desplazamiento relativo de un microbloque propuesto para la región. De esta forma y de manera preliminar, se asumen algunos sentidos y magnitudes de desplazamientos, que junto con los demás datos permiten proponer un modelo que relaciona las zonas de falla de Ibagué y Arma como límites tectónicos de un segmento de placa que subduce bajo el arco continental y genera el vulcanismo reciente en esta parte de la Cordillera Central.

Palabras claves: Radar, Landsat, Sismos, Volcanes, GPS, modelo tectónico, Cordillera Central.

TECTONIC SETTING OF THE NORTHERNMOST VOLCANIC BELT OF THE CENTRAL CORDILLERA, COLOMBIA

ABSTRACT

The northernmost Colombian recent volcanism is located in the central part of the Central Cordillera between the Romerales and Machín volcanoes. This volcanic belt is bounded by transversal fault systems, observed in an area of 10.000 km². Radar and Landsat images interpretations, earthquakes locations, relative displacements of blocks, active faults studies and published geological maps were used to constrain this volcanism. Three major fracture orientations systems were recognized in the region. The first system strikes N-S and is parallel to the Central Cordillera foothills. The second is oriented NW-SE and is related to the Rio Arma Fault and similar structures. The third with a SW-NE tendency is comparable with structures such as the Garrapatas and Ibagué faults. Faulting and recent volcanism relationship was identified, as well as their seismic activity. Additionally, the relative importance of the identified tectonic structures was established. Finally a micro-block is proposed for the region and their relative directions and magnitudes of displacement were determined using GPS methods. This analysis allow us to propose the Ibagué and Arma fault systems as tectonic boundaries of a crustal block that represents the subduction of a slab segment under the continental arch, generating the recent volcanism in this part of the Central Cordillera.

Key words: Radar, Landsat, Earthquakes, volcanoes, GPS, tectonic model, Central Cordillera.

¹ Correo electrónico: opbohorquez@hotmail.com.co

² Correo electrónico: fawzi14@hotmail.com

³ Ingeominas, Sede Central, Bogotá. Correo electrónico: fcovelan@ingeominas.gov.co

⁴ Ingeominas, Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales.

Correo electrónico: fgil@ingeominas.gov.co, hmora@ingeominas.gov.co

INTRODUCCIÓN

Existe conocimiento parcial sobre los sistemas de fallas que pueden limitar y tener relación con el vulcanismo reciente de la Cordillera Central, especialmente de la cadena más septentrional, comprendida entre los volcanes de Romerales al norte y Machín al sur. Por esta razón, el presente trabajo se inicia con una síntesis de la información geológica y tectónica existente, así como de los modelos estructurales locales y regionales propuestos por diferentes autores, con el fin de definir y caracterizar la morfotectónica de las estructuras mayores en una zona de aproximadamente 10.000 km². El área se ubica en el centro occidente colombiano sobre la Cordillera Central, cubriendo tanto el eje de la cordillera como parte de los piedemontes de las cuencas de los ríos Cauca y Magdalena. Hacia el norte, el área incluye parte del departamento de Antioquia y por el sur los departamentos de Tolima, Quindío y Valle (FIGURA 1).

Este artículo realiza una cartografía de las fallas geológicas de esta parte de la Cordillera Central y muestra su relación con el vulcanismo, los sismos de origen superficial y los desplazamientos relativos de bloques dentro de la zona que abarca la cadena volcánica más septentrional de Suramérica; además, se tiene en cuenta el termalismo y los depósitos minerales asociados. El trabajo convalida la información suministrada por las imágenes de Radarsat en zonas de alta montaña con base en la que ofrecen las imágenes de satélite Landsat TM 5 y busca aportar información del marco tectónico regional para la realización de futuras investigaciones tectónicas detalladas, teniendo en cuenta que una nueva interpretación tectónica puede cambiar el enfoque de la amenaza sísmica que se tiene hasta ahora elaborada para esta región del país.

Para la realización de este estudio se hizo la interpretación de imágenes estereoscópicas de radar en escalas variables desde 1:67.000 hasta 1:834.000. Luego se correlacionó la información obtenida de esta interpretación con los datos geológicos y estructurales existentes. Posteriormente se corrigió, digitalizó y georeferenció toda la interpretación realizada sobre la imagen de radar, para luego superponerla en la imagen digital Landsat TM 5, logrando así corroborar los trazos y completar los que no fueron claros en la primera imagen. Después de identificar las fallas mayores se superpuso la cobertura de datos sísmicos de origen superficial de la red del OVSM ubicados en el área

seleccionada de 10.000 km². La interpretación sismológica permitió identificar sismofuentes asociadas al vulcanismo y a algunos sistemas de fallas. Para este caso se omitieron los sismos de origen profundo ya que el interés fundamental es buscar la posible relación de la sismicidad con la tectónica de superficie. También se relacionaron otros datos geológicos de fuentes termales y yacimientos minerales.

De otro lado, a partir del análisis de diagramas rosas de lineamientos y fallas, se identificaron las tendencias más dominantes en la zona. La interpretación de fallas permitió hacer la propuesta de un microbloque dentro del cual se presenta el vulcanismo, para el cual se hizo el cálculo de desplazamientos relativos con base en las estaciones de GPS ubicadas en algunos sectores del territorio colombiano. Con estos resultados se identificó cuál es el movimiento actual predominante en la zona estudiada.

Para la realización del análisis y procesamiento de la información fue fundamental el uso del sistema de información geográfico, utilizando para tal efecto el programa Arc View, versión 8.1. El área escogida fue seleccionada con base en la cobertura de la imagen de Radarsat estereoscópica facilitada por el Centro de Estudios Regionales. Cafeteros (CRECE) que opera en Manizales.

MARCO TECTÓNICO

La esquina noroccidental suramericana ha sido una zona muy estudiada por diferentes autores, que han analizado e interpretado la interacción de las placas de Nazca, Caribe, Cocos, Suramérica y de las microplacas de Coiba y Panamá. Dentro de las interpretaciones y modelos que se proponen se destacan los que plantean el Bloque de los Andes separado del resto de Suramérica por el sistema de fallas del Borde Oriental Llanero. Dentro de este bloque se propone la presencia de dos segmentos mayores, los cuales estarían asociados a la subducción del Caribe y a la subducción de Nazca. (Pennington 1979, Vander Hilst & Mann 1994, Taboada, et al., 2000). El primer segmento tendría un ángulo de subducción bajo, entre 20 y 25° y con dirección de 109°, llamado segmento Bucaramanga y el segundo con un buzamiento aproximado de 35° en dirección de 120°, llamado segmento Cauca.

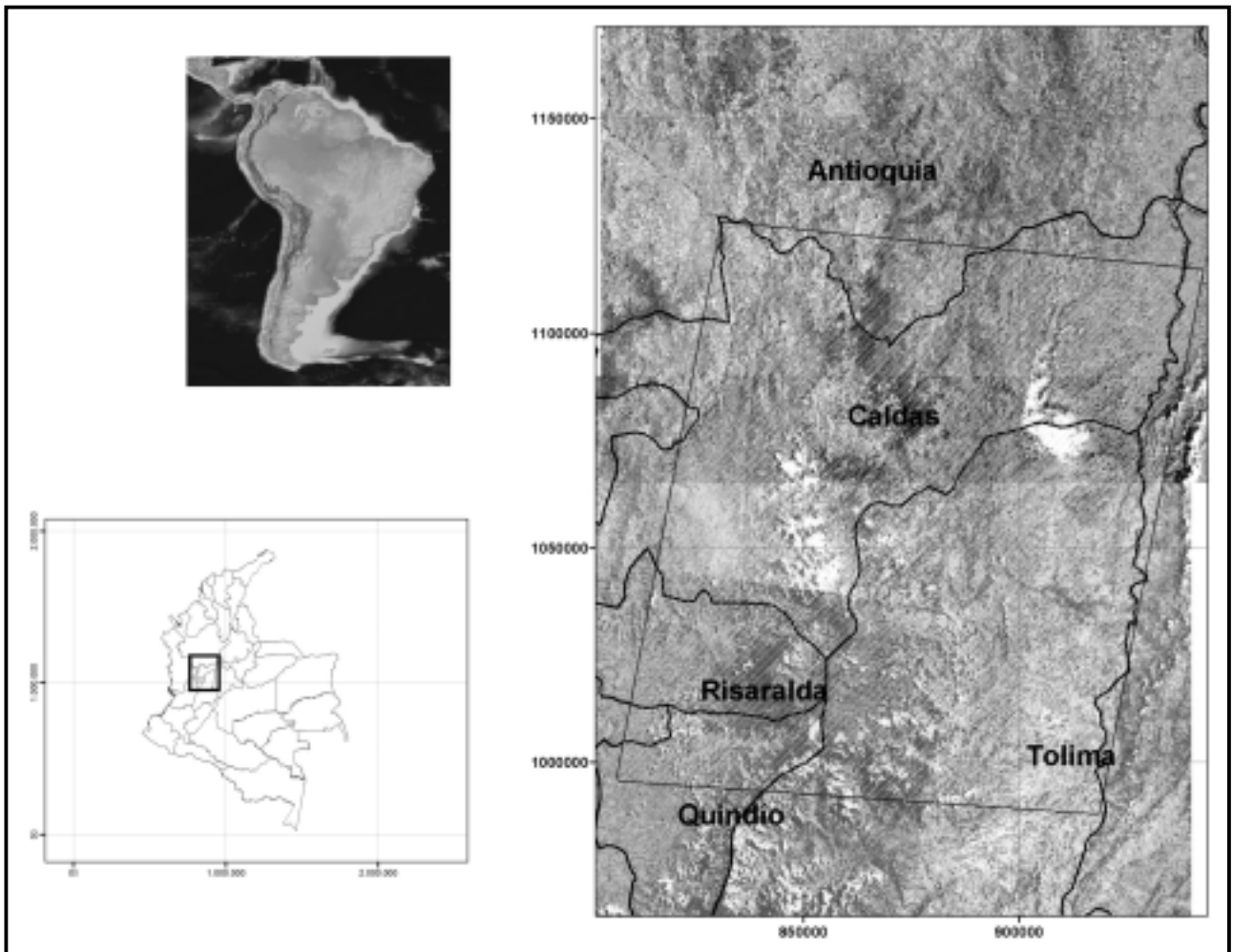


FIGURA 1. Localización zona de estudio. A la derecha se muestra la imagen de satélite utilizada, sobre la cual se demarca (por medio de líneas punteadas) el área cubierta por la imagen estereoscópica de RADARSAT disponible para el análisis.

El Istmo de Panamá y las áreas vecinas forman un límite de placa difuso con cabalgamiento a lo largo de sistema de fallas con rumbo NW y NE, llamado bloque Panamá – Chocó ó microbloque Panamá. Esta deformación se presenta por la convergencia de las placas Nazca y Caribe con la Placa Suramericana y por la compresión norte - sur entre dichas placas (Pennington, 1979; Hincapié, 1994; Van der Hilst & Mann, 1994). La subducción de Nazca se presenta con cambios en el buzamiento de la placa a lo largo de la zona de colisión teniendo al norte un ángulo de 18°, en un segmento denominado Murindó, luego un ángulo de 30°, en un segmento de transición y al sur con 38° en otro segmento, denominado Cauca. La zona de transición se presenta entre los 5° y 6° N.

Los cambios en el buzamiento de la subducción de la Placa Nazca estarían relacionados con la aparición y desaparición del fenómeno volcánico. Un límite bien definido que separa los segmentos Cauca y Bucaramanga, marca la terminación al norte del vulcanismo actual y del Mioceno y corresponde a fallas y lineamientos en sentido NW como la Falla Río Arma en el río Cauca, el lineamiento Golfo de Urabá - Cañasgordas, el lineamiento Río Murri – Urrao, aparentemente con un desplazamiento lateral izquierdo. Este es un límite estructural relacionado con un cambio de pendiente y de rumbo de la faja subducente y con la terminación de la sismicidad intermedia asociada al arco volcánico (Pennington 1981, Hall y Wood 1985, Hincapié 1994, Monsalve 1998). Según otros autores la subducción de la Placa Nazca termina abruptamente hacia la parte sur de la Serranía del Baudó. Hacia el norte de este punto, la placa subduce debajo del Bloque Chocó, superponiéndose a la parte sur del “plateau” paleo Caribe (PCP). Los esfuerzos más dominantes para la región noroccidental serían en sentido E-SE, correlacionados con la colisión del Caribe con Suramerica y otros dos esfuerzos compresivos, uno Andino tardío en sentido N80°E y otro Andino reciente en sentido NW-SE (Taboada et al., 2000, Arcila et al., 2002, Guzmán et al., 1998)

Dentro del marco tectónico local se encuentran como fallamientos dominantes los que tienen sentido N-S destacándose diferentes estudios que se han hecho al sistema de fallas de Romeral (Silvia-Pijao, Cauca-Almaguer). Con la información compilada de estos trabajos, se ha podido identificar que a partir de los cambios de pendiente de la faja subducente, el tipo de

falla, las características litológicas afectadas por las fallas del sistema y el comportamiento tectónico y sísmico, la estructura fundamental se encuentra segmentada en siete partes (Escobar 2002). La zona de estudio se encontraría enmarcada en medio de los segmentos Antioquia y Valle Norte, los cuales se caracterizan por presentar fallas del sistema de tipo inverso y de rumbo. La actividad sísmica de la zona de estudio presenta como la fuente sísmica más importante en los últimos 100 años a la zona de Benioff y como segunda fuente se define la zona de fallas superficiales que pertenecen al sistema de fallas Cauca Almaguer, Silvia Pijao y San Jerónimo, las cuales tienen una orientación N-S y NNE, y no se descarta la posibilidad de una tasa de actividad importante (James, 1986).

