

REPUBLICA DE COLOMBIA
MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN GEOCIENCIAS, MINERIA Y QUIMICA
INGEOMINAS

**DEFORMACION SISMICA EN LAS ZONAS SISMOACTIVAS
DE CHOCO Y EL "NIDO" DE BUCARRAMANGA
(COLOMBIA)**

Por:

ELKIN SALCEDO HURTADO

CONTENIDO

RESUMEN	52
ABSTRACT	52
1. INTRODUCCION	52
2. METODOLOGIA	53
3. DATOS UTILIZADOS	55
4. RESULTADOS Y DISCUSION	59
4.1. PROCESO DE DEFORMACION EN LA ZONA DEL CHOCO	59
4.2. PROCESO DE DEFORMACION EN LA ZONA DEL "NIDO" DE BUCARAMANGA	61
5. CONCLUSIONES	64
AGRADECIMIENTOS	64
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	64

TABLAS

TABLA 1. Mecanismo de terremotos fuertes ($m_b \geq 5.3$) ocurridos en el territorio colombiano en el período 1960 - 1979	56
TABLA 2. Componentes del tensor de momento sísmico para fuertes terremotos ($m_b \geq 5.3$) ocurridos en el territorio colombiano en el período 1960 - 1979	57

FIGURAS

FIGURA 1. Relaciones magnitud - momento sísmico obtenidas en el territorio colombiano. (a) - Para magnitudes de las ondas volumétricas m_b , (b) - Para magnitudes de las ondas superficiales M_s	58
FIGURA 2. Mapa Sismotectónico de Colombia	60
FIGURA 3. Variación de la velocidad media de deformación con el tiempo en las zonas sismoactivas de Chocó (a), y del "Nido" de Bucaramanga (b)	63

RESUMEN

En el presente trabajo se estudia la deformación sísmica producida por fuertes terremotos en las zonas sismoactivas de Chocó y el «Nido» de Bucaramanga en el territorio colombiano. Basados en los datos sobre mecanismos focales se calculan los tensores de momento sísmico y de velocidad media de deformación para ambas zonas. El análisis de estos tensores establece, que en estas dos zonas predomina un proceso de deformación compresiva en dirección Oeste - Este, con una velocidad media aproximadamente de *6.5 cm/año* para la zona del Chocó y aproximadamente *1.7 cm/año* para la zona del "Nido" de Bucaramanga. Además, fue calculada la velocidad media de deformación por año para ambas zonas sismoactivas; los resultados más representativos son para la zona del Chocó; en ella se observa que la velocidad media de deformación dentro del período de estudio decae fuertemente en los años 1965 y 1978, fenómeno que se puede relacionar con la ocurrencia de dos fuertes terremotos uno en 1970 ($m_b = 6.0$) y el otro en 1979 ($m_b = 6.4$). Esto demuestra que la variación de la velocidad media de deformación en una zona sismoactiva determinada precede a un fuerte terremoto.

ABSTRACT

Seismic deformation of the Chocó and Bucaramanga zones, produced by earthquakes in the Colombian territory is studied. Based on fault plane solutions, both seismic moment and strain rate tensor for Chocó and Bucaramanga seismoactive zones were computed. West - East compressive strain rates of *6.5 cm/yr.* approx. for Chocó seismoactive zone and of about *1.7 cm/yr.* for Bucaramanga seismoactive zone were found. The history of the seismic strain rate shows that the strain in Chocó strongly declined during 1965 and 1978. These two minima were followed by strong earthquakes in 1970 ($m_b = 6.0$) and 1979 ($m_b = 6.4$). This result allows us to consider the seismic strain rate method reliable enough to forecast strong earthquakes.

1. INTRODUCCION

Los terremotos resultan del proceso de deformación tectónica de una región sismoactiva. El estudio del proceso de deformación local y regional en el tiempo conduce no sólo a revelar las particularidades de la sismicidad de la región, sino que también representa un método efectivo para el pronóstico de terremotos catastróficos (RISNICHENKO y otros, 1977).