Con base en parámetros microestructurales y algunos sísmicos se establece que el régimen de esfuerzos predominante durante el Cuaternario es principalmente compresivo y secundariamente de rumbo, con un tensor de esfuerzos (σ_1) en dirección NW-SE. Subsidiariamente a este patrón y en sentido ortogonal, se evidencian distensiones NNE-SSW a NE-SW, hecho explicable dentro del modelo del elipsoide deformativo. El patrón de fallamiento activo y probablemente activo presenta una dirección N-S a NNE, aunque adicionalmente se presentan estructuras importantes en sentido WNW-ESE y NE-SW. Las fallas en sentido N-S a NNE tienen dinámica de potencial de tipo inverso y componente sinistral, de acuerdo a la información neotectónica recolectada. La dinámica potencial de las estructuras de dirección WNW-ESE coincide con tipo normal y componente dextrolateral. A su vez, los fallamientos de dirección NE-SW se acoplarían con una dinámica de tipo inverso.

Localmente, se ha visto que la deformación dúctil está representada por milonitas, lineaciones de tipo subhorizontal, oblicua y subvertical de rocas cretácicas que estuvieron sometidas a un régimen de esfuerzos correspondiente a un sistema transpresivo dextral con componentes de cizalla vertical y las rocas del Grupo Arquía presentan una geometría y cinemática frágil, representada por planos de falla con estrías y buenos indicadores cinemáticos compatibles con un movimiento de rumbo sinistral general que se correlaciona con el régimen de esfuerzos actual (Guzmán et al., 1998, Atehortúa y Gutiérrez, 2003). El modelado de las geoformas en la región está ligado a las diferentes fases tectónicas, magmáticas y a los procesos de dinámica

externa (Florez, 1986). Dentro de las geoformas volcánicas, para el área se han identificado 28 estructuras, las cuales están clasificados entre activos históricos y ó latentes hasta inactivos antiguos. Todos ellos han presentado evidencias de actividad en el Holoceno. Algunas de las estructuras volcánicas reconocidas en el área son: Romeral, El Retiro, La Ermita, El Contento, La Plazuela, Cerro Bravo, El Colmillo, La Olleta, Nevado del Ruiz, El Cisne, Santa Isabel, El Quindío, Nevado del Tolima y El Machín (Ceballos et al., 1994, Méndez, 1989)

Los estudios geológicos detallados existentes para el área reconocen un gran número de fallas, asociadas en su mayoría a las fallas de San Jerónimo, Silvia-Pijao, Cauca-Almaguer y Cauca-Patía. Menor importancia se le ha dado a las estructuras NE- SW y muy poca a las NW-SE (González, 1980, Calle et. al., 1980, Mosquera et al., 1982, Caballero & Zapata, 1983, M^c Court et al. 1984, INGEOMINAS, 2001, Estrada & Viana, 1998).

INTERPRETACIÓN DE IMÁGENES RADARSAT Y LANDSAT

Las imágenes Landsat TM 5 son digitales con arreglo de elementos de forma de malla o grilla, cada una de las cuales es un píxel que tiene unas condiciones de nivel de gris y de intensidad de energía reflejada o emitida por el material. Las imágenes Landsat captan energía electromagnética en las porciones visibles e infrarrojo del espectro y las de radar en el rango de las microondas. Para el análisis de las imágenes Landsat TM 5 en el presente estudio, se utilizó una composición de bandas en falso color, con rojo para la banda 1, verde para la 2 y azul para la 3 (RVA: 123). La escala de detalle para el análisis de las estructuras mayores fue de 1:60.000.

Las ventajas identificadas de las imágenes Landsat TM 5 son: la posibilidad de identificar mejor las texturas, su manejo digital que facilita los cambios de escala y la generación de composiciones en falso color que permitieron dar realce a las estructuras, drenajes y texturas. Como desventaja, se encontró la presencia de nubosidad en zonas de alta humedad. Sin embargo, en algunos sectores las imágenes Landsat fueron de gran utilidad para este estudio ya que permitieron confirmar y continuar trazos identificados en las imágenes de radar.

Las imágenes de radar provienen del proyecto Radarsat-1 de la empresa GlobeSar que evaluó su utilidad en zonas de alta montaña. Para este estudio se utilizaron imágenes con un ángulo de incidencia entre 20° y 50°, con área de cubrimiento entre 2.500 km² y 11.424 km², en formato analógico, algunas estereoscópicas y con escalas aproximadas que varían entre 1:50.000, 1:67.000, 1:400.000, 1:800.000 y 1:1'900.000. Las ventajas de estas imágenes son la ausencia de nubosidad, realce de rasgos estructurales y la visión estereoscópica; mientras que sus principales desventajas son la distorsión geométrica por acortamiento y alargamiento topográfico, la visión en escala de grises y la baja resolución de texturas.

La interpretación realizada sobre las imágenes de radar fue corregida con los mapas topográficos 1:100.000 para ajustar mejor las longitudes de los lineamientos y para confirmar su relación con la morfología. Posteriormente, la interpretación digitalizada de las imágenes de Radarsat y Landsat TM 5 se comparó con los trazos de fallas definidos en la cartografía geológica del Ingeominas en escala 1:100.000 y en otros estudios geológicos y neotectónicos locales, que contaron con trabajo de campo. La secuencia de la FIGURA 2 muestra los resultados obtenidos en la interpretación de los dos tipos de imágenes.

Con la ayuda de los mapas geológicos en escala 1:100.000 y la información de trabajos específicos del área de estudio, se identificaron los trazos correspondientes a fallas definidas y los trazos de lineamientos o fallas no cartografiadas previamente. La interpretación muestra como estructuras tectónicas dominantes en la zona las de sentido N-S, con un valor acumulado de longitudes de 364 km (FIGURA 3), seguidamente los segmentos con dirección N10W con 211 km. Otro grupo corresponde a trazos en sentido N40E y N50E con un total de 193 y 160 km de longitud respectivamente, totalizando en esta dirección 353 km. Finalmente se encontró que los trazos con tendencias N60W son los menores, con un acumulado en longitudes de 225 km. Los tres grupos interpretados de lineamientos tienen relación con las fallas de la zona que se describen en la TABLA 1, las cuales también se localizan en la FIGURA 4.

En las FIGURAS 4a, 4b y 4c se observa que los trazos que atraviesan la Cordillera Central de oriente a occidente y de norte a sur sufren segmentaciones en su recorrido. En la cartografía existente las fallas mayores o

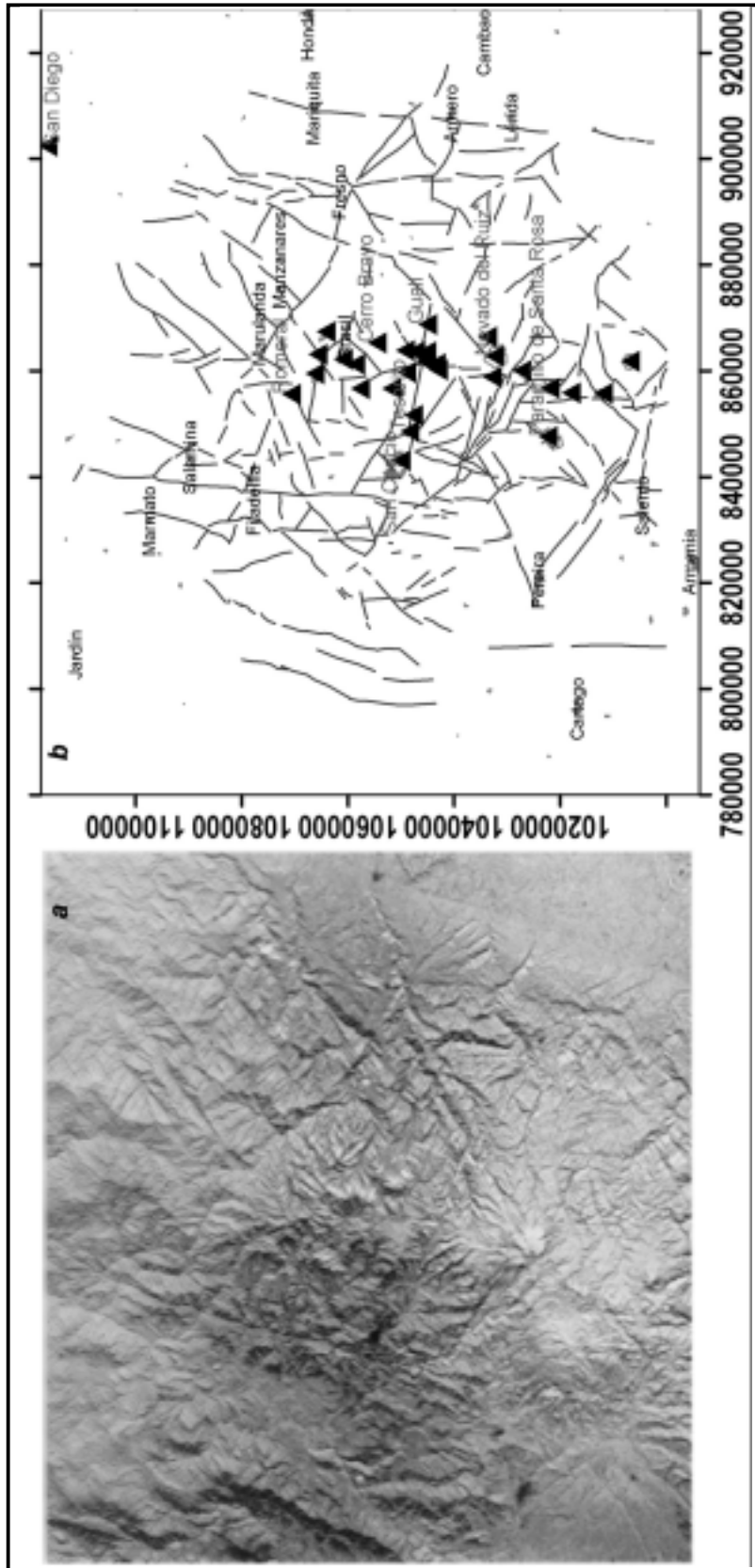


FIGURA 2. La imagen de radar estereoscópica (a) permitió identificar un marco tectónico local para la zona volcánica comprendida entre Romeral al norte y el Nevado del Tolima al sur. La interpretación de la imagen (b) fue corregida y digitalizada, para luego ser montada sobre la imagen de satélite, en donde se aprecia un alto ajuste entre la interpretación y los rasgos visibles en la imagen (c). Para mejorar la visión de la zona, se complementó la interpretación con otros lineamientos claros y evidentes de la imagen Landsat y que no se alcanzaban a tener en la imagen de radar. Se identificaron estructuras correspondientes a los volcanes de Cerro Machín y la laguna de San Diego y las Fallas Río Arma, Ibagué y Chapetón-Pericos. Estas Fallas corresponden a los límites Norte y Sur respectivamente de un microbloque identificado (d).

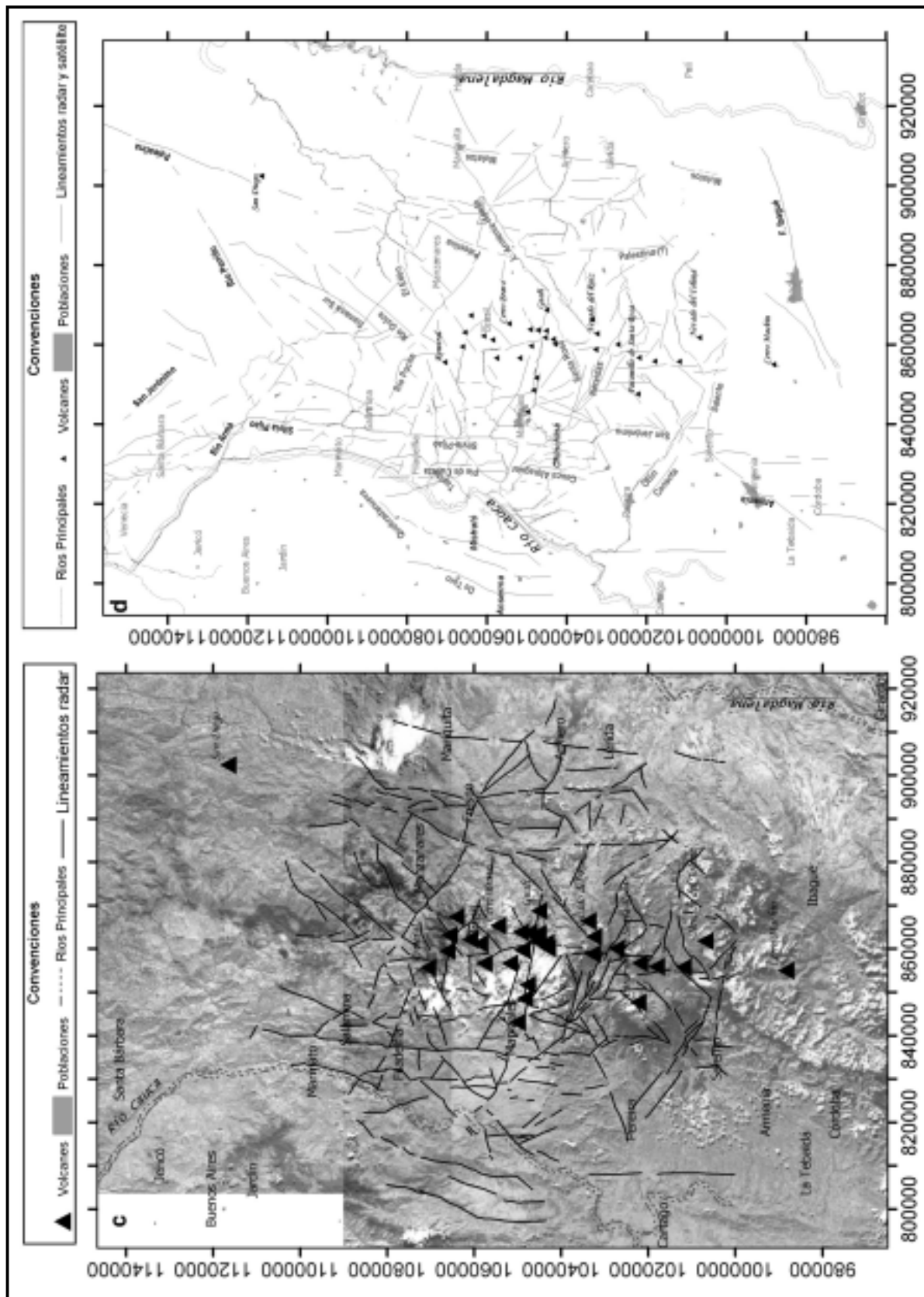


FIGURA 2. Continuación.

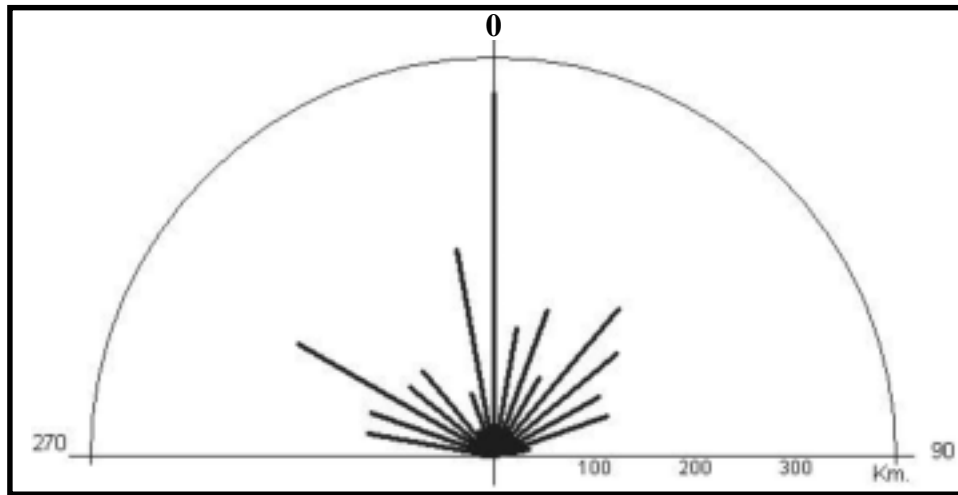


FIGURA 3. Diagrama rosa que representa las longitudes acumuladas que se hallaron en los lineamientos y fallas encontradas.

TABLA 1. Grupo de fallas relacionadas con los trazos identificados en las imágenes satelitales y sus características principales.

GRUPO DE ESTRUCTURAS	NOMBRE DE LAS FALLAS Y LINEAMIENTOS	TIPO DE FALLA	RUMBO Y BUZAMIENTO
N-S	Mulatos Palestina San Jerónimo Silvia-Pijao Pie de Cuesta Cauca-Almaguer Quebradanueva Armenia De Toro	Inversa dextral Dextral normal Inversa Inversa Inversa sinistral Inversa sinistral Inversa Inversa Inversa	N-S/65W NNE/W NNE/65E NNE/60E NNE/50E N-S/50E NNE/60E NNE/60NW NNE/60W
NE – SW	Ibagué Chapetón-Pericos Santa Rosa El Edén Samaná Sur Río Dulce Río Perrillo Otún (Palestina) Tapias	Inversa dextral Sinistral normal Rumbo Dextral Dextral Inversa sinistral Inversa sinistral	NE/70NW N70E/75SE N30E a N45E NE/75NW NE/40NW
NW – SE	Río Arma Lineam. Río Pocito Termales – V/ María Consota Salento Guacaica (Neira)	Normal Normal dextral Normal dextral Normal dextral	 NW/65SW NW/70NE

dominantes varían de nombre a lo largo de su recorrido, un ejemplo es la falla San Jerónimo que de sur a norte recibe distinta nomenclatura como: Navarco, Aranzazu-Manizales, el Perro o Salamina. Igualmente la Falla Silvia-Pijao que también es nombrada como Neira o La Merced.

En la FIGURA 4a se puede apreciar la distribución de las fallas y lineamientos en sentido N-S a NNE. Hacia el oriente, la Falla Mulatos presenta 11 segmentos y mantiene constante su rumbo. Ascendiendo hacia la

Cordillera Central se observa un trazo muy constante en toda la zona que podría relacionarse con la Falla Palestina, la cual tiene en la parte norte un sentido NNE, pero en el tramo entre Manzanares y Villa Hermosa se intercepta con otras fallas que tienen sentido NE-SW, situación que ha hecho pensar que la Falla Palestina cambia de rumbo hacia el Volcán Nevado del Ruiz. Sin embargo, en la interpretación se reconocen una serie de lineamientos que podrían corresponder a la continuación de la Falla Palestina hacia el sur, constituyendo junto con los trazos subparalelos una cola de caballo; lo cual

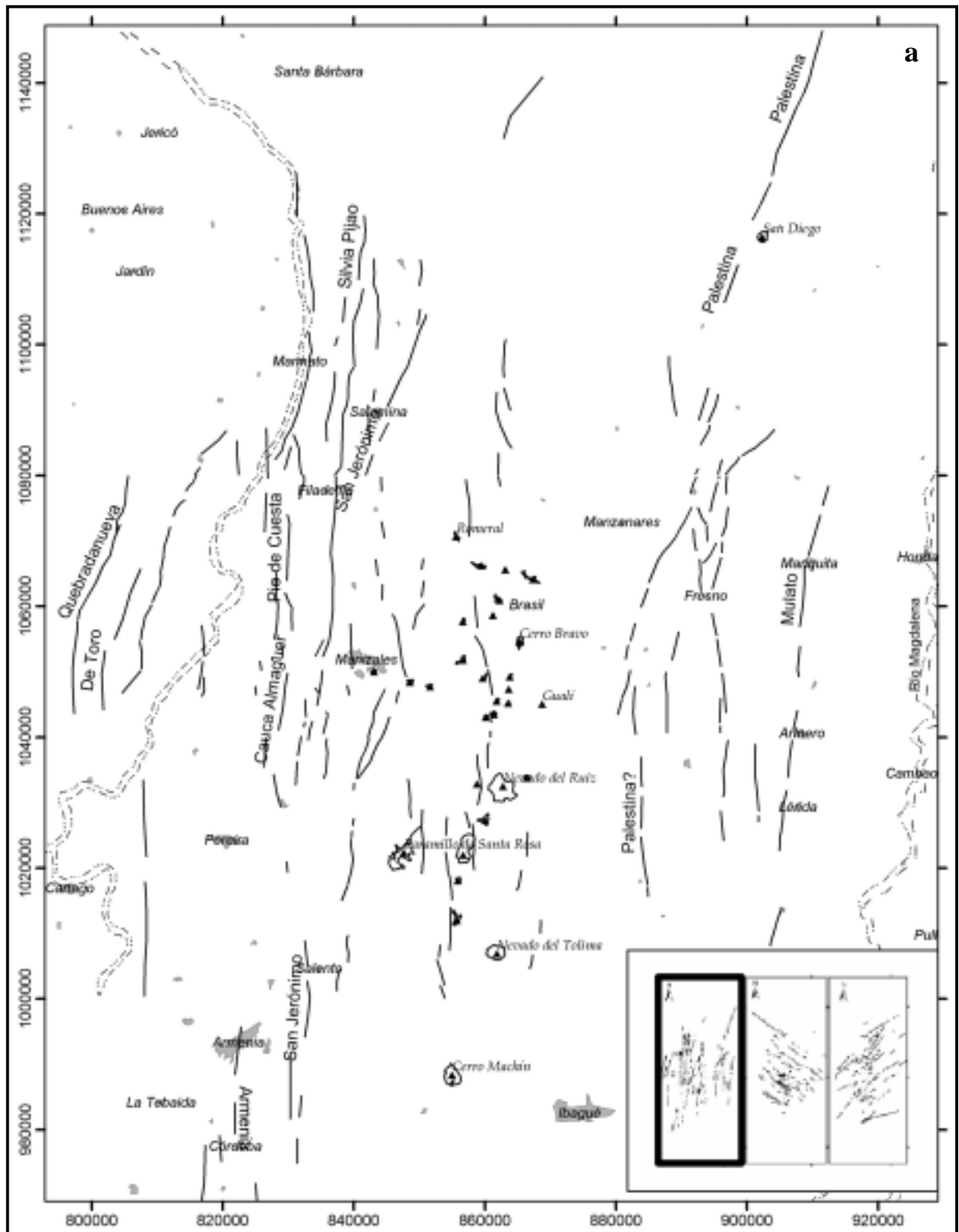


FIGURA 4a. Distribución de los lineamientos y fallas encontrados con las imágenes Landsat y RadarSat. Adicionalmente se muestran los tensores de esfuerzos resultantes (flechas de color rojo) y las direcciones de desplazamientos (flechas de color negro), ajustados al modelo de deformación propuesto para la zona analizada.

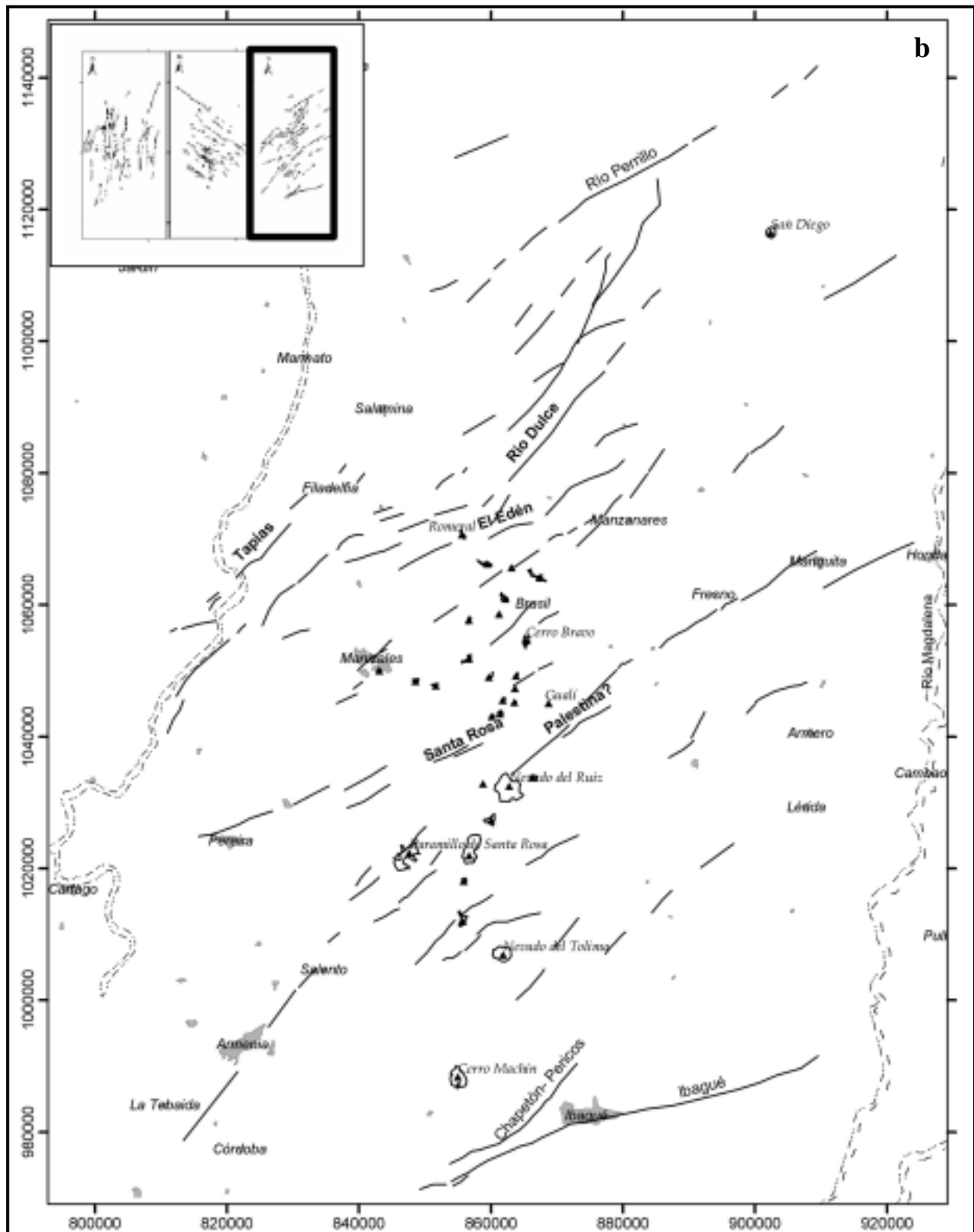


FIGURA 4b. Distribución de los lineamientos y fallas encontrados con las imágenes Landsat y RadarSat. Dirección NE-SW. Adicionalmente se muestran los tensores de esfuerzos resultantes (flechas de color rojo) y las direcciones de desplazamientos (flechas de color negro), ajustados al modelo de deformación propuesto para la zona analizada.

es común en la parte final o inicial de las fallas con movimiento de rumbo. La falla Palestina, asumiendo que sigue hacia el sur sin cambios bruscos de dirección, presentaría una alta segmentación, corroborada por la presencia de 32 trazos con longitudes variables aproximadas entre 1 y 24 km. Esta segmentación se produce por las fallas y lineamientos NE-SW y NW-SE. Adicionalmente, se observa que el Volcán San Diego (composición riolítica), que es una laguna (maar?) ubicada en el extremo NE de la imagen de satélite, se podría relacionar con el trazo de esta falla, lo que implicaría que la Falla Palestina puede presentar tectónica distensiva local y reciente.