Una de las manifestaciones del desarrollo reciente de los procesos de deformaciones tectónicas es el flujo sísmico de la masa rocosa, que es condicionado por los movimientos de las rupturas en los lugares de focos de terremotos (RISNICHENKO, 1965a; KASTROV, 1975). El concepto de flujo sísmico de la masa rocosa se entiende como la parte del movimiento por deformación tectónica que produce los desplazamientos en los focos de terremotos. Realmente, la región focal de terremotos fuertes se observa en grandes volúmenes de la corteza terrestre y el manto superior. Es conveniente recordar, que el movimiento sísmico no describe completamente el proceso de flujo de

masa rocosa, puesto que de este se excluyen los procesos disipativos, tales como fricción y "creep", que son observados por otros métodos.

Para establecer la tendencia de la deformación tectónica predominante en un elemento de volumen de la masa rocosa, es necesario realizar un análisis estadístico de los mecanismos de los terremotos (RISNICHENKO, 1965b). Esta técnica fue utilizada para la interpretación de datos sísmológicos registrados en regiones como el Caucaso (RISNICHENKO y DZIBLADZE, 1976; DZIBLADZE, 1982), en la zona del rift de los Baikales (RISNICHENKO y otros, 1977), en el sur del Asia Central (RISNICHENKO y otros, 1982). Este método también obtuvo amplia difusión especialmente en los trabajos sobre tectónica global de placas y arrojó magníficos resultados para zonas de subducción y de fallas transformantes (MINSTER and JORDAN, 1978; MEZCUA y otros, 1991).

En el presente trabajo se aplica el método de Risnichenko, adecuado por KASTROV, (1974; YUNG, 1979), para determinar las velocidades de los procesos de deformación predominantes en las zona de Chocó y el "Nido" de Bucaramanga en el territorio colombiano.

2. METODOLOGÍA

El momento sísmico se define como:

$$M_0 = \mu US \quad (1)$$

donde μ - módulo de rigidez del medio, U - desplazamiento medio de la falla durante el terremoto y S - área de ruptura. Para un conjunto N de terremotos, la suma de los desplazamiento medios en la falla es igual a:

$$U = \frac{\sum_{i=1}^N M_0}{\mu S} \quad ; i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

Ahora, si la sumatoria se realiza en un intervalo de tiempo ΔT , que sobrepase el período de frecuencia de ocurrencia de fuertes terremotos para la región dada, entonces la velocidad relativa de desplazamiento de los bloques en la zona de falla se define como:

$$\dot{U} = \frac{\sum_{i=1}^N M_0}{\mu S \Delta T} \quad (3)$$

La expresión (3) es conocida como velocidad de flujo sísmico (KASTROV, 1974; RISNICHENKO, 1985).

Por otro lado, las componentes de los desplazamientos u, v, w para los ejes x, y, z pueden ser representadas de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} u &= e_{11}x + e_{12}y + e_{13}z + a \\ v &= e_{21}x + e_{22}y + e_{23}z + b \\ w &= e_{31}x + e_{32}y + e_{33}z + c \end{aligned} \quad (4)$$

onde x, y, z representan las coordenadas cartesianas del elemento de volumen, relacionadas con las geográficas, de tal manera, que el eje " x " se oriente hacia el Norte, el eje " y " hacia el Este, el eje " z " hacia el centro de la Tierra; a, b, c son constantes.

El tensor de deformación puede ser representado en forma de matrices, así:

$$\left\| \varepsilon_{ij} \right\| = \begin{pmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \end{pmatrix} = \left\| a_{ij} \right\| + \left\| w_{ij} \right\| \quad (5)$$

donde;

$$\left\| a_{ij} \right\| = 1/2 (\varepsilon_{ij} + \varepsilon_{ji}) \quad \text{- Parte simétrica del tensor deformación; y}$$

$$\left\| w_{ij} \right\| = 1/2 (\varepsilon_{ij} - \varepsilon_{ji}) \quad \text{- Parte antisimétrica del tensor de deformación, que define la rotación del volumen como un todo.}$$

$$\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33} = \frac{\Delta V}{V} \quad \text{- Cambio relativo del volumen o dilatación cúbica.}$$

Cuando ocurre un claro deslizamiento la dilatación cúbica es igual a cero y la deformación se describe por el deviatorico del tensor.