Hacia el eje de la Cordillera Central, donde se localizan los volcanes, se aprecian pequeños segmentos (21) que no han sido estudiados. La interpretación inicial que se les podría dar a estos lineamientos es la de un efecto gravitacional debido al combamiento de la cordillera en su parte más alta, por ser una zona sometida a esfuerzos distensivos como lo indica el vulcanismo activo.

Siguiendo hacia el flanco occidental de la cordillera, se encuentran en sentido N-S, NNW y NNE, las fallas San Jerónimo (33 segmentos), Silvia-Pijao (18 segmentos), Pie de Cuesta (4 segmentos), Cauca-Almaguer (17 segmentos) y Quebradanueva (15 segmentos), las cuales se caracterizan por tener en general un comportamiento oblicuo como fallas inversas y sinestrales.

En segundo lugar se presentan con mayor frecuencia los lineamientos y fallas con sentido SW-NE (FIGURA 4b), entre ellas, la más destacada por su longitud es la Falla Santa Rosa que se extiende desde Pereira hasta Honda con un tramo correspondiente a lo que tradicionalmente se ha conocido como Falla Palestina hacia el NE del Nevado del Ruiz; mientras que el tramo que pasa por Pereira puede interpretarse como la prolongación de la Falla Garrapatas. Esta estructura limita al norte el Abanico del Quindío y junto con otro lineamiento que pasa por Armenia conforma una cuña con vértice en el Nevado del Ruiz. Otras estructuras identificadas con esta dirección y de sur a norte son las fallas: Ibagué, Chapetón-Pericos, Río Perrillo, Samaná Sur, Río Dulce, El Edén y algunos segmentos de la nombrada como Palestina. Las fallas mencionadas han sido identificadas más claramente en la parte alta de la cordillera, en cercanías de la Falla San Jerónimo y en el costado oriental de la Cordillera Central.

La tercera tendencia estructural identificada tiene una orientación SE-NW (FIGURA 4c), con lineamientos continuos desde el piedemonte occidental hasta la parte axial de la cordillera, pero con menor claridad de los trazos hacia el costado oriental. Esta tendencia se relaciona con una extensa zona de cizalla cuya estructura principal es la Falla Río Arma o La Pintada al norte, la cual presenta una segmentación de 12 trazos reconocidos que se pueden relacionar con su prolongación hacia Mariquita y Honda en el valle del río Magdalena. Esta falla interrumpe y cambia la dirección N-S de las fallas que desde el sur afectan el flanco occidental de la Cordillera Central a un sentido más NW-SE hacia el norte de ésta. El desplazamiento en sentido sinistral de la Falla Palestina entre Samaná y Marquetalia se atribuye también a la Falla Río Arma, originando la confusión del cambio de rumbo de esta falla. Otras fallas en este grupo con orientación al NW son: Guacaica, Villa María Termals, Las Nereidas, Otún, Consota y Salento.

Adicionalmente a las fallas mencionadas en los tres agrupamientos anteriores, se observan unos lineamientos menores, en general con dirección E-W y de corta longitud, que no han sido estudiados en detalle.

SISMOLOGÍA

Con base en los datos de la red sísmológica del OVSM se tomaron inicialmente, 15.536 eventos localizados desde 1985 hasta el 2003 en el área de interés, correspondientes a sismos de origen superficial (profundidades menores a 60 km), incluyendo los sismos volcánicos. Al excluir estos últimos que son predominantes en número, se tomaron para el análisis de sismofuentes de carácter tectónico, un total de 2012 sismos.

Aunque existen limitaciones para la localización hipocentral de los sismos ocurridos en el área de estudio, dada la cobertura de la red, la cual está diseñada para cumplir con su principal objetivo que es la vigilancia volcánica, ésta se ha ampliado con el tiempo para cumplir también como una red sísmológica de tipo regional. De esta manera, es posible obtener localizaciones aproximadas de los eventos ocurridos en la región, mostrando en términos generales la tendencia de la ubicación de dichos eventos, especialmente desde el punto de vista epicentral; la profundidad tiene menos constricción en las soluciones obtenidas. La FIGURA 5

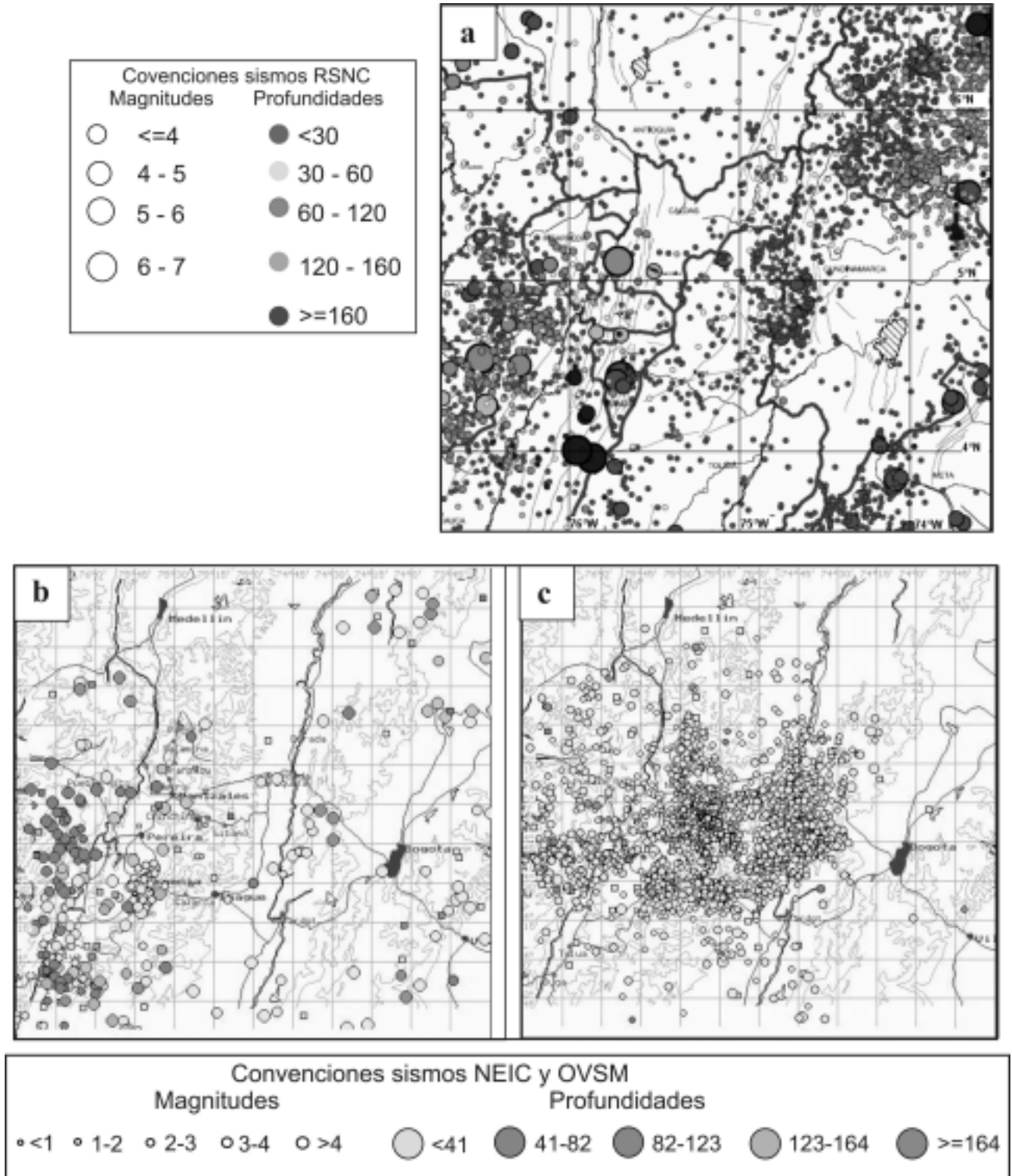


FIGURA 5. Comparación de los epicentros de las diferentes sismofuentes localizadas alrededor del Volcán Nevado del Ruiz observadas en tres redes sísmicas diferentes: a) RSNC, b) NEIC, c) OVSM. Se aclara que en el último mapa se están incluyendo los sismos del Ruiz que no entran en la comparación y se excluyen los de la fuente profunda de Bucaramanga porque no son localizados en el OVSM.

muestra la localización epicentral de los sismos en un radio de 75 km alrededor del Volcán Nevado del Ruiz, indicando que las localizaciones con la red del OVSM son muy aproximadas a las obtenidas por la red Sísmica Nacional de Colombia (RSNC) y por la red sísmica mundial (NEIC).

En todas las redes, se observa que existen ciertos sectores en donde se presentan fuentes sismogénicas ó sismofuentes, ocasionadas por procesos tales como la subducción, generando sismos profundos, el fallamiento y el vulcanismo, con sismos de origen intermedio y superficial. En general, la red del OVSM presenta una mejor constricción en las soluciones para los eventos en la región y además posee la ventaja de presentar un nivel de captación más alto que las otras redes mencionadas, permitiendo una mayor definición de las fuentes. Un hecho que confirma la calidad aceptable en las localizaciones obtenidas en este trabajo para sismos de la región es la determinación de la fuente de réplicas del sismo del Quindío de 1999 y su comparación con las obtenidas por medio de la red local del Observatorio

Sismológico del Quindío (OSQ) (Universidad del Quindío, Boletines mensuales) la cual indica una buena coincidencia epicentral entre los dos resultados.

La calidad de los sismos utilizados en el análisis se resume en la FIGURA 6, en donde se muestran datos estadísticos de algunos de los parámetros asociados con la solución de localización obtenida por medio del HYPO71 (Lee and Lahr, 1975), tales como la diferencia entre las lecturas de los tiempos de llegada de las fases de los sismos a las diferentes estaciones y los tiempos teóricos de acuerdo al modelo de corteza utilizado (RMS), el error en la localización horizontal (ERH) y el error en la localización vertical (ERZ). En la misma gráfica se muestra la distribución de la magnitud y la profundidad de los sismos procesados.

La mayoría de los sismos localizados presentan valores de $RMS < 0.15$, $ERH < 5$ km y $ERZ < 10$ km, mostrando un ajuste aceptable en las soluciones obtenidas. Las profundidades calculadas muestran una alta dispersión, posiblemente asociada a la poca constricción en la

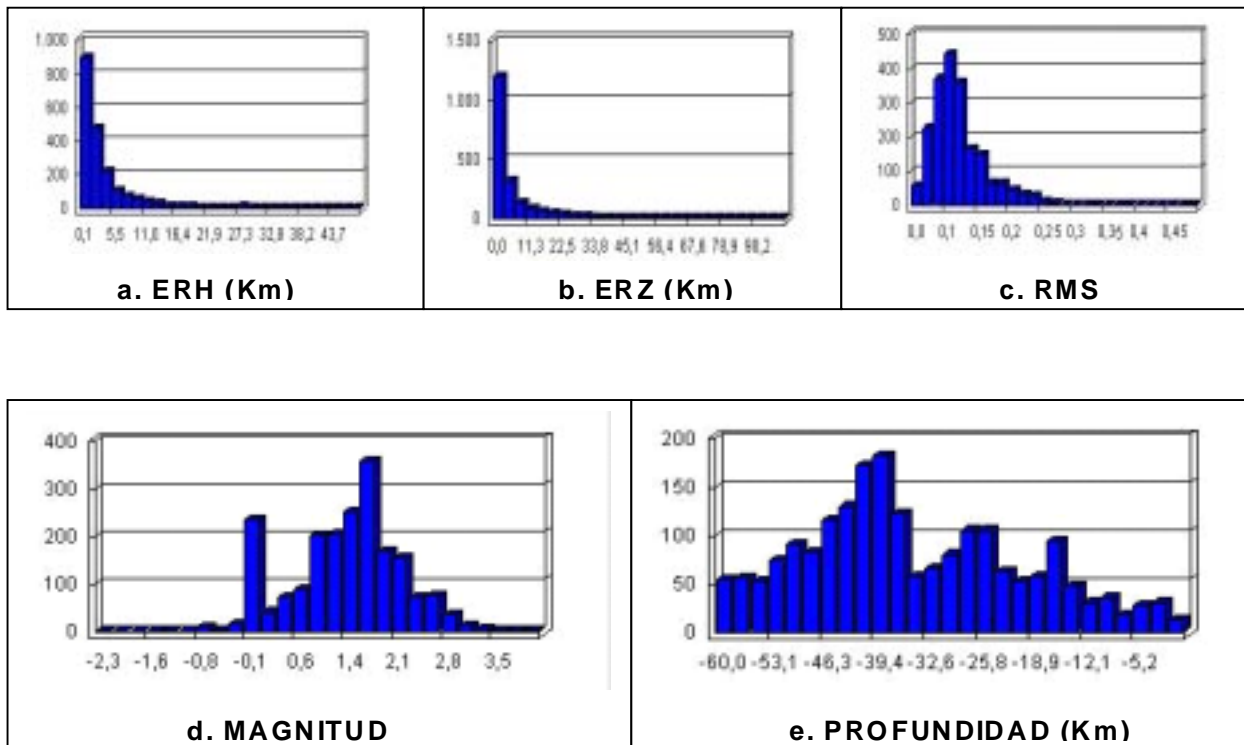


FIGURA 6. Resumen de las estadísticas de los parámetros de localización de los sismos utilizados en este estudio. Para el análisis estadístico no se tuvieron en cuenta los sismos originados en el Volcán Nevado del Ruiz. Como datos importantes se encuentra que el error medio en la horizontal (ERH) es de 4.5 km. (a), el error medio en la vertical (ERZ) es de 8.3 Km. (b) y el valor promedio del RMS es de 0.08 (c). Para las magnitudes se encuentra que la media hallada es de 1.4 (d) y la profundidad promedio hallada fue de 34 km. (e), en donde se presenta una mayor dispersión.

solución de éstas. De otro lado, las magnitudes de los sismos se concentran alrededor de un intervalo comprendido entre valores de 0.5 y 2.5, indicando una sismicidad con bajas a moderadas magnitudes.

Superponiendo en las imágenes satelitales, los lineamientos y fallas determinadas, así como los sismos localizados, fue posible la identificación de varias sismofuentes locales que han sido constantes en su ocurrencia a través del tiempo (FIGURA 7). En primer lugar se observan las fuentes sísmicas asociadas con la actividad volcánica, especialmente localizadas en los edificios de los volcanes Cerro Machín, Nevado del Tolima, Paramillo de Santa Rosa, Nevado de Santa Isabel, Nevado del Ruiz y Cerro Bravo. A este respecto es importante anotar que la diferenciación entre la sismicidad volcano-tectónica y la tectónica propiamente dicha es de difícil y sospechosa solución, dada la estrecha relación de los dos procesos. Existen muchos casos en que las erupciones volcánicas han sido precedidas por sismos nombrados como eventos tipo DVT (volcano-tectónicos distales) distanciados de los centros volcánicos por decenas de kilómetros (White, com. per.).

Como una primera aproximación se reconocieron los siguientes orígenes sísmicos definidos como de carácter tectónico: (1) la fuente del Quindío sobre el sistema de fallas de Silvia-Pijao asociada con el sismo de 1999 y la actividad de réplicas posterior. (2) una fuente sobre el trazo de las fallas Ibagué y Chapetón – Pericos. (3) la fuente denominada Anzoátegui, por su cercanía a esta población y ubicada en una zona aledaña al cruce de las fallas Mulatos e Ibagué. (4) la fuente de Pulí - Honda, que es una de las fuentes más activas de la región. (5) en cercanías de la población de Santa Isabel en el flanco oriental de la Cordillera Central, donde igualmente se presenta una concentración de sismos. (6) una pequeña fuente al sur de Fresno, posiblemente asociada con la Falla Palestina(?). (7) hacia el lado occidental de la Cordillera Central se encuentra una fuente entre el Paramillo de Santa Rosa y Manizales, en un sector tectónicamente complejo, cruzado por los trazos de las fallas San Jerónimo y Samaná Sur, a la vez que por estructuras en direcciones NW-SE y NE-SW tales como las fallas Río Claro, Nereidas y la Falla Santa Rosa. (8) al norte de Manizales se observó un área con menor densidad en la ocurrencia de sismos que las fuentes anteriormente mencionadas, concentrada entre el eje de la Cordillera y la falla principal del sistema Silvia - Pijao, la cual se ha nombrado como Silvia-Pijao Norte en este

trabajo por su posible relación con ella. Al comparar este sector con las zonas adyacentes, al oriente y occidente, presenta claramente una mayor sismicidad que ellas. En el año 2001 dentro de esta fuente ocurrió un enjambre de sismos en cercanías de la población de Salamina como lo puntualiza Bohórquez y Patiño (2001). (9) al sur de Manizales, llegando hasta el norte del Departamento del Quindío, se diferencia otra fuente aparentemente orientada de norte a sur, siguiendo el sistema de fallas Silvia-Pijao, llamada Silvia-Pijao Sur.

Existen algunas otras ligeras concentraciones de sismos, que aunque no tan claras podrían sugerir asociaciones con ciertas estructuras orientadas NW-SE, como la Falla Consota y el lineamiento Brasil. Igualmente, dentro de este contexto regional, ciertas relaciones encontradas en otros estudios que cubren áreas más pequeñas son menos notorias. Tal es el caso de la Falla Termales - Villamaría (Bohórquez et al, 2001).

Las fuentes más activas en la región (de acuerdo a la base de datos usada) son las del Quindío, Pulí - Honda, San Jerónimo - Samaná y Silvia-Pijao Norte y Sur (TABLA 2).

Las profundidades obtenidas no tienen una buena construcción, como puede verse en los resultados obtenidos para la fuente del Quindío. La profundidad media calculada por la red del OSQ, la cual tiene una cobertura adecuada sobre la fuente en mención, es del orden de 12-15 km (Universidad del Quindío, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003) mientras que con la red del OVSM, es de 37 km (TABLA 2). Sin embargo, las soluciones de las profundidades para las diferentes fuentes son en general muy concentradas en pequeños rangos, que aunque no deben ser las profundidades reales, sí muestran un claro carácter de fuente (FIGURA 8).

Es importante resaltar que la clara identificación y construcción de las áreas definidas como sismofuentes requiere de redes sísmicas más densas, “tests” teóricos de las redes usadas y corrección de las localizaciones con base en los resultados obtenidos en ellos, análisis de la completitud de la base de datos usada y de estudios más detallados sobre las características y patrones de los eventos sísmicos, tales como análisis espectral, mecanismos focales, determinación de tensores de esfuerzos locales, entre otros.

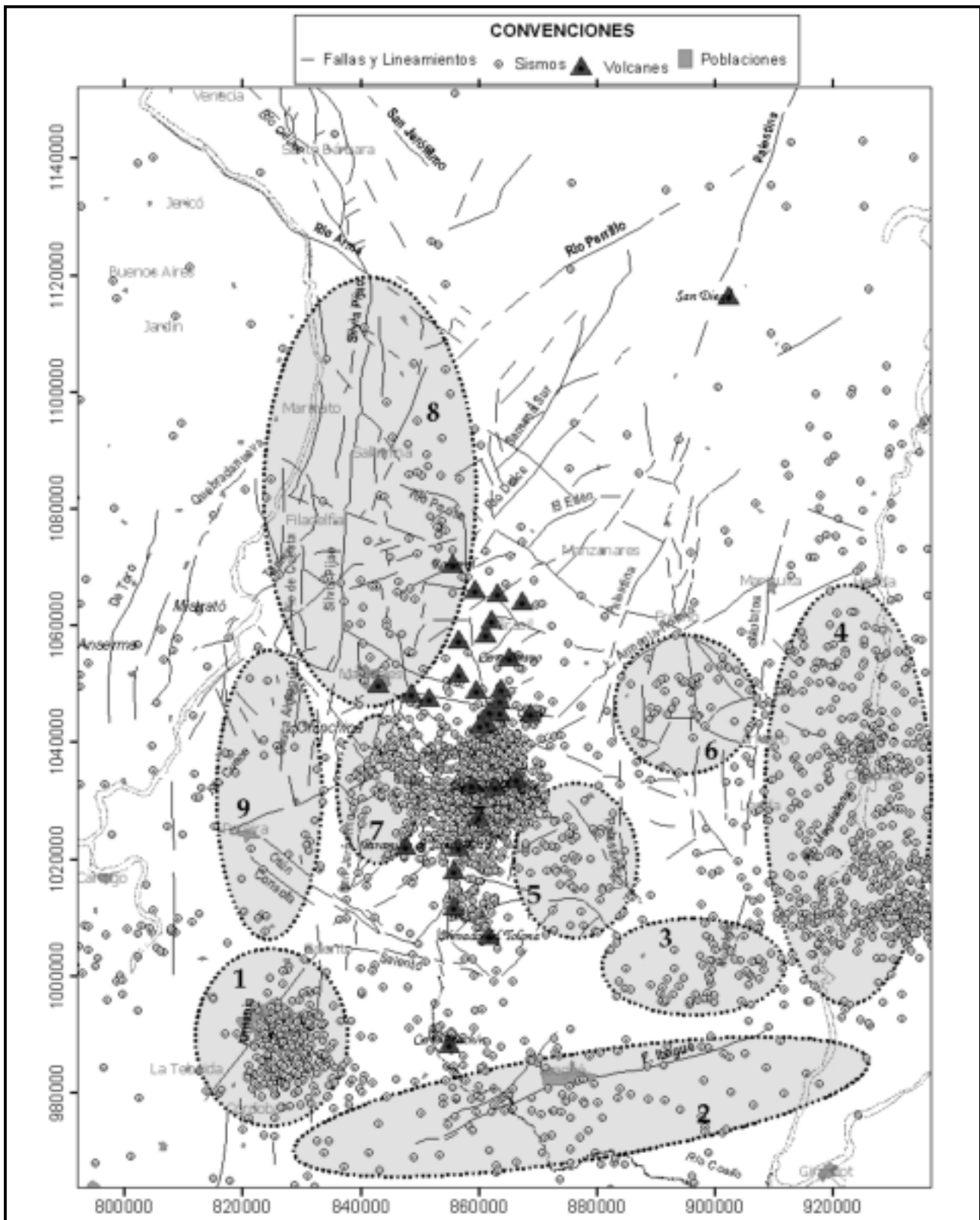


FIGURA 7. Localización de los sismos en la zona de estudio y las diferentes sismo Fuentes encontradas, enmarcadas dentro de líneas punteadas. Los números asociados con ellas están referidos a la TABLA 1.

TABLA 2. Algunas características de las fuentes sísmicas de carácter tectónico definidas en el área de estudio.

	Fuente	Número de sismos	Magnitud media	Magnitud máxima	Profundidad media (Km)
1	Quindío	318	1,4	3,1	37
2	Ibagué - Chapetón Perico	127	1,5	3,4	21
3	Anzoátegui	60	1,5	2,4	36
4	Pulí- Honda	587	1,6	3,7	44
5	Santa Isabel	60	1,3	2,8	11
6	Palestina (Fresno)	35	1,5	3,2	3
7	San Jerónimo-Samaná Sur	100	0,8	3,5	28
8	Silvia-Pijao Norte	188	1,6	4,2	28
9	Silvia-Pijao Sur	72	1,6	3,1	37