Considerando que los gradientes de las componentes de los desplazamientos en el medio no son tan grandes, pasamos de la deformación en un punto (el cual no tiene sentido físico) a la deformación media de un volumen. La magnitud de la velocidad media de deformación del volumen puede ser definida por medio de la relación:

$$\dot{\bar{\varepsilon}} = \frac{1}{2\mu\Delta V\Delta T} \cdot \sum_{k=1}^N M_{ij}^k \quad (6)$$

donde M_{ij}^k - tensor de momento sísmico de cada terremoto k ($k = 1, 2, \dots, N$) ocurridos

en el volumen ΔV y el tiempo ΔT . Las componentes del tensor de momento sísmico se definen a partir del mecanismo focal de los terremotos y están dadas por (AKI and RICHARDS, 1980):

$$\begin{aligned}
 M_{xx} &= -M_o(\text{sen}\delta \cos\lambda \text{sen}2\varphi + \text{sen}2\delta \text{sen}\lambda \text{sen}^2\varphi) \\
 M_{xy} &= -M_o(\text{sen}\delta \cos\lambda \cos2\varphi + 1/2 \text{sen}2\delta \text{sen}\lambda \text{sen}2\varphi) = M_{yx} \\
 M_{xz} &= -M_o(\cos\delta \cos\lambda \cos\varphi + \cos2\delta \text{sen}\lambda \text{sen}\varphi) = M_{zx} \quad (7) \\
 M_{yz} &= M_o(\text{sen}\delta \cos\lambda \text{sen}\varphi - \text{sen}2\delta \text{sen}\lambda \cos^2\varphi) \\
 M_{yz} &= -M_o(\cos\delta \cos\lambda \text{sen}\varphi - \text{sen}\delta \text{sen}\lambda \cos\varphi) = M_{zy} \\
 M_{zz} &= M_o \text{sen}\delta \text{sen}\lambda
 \end{aligned}$$

donde M_o - momento sísmico escalar; φ , δ , λ - rumbo del plano de falla, buzamiento y deslizamiento respectivamente.

3. DATOS UTILIZADOS

Para el análisis del proceso de deformación se eligen zonas de tamaño considerable, que permitan describir las particularidades estructurales locales, de tal manera que la investigación sea representativa.

Un análisis del mecanismo focal de terremotos fuertes ($m_b \geq 5.3$) ocurridos en el territorio colombiano para el período 1960 - 1979 fue realizado por Salcedo (1992). Para este período, el autor analizó en total 39 terremotos utilizando para la solución del mecanismo, el signo de las primeras llegadas de las ondas volumétricas longitudinales P en las estaciones de la Red Sismológica Internacional, obtenidos de los boletines del Centro Sismológico Internacional (ISC), utilizando una proyección de la semiesfera inferior en la red de Wulff. Los ángulos de incidencia de las ondas sísmicas en la fuente sísmica se escogieron en correspondencia con las curvas tiempo-distancia de Jeffry-Bullen. Los planos nodales fueron descritos por tres ángulos: El azimut φ° medido en el sentido de las manecillas del reloj; el buzamiento δ° medido desde el horizonte; y el ángulo de deslizamiento λ° , que define la dirección de la ruptura en el plano de falla; éste se mide también desde la horizontal y es positivo si el foco es de tipo inverso y negativo si el foco es de tipo normal. Las soluciones dadas se muestran en la Tabla 1. Con base en estos resultados de mecanismos focales se calcularon las componentes del tensor de momento sísmico, según las ecuaciones (7).

El momento sísmico M_o de los terremotos utilizados en el presente estudio se ha obtenido de las fórmulas empíricas, que establecen la relación entre este y las magnitudes, las cuales se muestran en la Tabla 2. Para diferentes regiones esta relación será diferente. En nuestra distribución fue insuficiente la cantidad de datos del momento sísmico, para definir una relación particular para cada una de las regiones sismoactivas, por tal razón se obtuvo una relación general para todo el territorio colombiano. Estas se muestran gráficamente en la figura 1. Utilizando una aproximación lineal mediante el método de mínimos cuadrados se obtuvo:

$$M_o = (1.57 m_b - 7.95) * 10^{25}$$

Tabla 1. Mecanismo de terremotos fuertes ($mb \geq 5.3$) ocurridos en el territorio colombiano en el período 1960 - 1979. (SALCEDO E., 1992)