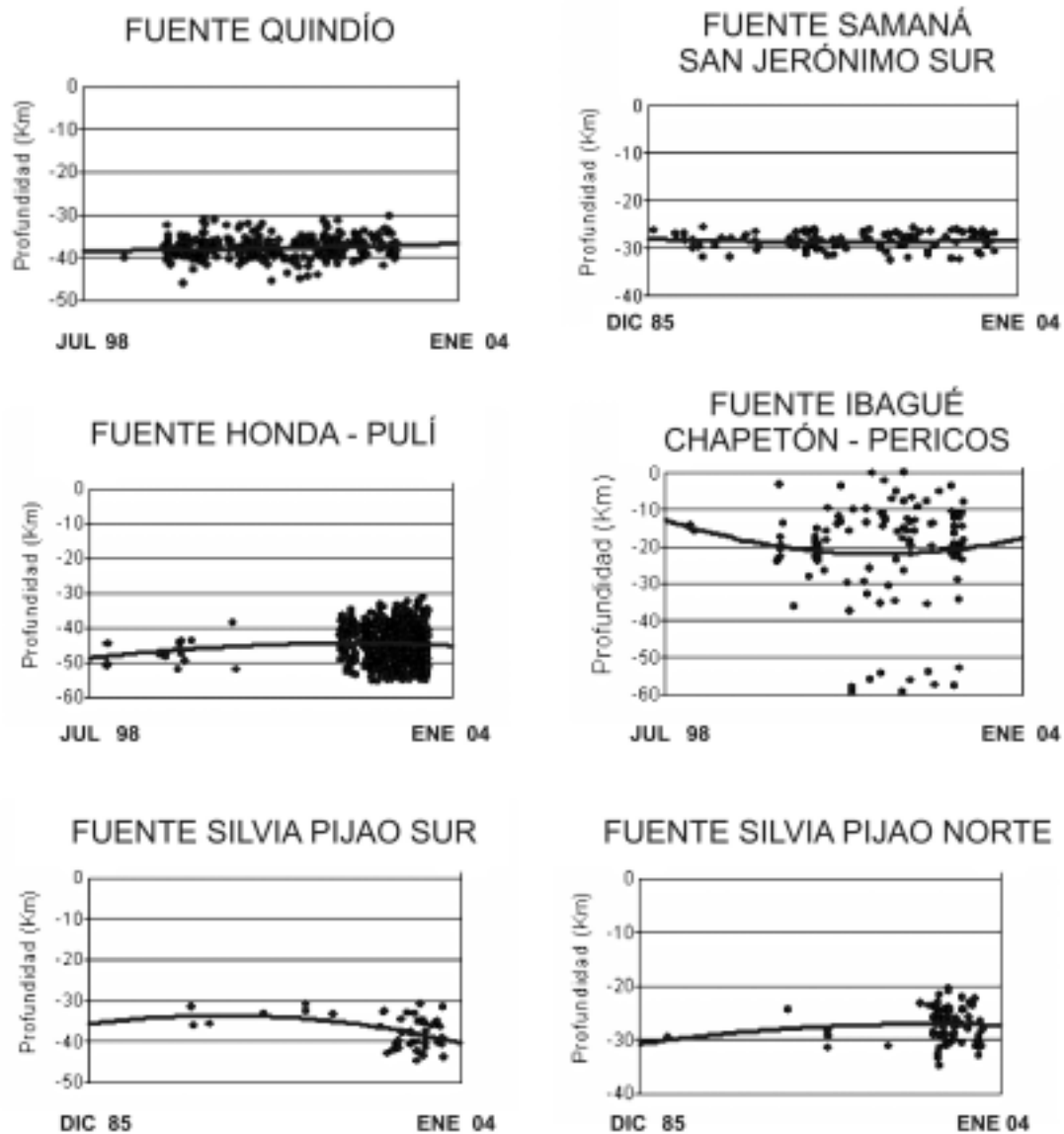


FIGURA 8. Variaciones de la profundidad a través del tiempo de las fuentes sísmicas de carácter tectónico más importantes determinadas en el área de estudio. La línea continua representa la tendencia de la profundidad. La escala horizontal representa las fechas en día juliano.

VULCANISMO Y FUENTES TERMALES

Aparte del reconocimiento de los lineamientos y fallas en las imágenes de satélite y radar, se ubicaron en ellas los volcanes activos e inactivos (Méndez, 1989, Flórez, 1986 y Ceballos et al, 1994), algunos yacimientos mineros (Ingeominas, 1980) y numerosas fuentes termales, descritas por Garzón (2001), tal como se observa en la FIGURA 9. Los volcanes se ubican en su gran mayoría sobre el eje de la Cordillera, muy cercanos a los lineamientos identificados en sentido N-S y NNE. Se observa además que las estructuras volcánicas están siendo limitadas al Norte por el lineamiento de Río Pocito que se extiende en sentido NW-SE y que cruza toda la cordillera de manera segmentada mientras que al sur están limitadas por las fallas Chapetón-Pericos e Ibagué. Dentro de este vulcanismo se diferencia un vulcanismo activo y otro inactivo reciente. El vulcanismo activo se enmarca dentro del complejo Machín - Cerro Bravo el cual comprende los volcanes Cerro Machín, Nevado del Tolima, Nevado del Santa Isabel, Nevado del Ruiz y Cerro Bravo (Méndez y Patiño, 2003), caracterizado por tener una composición variable entre andesitas y dacitas. Sus edificios volcánico extremos son el Cerro Machín, en cercanías de las fallas Chapetón Pericos e Ibagué que tienen direcciones NE-SW, en la parte sur de la zona estudiada y al norte de ésta, el Cerro Bravo en cercanías del lineamiento Brasil, cuya dirección es en sentido NW - SE. Otros volcanes al norte del anterior lineamiento son considerados como inactivos recientes, entre los cuales se destaca el Volcán Romeral que es un estrato volcán con una edad de aproximadamente 3 m.a. (Flórez, 1986).

Otras observaciones hechas nos permiten verificar que cerca de Manizales se encuentra la Falla Villa María-Termal, en sentido NW-SE, la cual tiene dentro de su extensión varios domos volcánicos y dos pequeños volcanes conocidos como Tesorito y Gualí, considerados volcanes freatomagmáticos andesíticos de edad plesitocena ($\cong 1.2$ m.a) (Thouret en Naranjo y Ríos, 1989)

De otro lado, se pudo ver que los volcanes Nevado del Ruiz y Paramillo de Santa Rosa se ubican sobre el lineamiento observado entre Armenia y Honda en sentido NE-SW, el cual luego se une con la Falla Santa Rosa al NE del Nevado del Ruiz. Estos dos trazos pueden ser considerados de gran importancia para el vulcanismo actual por la mayor concentración de fuentes termales y sismos tanto de origen tectónico como volcánico.

En cuanto a la ubicación del vulcanismo activo reciente, se ha visto una simetría espacial entre los volcanes del Complejo Machín - Cerro Bravo. Los volcanes más explosivos y más jóvenes son los volcanes extremos de la cadena, como son el Volcán Machín al sur, y el Volcán Cerro Bravo al norte, como se explicó anteriormente. Hacia el centro de la cadena volcánica siguen los volcanes más activos en la actualidad, Nevado del Ruiz y Nevado del Tolima; estos dos volcanes se encuentran muy equidistantes a los volcanes externos y entre sí. Luego, hacia el interior de los volcanes anteriores se encuentran el Nevado de Santa Isabel, el Paramillo del Quindío, el Paramillo del Cisne, Cerro España y el Paramillo de Santa Rosa, los cuales no presentan actividad volcánica actual. Esta simetría podría estar sugiriendo una disposición geométrica especial de las fallas dentro del sector mencionado y cambios en el buzamiento de la placa subducente a la altura de esta zona.

La mayoría de las fuentes termales ubicadas dentro del complejo volcánico Machín - Cerro Bravo, se asocian a los volcanes más activos de la cadena volcánica como son el Nevado del Ruiz, Nevado del Tolima, Cerro Machín, Cerro Bravo y a los diferentes trazos de fallas que pasan cerca a estos volcanes. La distribución de estas fuentes alrededor de los volcanes puede indicar las zonas de influencia de las cámaras magmáticas y sus posibles chimeneas. Las propiedades físico química de estas fuentes termales son diferentes en cada uno de los volcanes, siendo importante adelantar estudios detallados para diferenciar y comparar los parámetros que se tienen analizados hasta el momento y encontrar mejores relaciones entre la tectónica y el material magmático actual. Los demás volcanes que están hacia el norte son más antiguos y no presentan termalismo asociado. Adicionalmente se observó que muchas de las fuentes termales tenidas en cuenta en este estudio, están entre las Fallas Santa Rosa y el lineamiento denominado como Armenia- Honda.

En cuanto a los yacimientos minerales y prospectos mineros (Muñoz, 2002), en la parte norte del área, se encontró que estos se ubican en la zona de influencia del sistema de Fallas Silvia-Pijao y alineados sobre los trazos de fallas en sentido NW-SE entre la Falla Río Arma y el lineamiento de Río Pocito creando una franja mineralizada importante. Este sector se caracteriza también por ser la zona de mayor trituración y deformación que presenta el sistema de fallas de Silvia Pijao y por ser la zona en donde las fallas mayores de sentido N-S cambian su dirección a

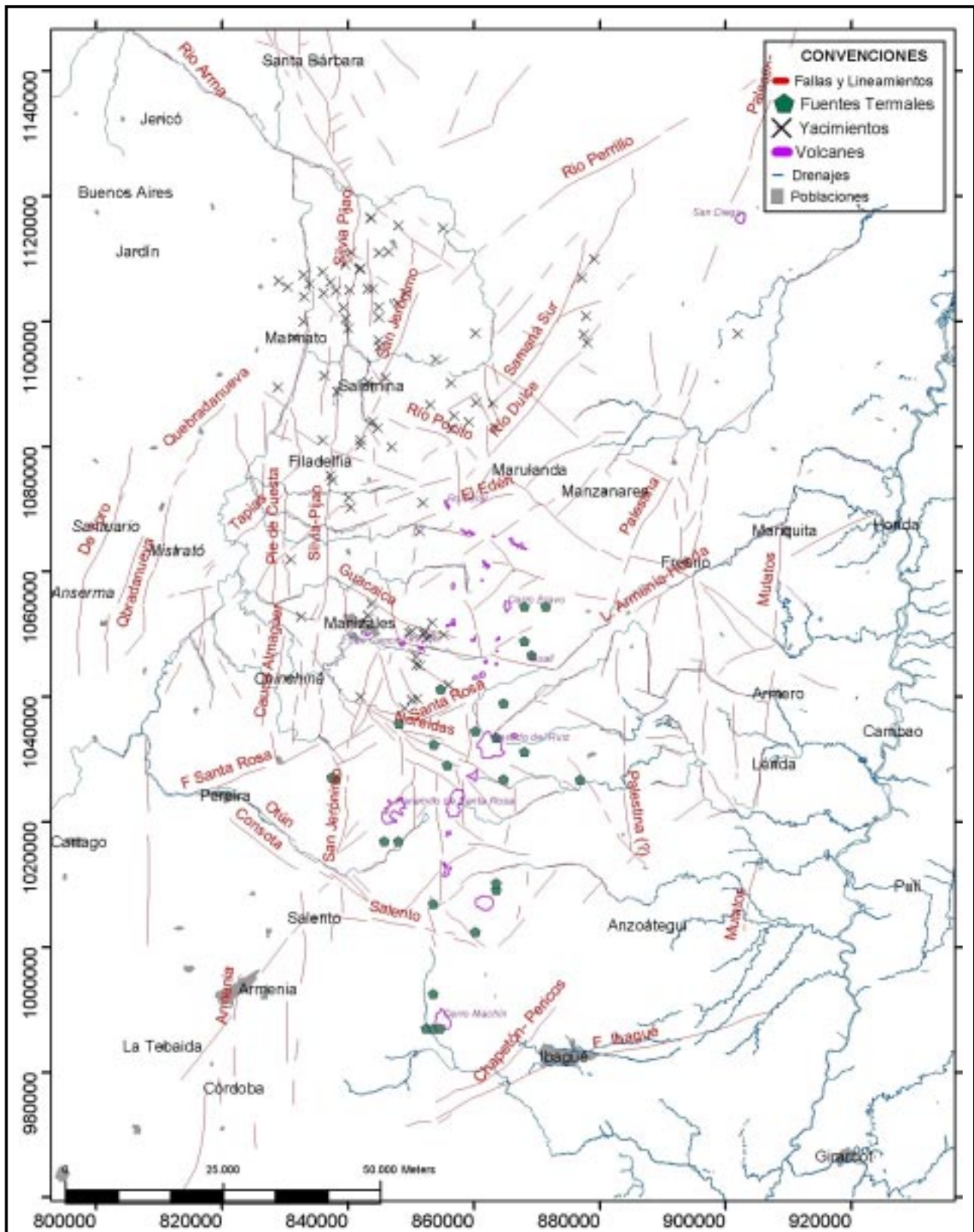


FIGURA 9. Distribución total de lineamientos y su posible relación con los volcanes, yacimientos minerales y fuentes Termiales.

NW-SE debido a la presencia de la Falla Río Arma. Es probable que estas estructuras mayores NW-SE sean indicativas de mayor concentración de mineralizaciones y yacimientos por la mayor deformación y trituración de las rocas. Otra de las mineralizaciones presentes en el área se encuentra en cercanías a Manizales sobre el trazo de Villa Maria - Tarmales y el lineamiento Guacaica.

GEODESIA SATELITAL GPS

El uso de métodos geodésicos satelitales GPS provee mediciones directas de los desplazamientos debido al movimiento de las placas y deformación intra placa, información básica para el entendimiento de la cinemática de los movimientos. Las diversas estaciones GPS existentes en el país ofrecen medidas que permiten comparar la posición de cada sitio, analizando distancias de separación (líneas base) y obteniendo vectores de desplazamientos y velocidades (magnitud y orientación). Estos datos permiten identificar movimientos dominantes y algunos vectores con comportamiento inesperado que pueden dar información sobre límites de microbloques representados por fallas profundas.

Los datos de campo obtenidos en las diversas campañas de GPS han sido procesados empleando el software GIPSY OASIS II (GPS Inferred Positioning System Orbit Analysis And Simulation Software), el cual fue desarrollado por JPL/NASA. Todos los datos han sido analizados tomando en consideración además una red de estaciones GPS de rastreo permanente.

El vulcanismo activo e inactivo dentro de la zona de estudio está caracterizado por ser principalmente de tipo andesítico – dacítico y se encuentra limitado entre dos estructuras tectónicas mayores con direcciones N60W (Lineamiento Río Pocito) y N40E (Falla Ibagué), mientras que en el sentido E-W se restringe a una franja angosta entre las fallas Silvia Pijao al oeste y Palestina al este, sobre el eje de la Cordillera Central principalmente (FIGURA 7). Esta zona se ha considerado como una cuña o microbloque para el cual se hicieron cálculos de vectores de velocidad en diferentes estaciones ubicadas dentro y fuera de la hipotética cuña en que se asienta el vulcanismo; esto para identificar si esta zona presenta algún comportamiento especial. Los cálculos se realizaron dejando fija una de las estaciones, obteniendo los desplazamientos relativos de las demás estaciones con respecto a ella (TABLA 3). En la FIGURA 10 se presentan los vectores de velocidad dejando la estación de Villavicencio fija. Se puede observar que los vectores de las demás estaciones, exceptuando una, presentan un comportamiento similar sugiriendo que pertenecen a un mismo bloque con respecto a Villavicencio. Se identifica éste, como parte del bloque Andino ya que la estación fija está fuera de él. El bloque Andino presenta un desplazamiento hacia el NE, resultado de la sumatoria de los esfuerzos generados por las diferentes colisiones entre éste y las placas de Nazca, Coiba, Caribe y el Bloque Panamá.

Cuando se calculan los desplazamientos teniendo en cuenta estaciones que se encuentran dentro del bloque Andino, se empiezan a identificar otros desplazamientos que podrían estar relacionados con fallas profundas y muy

TABLA 3. Vectores de velocidad calculados con respecto a diferentes estaciones:

ESTACION FIJA	VILLAVICENCIO¹		RIONEGRO⁴		MANIZALES⁵	
	Vel. Mm/ Año	rumbo	Vel. mm/ año	rumbo	Vel. mm/ año	rumbo
Bahía Solano	14	N64E	2	N49W	5	S12W
Bogotá	7	N57E	8	S83W	13	S16W
Buenaventura	8	N32E	10	N78W	13	S1W
Cali	15	N1E	14	N79W	18	N89W
Malpelo	54	N86E	40	E	36	S85E
Manizales	19	N68E	4.5	N58E		
La Tebaida	7	N65E	8	S76W	13	S70W
Pereira	12	N75E	3	S35W	7	S57W
Dosquebradas	5	N34W	17	S3W	21	S81W
Rionegro	15	N17E			4.5	S32W
Villavicencio			15	S19W	19	S68W

¹ Fuera del límite de la cuña propuesta y al posiblemente al exterior de la zona de falla del Borde Oriental Llanero.

⁴ Rionegro, Aeropuerto José Ma Córdova

⁵ Aeropuerto La Nubia

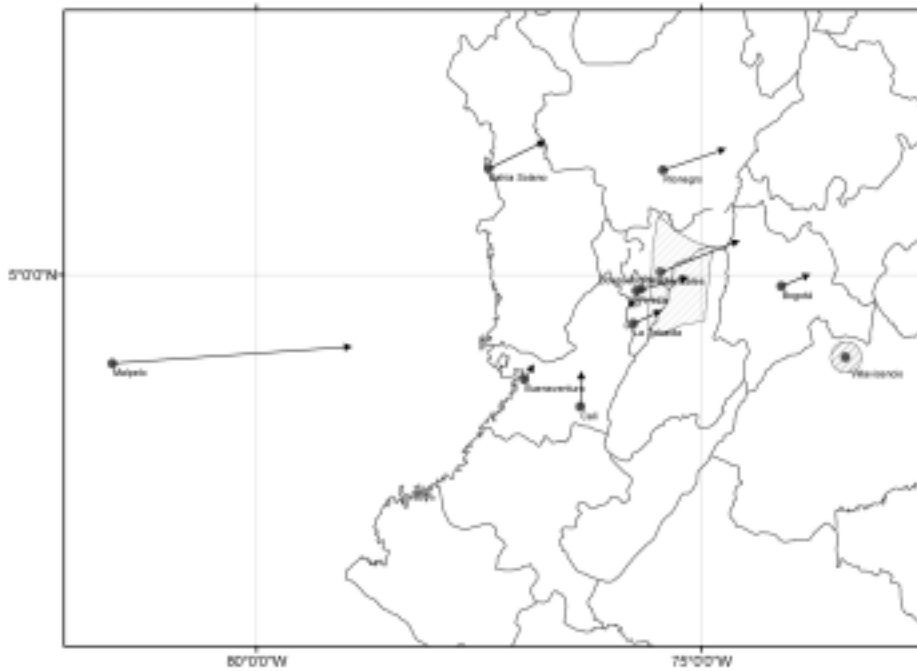


FIGURA 10. Velocidades relativas calculadas para las estaciones alrededor del micro bloque propuesto, teniendo como estación fija o de referencia a Villavicencio que se encuentra fuera del Bloque andino. Nótese la uniformidad en la tendencia NE de todas las estaciones.

determinantes en la geometría y distribución de los esfuerzos en el ámbito cortical. Este es el caso que se observa en los resultados obtenidos con las estaciones fijas de Manizales y Rionegro (FIGURA 11a, 11b). Cuando Manizales esta fija lo importante a observar es que las demás estaciones a su alrededor tienen un movimiento relativo notorio con respecto a ella, mostrando que se encuentran en bloques diferentes al de la estación fija, dadas las condiciones tectónicas en su entorno. Es claro que Pereira y Dosquebradas, estaciones que muestran desplazamientos relativos notables en dirección aproximadamente SW con respecto a Manizales, se encuentran en un bloque distinto al de esta ciudad. Así, lo más probable es que las separe la Falla de Santa Rosa o el sistema de fallas de Silvia-Pijao, de acuerdo a las observaciones de las fallas y lineamientos presentes en la zona que pueden servir de límites de los bloques propuestos. Dada su contundencia, se plantea que el trazo principal de Silvia-Pijao sea el límite divisorio.

Igualmente el movimiento relativo de la estación de La Tebaida, presenta un comportamiento similar a las anteriores estaciones, o sea mostrando un desplazamiento SW con respecto a Manizales y además también se encuentra separada de esa ciudad por el sistema de Silvia-Pijao. Si se observa el movimiento relativo entre los

supuestos bloques donde están Manizales y las tres estaciones mencionadas, se infiere que el bloque donde está Manizales se desplaza en dirección NE, mientras el otro bloque lo hace en dirección SW como ya se mencionó. Este movimiento resultante al descomponerlo, se encuentra que presenta en la horizontal un componente de extensión y en la vertical una componente que es consistente con un comportamiento sinestro-lateral, tal como se espera que sea el carácter de la Falla Silvia-Pijao en esta zona. De otro lado, si tomamos como límite sur de la cuña propuesta, a la Falla de Ibagué, el movimiento resultante general (NE) del bloque donde está Manizales, también es concordante con el carácter de esta falla, o sea dextro-lateral, sugiriendo que la Falla de Ibagué pudiera ser otro límite de la cuña propuesta. Ahora, la estación de Rionegro, igualmente se desplaza relativamente con respecto a Manizales, pero a diferencia de las otras tres estaciones comparadas está en el mismo bloque de la Falla Silvia-Pijao y de Manizales. Allí aparecen entonces, las fallas y lineamientos con orientación NW-SE, como posibles discontinuidades. La Falla de Río Arma o el lineamiento de Río Pocito (el cual limita el vulcanismo activo) podrían ser los límites superiores de este bloque, siendo el más probable la Falla Río Arma por su extensión y por ser la falla que cambia el sentido a las estructuras mayores N-S (FIGURA 11a).

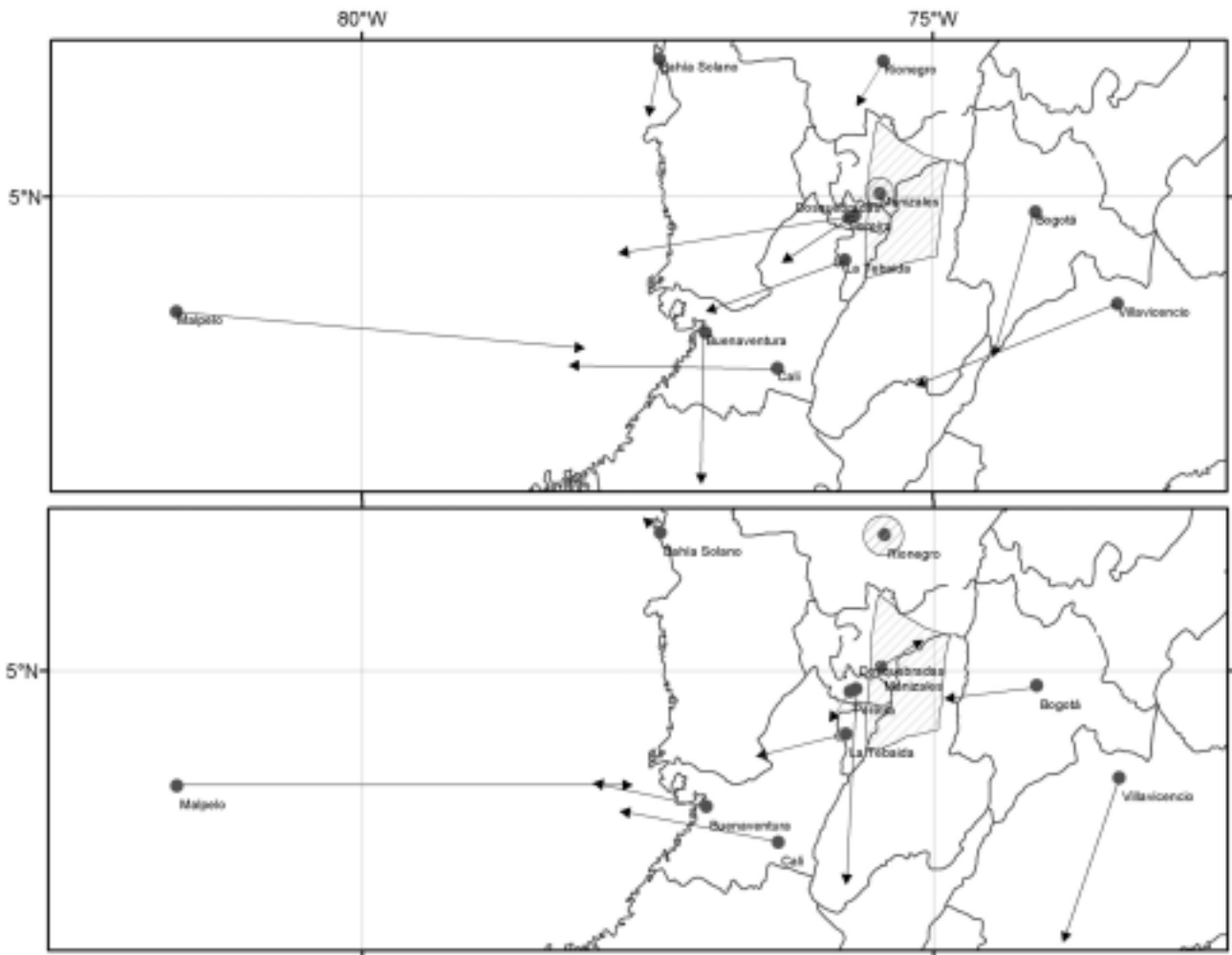


FIGURA 11. Velocidades relativas calculadas para las estaciones que se encuentran cercanas a la zona de influencia del microbloque propuesto. (a) estación fija Manizales. (b) estación fija Rionegro.

Cuando se fija la estación de Rionegro se puede observar en general una confirmación de lo anterior, en el sentido de que Manizales se desplaza en dirección diferente a Pereira, Dosquebradas y La Tebaida, conservando la dirección relativa discutida antes e igualmente se confirma el movimiento relativo entre Manizales y Rionegro (FIGURA 11b). Para constreñir la hipótesis planteada, se deben realizar suficientes mediciones en las áreas inmediatamente aledañas a la cuña propuesta y al interior de ésta.

DISCUSIÓN

El primer punto de análisis se refiere a las estructuras mayores que fueron identificadas con las imágenes de radar y satélite, las cuales se relacionaron con las fallas

ya definidas y que en la mayoría de los casos pueden ser estructuras heredadas de anteriores regímenes de esfuerzos en la zona. Al observar el diagrama rosa de las longitudes acumuladas se observa cómo las tendencias dominantes están obedeciendo a un régimen deformativo específico. Tanto los datos que suministran información del estado actual de esfuerzos (sismología, geodesia, termalismo), como aquellos que suministran información del estado reciente de esfuerzos (datos microestructurales, geológicos, vulcanológicos) nos indican que esas estructuras mayores se han reactivado siguiendo las nuevas condiciones que genera el régimen de esfuerzos actual, manteniendo de manera menos dominantes los anteriores movimientos.

Adicionalmente, de acuerdo a algunos experimentos de laboratorio para ambientes de fallas en rumbo en donde

se presentan zonas transpresivas y transtensivas, se pueden obtener diferentes tipos de estructuras tectónicas complementarias (Schreurs & Colletta, 1998). De esta manera, se podría tener que dentro del régimen de rumbo actual (originado por la colisión de la placa Suramericana con el bloque Panamá – Chocó) las fallas orientadas en sentido aproximado N-S pueden estar acompañadas de otras fallas conjugadas, como son fallas oblicuas inversas en el sentido del movimiento de la falla en rumbo y fallas sintéticas sinestrales NW-SE. Las fallas con direcciones cercanas a E-W generan también conjugadas sintéticas que serán más o menos frecuentes dependiendo la mayor o menor velocidad de desplazamiento, es decir, a mayor velocidad en rumbo mayor cantidad de fallas sintéticas (p.e. Falla Ibagué) y a menor velocidad en rumbo será mayor la cantidad de fallas oblicuas inversas (Schreurs & Colletta, 1998), como en el caso de las fallas Silvia-Pijao, Cauca-Almaguer y San Jerónimo.

Como un segundo punto de análisis, se tiene que dentro de la zona donde se encuentra el vulcanismo activo y reciente en este sector del país, se propone la conformación de un microbloque o cuña que estaría limitado por las fallas Río Arma al norte, Ibagué al sur, Silvia – Pijao al occidente y Mulatos al oriente. Dentro de él se observa cómo hacia el oriente existe una zona con una fuerte actividad sísmica (zona sismogénica de Honda – Pulí), que se hace más notoria en las prolongaciones de los límites norte y sur del mismo bloque, siendo éste un factor determinante para definir el límite oriental del bloque. Otra información que indica esta zona como límite, es el acercamiento que se observa en los vectores obtenidos con GPS, entre Bogotá y Manizales, indicando un posible sobrecabalgamiento del flanco occidental de la Cordillera Oriental sobre la Cordillera Central.

Adicionalmente, la Falla Silvia-Pijao se consideró también como límite, teniendo en cuenta los resultados hallados con las estaciones de GPS, los cuales muestran que Manizales se está desplazando en sentido NE, opuesto al sentido de las estaciones ubicadas en Pereira, Dosquebradas y La Tebaida (sentido SW) indicando que Manizales se está alejando de las otras ciudades. Al descomponer estos vectores de desplazamiento, se ve una componente N-S que refleja el comportamiento sinistral de la falla Silvia-Pijao, y una componente E-W que refleja un comportamiento extensivo, el cual podría estar asociado con una zona transpresiva en superficie, en la zona de la Falla Silvia-Pijao. Algunos datos que ayuden a confirmar este límite y su comportamiento son

los resultados hallados en estudios sobre el sismo del Quindío de 1999, cercano a esta estructura, cuyo tensor de esfuerzos calculado con las réplicas presentó un régimen en rumbo sinestrolateral (Bohórquez et al., 2001, Monsalve, 2001).

Dado el movimiento del microbloque planteado (sentido NE), el cual genera en su extremo occidental un régimen distensivo local y superficial, en el sistema de fallas de Silvia-Pijao se generan zonas transtensivas asociadas con cuencas de tracción con subsidencia, tales como el abanico del Quindío y las cuencas Otún – Chinchiná y Norte de Manizales – Filadelfia (Naranjo, 2001). Se sugiere que los datos que muestran extensión pueden estar asociados con una deformación más superficial.

El comportamiento sinistral identificado con los datos de GPS, muestra cómo en superficie se está reflejando el comportamiento de rumbo dominante a profundidad. De acuerdo con los vectores de desplazamiento obtenidos con GPS, los límites del microbloque en cuestión presentan al norte una falla de tipo sinistral (Falla Río Arma) y al sur una falla de tipo dextral (Falla Ibagué). Adicionalmente el movimiento dextral de la falla de Ibagué es coherente con el tensor de esfuerzos regional, mientras que el comportamiento de la Falla Río Arma es coherente con los estudios referidos, más no con el tensor regional aplicado a esta zona. Esto podría estar mostrando una asociación con otro régimen de esfuerzos aplicado a la zona norte del país (Taboada et al., 2000).

Datos como la presencia del vulcanismo en el eje de la cordillera, la presencia de un termalismo asociado a las estructuras volcánicas más recientes, la presencia de un tensor de esfuerzos de carácter distensivo (Bohórquez et al., 2001) en estructuras cercanas al eje de la cordillera están indicando un régimen distensivo local que podría asociarse a procesos de “un combamiento” asociado al levantamiento de la cordillera.

Finalmente, se observa que existen estructuras como el lineamiento Armenia – Honda que se cruza hacia el Nevado del Ruiz con la falla de Santa Rosa, la cual podría ser una estructura tectónicamente independiente y no parte de la falla de Palestina. En este trabajo se sugiere que esta última debe continuar hacia el sur, mostrando un rumbo cercano N-S debido a la segmentación que sufre la falla al pasar por la prolongación de la Falla Río Arma (NW-SE).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Dentro del área de estudio de aproximadamente 10.000 km² y con base en los datos de la red sismológica del OVSM, se identificaron alrededor de 9 sismofuentes de carácter tectónico, inferidas de acuerdo con algunas tendencias generales de las Fallas presentes en la zona y que son diferentes a las relacionadas con la actividad de los volcanes. Las sismofuentes más claras son: fuente Honda-Pulí, Ibagué-Chapetón, Quindío, Anzoátegui, Santa Isabel, Palestina (Fresno), San Jerónimo, Silvia-Pijao Norte y Silvia-Pijao Sur.

Aparentemente existe un microbloque o cuña, en donde se ubica el vulcanismo reciente, limitado por las fallas de Silvia-Pijao al occidente, Río Arma al norte, Ibagué al sur y por la fuente sismogénica Honda - Pulí al oriente.

Las fuentes termales están claramente asociadas con el área de influencia de los volcanes activos, entre Cerro Bravo y Cerro Machín.

Los yacimientos minerales existentes en la zona, se encuentran asociados con las fallas N-S del flanco occidental como son las Fallas de San Jerónimo, Fallas del sistema de Silvia-Pijao y Cauca Almaguer y con algunas de las fallas NW-SE como fallas Río Arma, Lineamiento Río Pocito, Villa María Termales y Guacaica.

Las Fallas y lineamientos dominantes en el área son las estructuras N-S $\pm 15^\circ$, con una longitud acumulada de 364 km dentro del área de estudio, las cuales presentan de acuerdo a la bibliografía revisada, un dominio en comportamiento de Fallas inversas con componente sinistral.

Se propone que la Falla de Palestina se prolonga hacia el sur. Esta hipótesis se sustenta con los indicios observados como son la presencia de ganchos de flexión y valles lineales alineados N-S y numerosos cauces que corren en dirección W-E, deflectados en sentido N-S. Son necesarios estudios más detallados que permitan identificar evidencias suficientes que sustenten esta hipótesis.

El lineamiento Armenia - Honda que se une con la Falla Santa Rosa y que cerca de la laguna del Otún se reconoce como Falla Otún, debe ser estudiada en detalle para lograr su caracterización y encontrar las evidencias que ayuden a sustentar el modelo propuesto. De este lineamiento se esperaría un comportamiento de falla dextral.

Es importante la profundización y ampliación de estudios sísmicos, geodésicos, geofísicos, fisicoquímicos y morfotectónicos para incrementar el conocimiento de una zona tan compleja, caracterizada por una importante actividad sísmica y volcánica, la cual afecta una gran región del país.

REFERENCIAS

Arcila, M.; Muñoz, M.; De Vicente, G. (2002). Análisis sismotectónico de la convergencia Caribe, Nazca, Suramérica. 1 Seminario de Sismología, CD-ROM, Bogotá.

Atehortúa F.; Gutiérrez G. (2003). Análisis estructural de las rocas aflorantes en los alrededores de la Falla Silvia-Pijao al oeste de Manizales. Tesis pregrado, Universidad de Caldas, CD-ROM. Manizales.

Bohórquez, O. P., Gil-Cruz, F., Ospina, L. (2001). Sismo del Quindío del 25 de enero de 1999. Tensor de esfuerzos preliminar y estudio de réplicas. Revista Horizontes Naturales No. 4 Ene -Dic de 2001. Universidad de Caldas. Manizales.

Bohórquez, O. P., Patiño, J. (2001). Comportamiento sísmico del sistema de Fallas de Silvia-Pijao en el departamento de Caldas. Rev. R.S.R.E.C., Manizales, Vol. 6, pp. 38-42.

Bohórquez, O. P.; González, L.; Jaramillo, M. (2001). Estudio Neotectónico Multidisciplinario. Caso de Estudio: Falla Villa María Termales. VIII Congreso Colombiano de Geología. CD ROM. Manizales.

Caballero, H.; Zapata, G. (1983). Mapa Geológico de la plancha 224. Ingeominas. Bogotá

Calle, B.; González, H.; De La Peña, R.; Escorce, E.; Durango, J., (1980). Mapa Geológico de las planchas 166 y 186. Ingeominas. Bogotá.

Ceballos, J.; Castañeda, A.; Roberson, K. (1994). Análisis geodinámico de la actividad volcánica de Colombia. 3ª Conferencia Colombiana de Geología Ambiental, Armenia, Tomo I, pp. 93-119.

Escobar, M. M. (2002). Segmentación de la Falla de Romeral con base en estudios existentes. Tesis de Pregrado. Universidad Nacional de Colombia Seccional Medellín, 240 p.

- Estrada, J. J., Viana, R. (1998). Mapa Geológico de la plancha 205. Ingeominas.
- Flórez, M. (1986). Geomorfología del área de Manizales - Chinchiná. Cordillera Central de Colombia. En: Análisis geográfico IGAC. Bogotá, Vol. 9, 159 p.
- Garzón, G. (2001). Catálogo de Fuentes Termales del Parque Nacional Natural de los Nevados. Ingeominas. Informe Inédito.
- González, H. (1980). Geología de las planchas 167 (Sonsón) y 187 (Salamina). En: Boletín Geológico. Ingeominas. Bogotá, Vol. 23, N° 1, pp. 1-174.
- Guzmán G., J., Franco, G., Ochoa, M. (1998). Proyecto para la mitigación y el riesgo sísmico de Pereira, Dosquebradas y Santa Rosa. Evaluación neotectónica. CARDER. Pereira, 144 p.
- Hall, M.; Wood, C. (1985). Volcano-tectonic segmentation of the northern Andes: *Geology*, Vol. 13 No.3, pp. 203-207.
- Hincapie, J. O. (1994). Un modelo de convergencia de placas para el noroccidente suramericano con base en datos sismológicos. Tesis pregrado, Universidad Nacional Medellín, 103 p.
- Ingeominas (2001). Planchas 205,206,225 Chinchiná, Manizales, Nevado del Ruiz Escala 1: 100.000. Memoria explicativa. CD ROM, Bogotá
- James, M. (1986). Estudio Tectónico en el área del Viejo Caldas. Ingeominas, Medellín. Informe interno, 113 p.
- Lee, W. H. K., Lahr, J. C. (1975). HYPO71PC (revised): A computer program for determining hypocenter, magnitude, and first motion pattern of local earthquakes. U. S. Geo. Surv. Open-File Rep., pp. 75-311.
- Mc Court, W.; Mosquera, D.; Nivia, A.; Núñez, A. (1984). Mapa Geológico de la plancha 243. Ingeominas, Bogotá.
- Méndez, R. (1989). Catálogo de los volcanes activos de Colombia: Ingeominas, Boletín Geológico, Bogotá, Vol. 30, No.3, pp. 1-75
- Méndez, R., Patiño, J. (2003). El Complejo Volcánico Cerro Bravo – Cerro Machín. IX Congreso Colombiano de Geología, Medellín, Resúmenes, 140 p.
- Monsalve, H. (1998). Geometría de la Subducción de la placa Nazca en el Norte de Colombia. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de México, 107 p.
- Mosquera, D.; Núñez, A.; Vesga, C. (1982). Mapa geológico de la plancha 244. Ingeominas. Bogotá.
- Muñoz, F. (2002). Fotointerpretación neotectónica del sistema de Fallas de Silvia-Pijao entre Chinchiná y Medellín. Ingeominas. Informe Interno.
- Naranjo, J. L. (2001). Modelo de evolución morfotectónica del sistema de fallas de Romeral entre pereira (Risaralda) y Filadelfia (Caldas). VIII Congreso Colombiano de Geología. CD ROM. Manizales.
- Naranjo, J. L., Rios, P. A. (1989). Geología de Manizales y sus alrededores y su influencia en los riesgos geológicos. *Revista Universidad de Caldas, Manizales*, Vol 10, Nos. 1-3, 113 p.
- Pennington, W. D. (1979). The subduction of the eastern Panamá Basin and the seismotectonics of northwestern south América. Tesis doctoral, University Wisconsin Madison, 108 p.
- Pennington, W. (1981). Subduction of the eastern Panama basin and seismotectonics of northwestern South America: *Journal of Geophysical Research*, Vol. 86, No. B11, pp. 10753-10770.
- Schreurs, G.; Colletta, B. (1998). Analogue modelling of faulting in zones of continental transpression and transtension. En: Holdsworth, R.E., Strachan, R. A. & Deway, J. F. (eds). *Continental Transpressional and transtensional Tectonics*. Geological Society, London, Special Publications, 135, pp. 59-79.
- Taboada, A., Rivera, L.A., Fuenzalida, A., Cisternas, A., Philip, H., Bijwaard, H., Olaya, J., Rivera, C. (2000). Geodynamics of the Northern Andes: Subductions and Intra-Continental deformation (Colombia), *Tectonics*, Vol. 19(5), pp. 787-813.
- Van Der Hilst, R.; Mann, P. (1994). Tectonic implications of tomographic images of subducted lithosphere beneath northwestern South America. *Geology*, Vol. 22, pp. 451-454.

Trabajo recibido: julio 16 de 2004

Trabajo aceptado: septiembre 6 de 2004