Fecha	Coordenadas			magn.	Eje de Compresión P		Eje de Dilatación T		Planos Nodales							
	d	m	a		ϕ° (N)	λ° (W)	h (km)	mb	ϕ°	δ°	ϕ°	δ°	ϕ°	δ°	λ°	ϕ°
26 02 65	6.9	73.0	146	5.5	298	35	44	20	348	80	-42	87	49	-167		
30 07 65	6.8	72.9	170	5.4	78	1	347	45	133	58	+35	23	61	+126		
11 09 66	6.8	72.9	158	5.8	87	10	349	35	134	57	+19	33	74	+147		
21 03 67	6.8	73.0	161	5.5	117	3	22	66	186	46	+57	48	53	+121		
29 07 67	6.8	73.0	161	6.0	230	37	115	30	174	86	-52	79	40	-173		
07 05 68	6.7	73.0	168	5.7	181	11	87	18	314	84	+20	45	70	+173		
08 07 73	6.8	73.0	156	5.4	218	35	65	53	141	80	+103	269	16	+40		
23 03 77	6.8	73.0	164	5.4	210	18	101	44	330	74	+47	77	45	+157		
16 06 61	8.95	73.42	93	6.0	205	44	104	11	163	68	-42	54	51	-162		
18 02 62	8.13	74.82	0	6.1	312	5	220	33	82	70	+28	182	64	+158		
05 04 75	10.1	75.7	52	5.5	70	61	164	1	279	54	-128	47	50	-50		
03 12 70	7.4	76.1	38	5.6	307	40	56	21	358	79	-48	99	44	-164		
31 08 77	7.3	76.3	33	5.7	310	58	65	15	357	66	-59	122	38	-139		
24 08 74	4.3	76.9	84	5.7	105	13	4	38	229	74	+49	302	52	+160		
23 11 79	4.8	76.2	108	6.5	341	21	79	21	210	90	-150	120	59	0		
30 07 62	5.2	76.3	59	6.5	319	4	49	11	184	84	+11	94	80	+171		
19 09 60	6.97	77.44	0	6.0	303	24	83	60	20	70	+108	242	26	+50		
25 01 75	7.2	77.8	36	6.0	304	17	75	65	19	64	+110	239	32	+54		
16 02 78	5.5	77.0	24	5.4	248	51	120	27	190	75	-64	73	30	-150		
11 11 76	5.0	78.2	33	5.5	143	67	290	21	29	66	-102	183	27	-66		
16 09 73	5.2	78.0	33	5.5	349	13	250	27	32	60	+11	297	80	+151		
16 12 70	6.0	77.5	14	5.5	286	14	18	5	332	83	-14	63	76	-173		
24 04 73	5.0	78.1	50	6.4	55	54	136	20	3	70	-60	243	36	-146		
26 09 70	6.2	77.6	8	6.0	286	20	63	63	2	66	+108	222	30	+54		
27 09 70	6.4	77.4	8	5.8	304	44	66	28	2	80	-58	107	32	-162		
13 07 74	7.7	77.7	12	6.4	85	15	341	40	132	50	+21	28	74	+139		
13 07 74	7.4	77.7	45	5.5	181	7	84	48	302	63	+42	56	52	+146		
14 07 74	7.7	77.6	15	5.8	347	1	252	71	95	50	+64	239	46	+116		
21 11 75	7.5	77.6	36	5.8	239	10	142	36	287	57	+22	185	72	+146		
11 07 76	7.4	78.5	22	6.1	284	0	184	42	230	62	+148	337	61	+32		
11 07 76	7.4	78.1	3	6.2	282	13	32	56	46	42	+140	169	64	+57		
02 08 65	7.4	78.7	20	5.3	269	22	13	33	46	50	+170	143	82	+41		
10 08 76	2.1	79.0	33	5.4	278	27	74	61	30	21	+118	181	71	+80		
12 12 79	1.6	79.4	24	6.2	278	27	76	61	30	20	+118	181	71	+81		
03 04 73	4.7	75.6	158	6.1	339	35	63	7	21	72	-32	122	60	-160		
09 02 67	2.9	74.9	60	6.3	142	7	142	83	232	39	+90	52	51	+90		
27 09 74	2.7	71.0	43	5.5	75	25	299	57	182	74	+70	308	25	+111		
31 07 70	1.5	72.6	651	6.5	65	75	65	15	155	60	-90	335	30	-90		
27 01 70	7.5	72.1	22	5.6	217	28	306	1	258	71	-20	176	70	-160		

Tabla 2. Componentes del tensor de momento sísmico para fuertes terremotos ($m_b \geq 5.3$) ocurridos en el territorio colombiano en el período 1960 - 1979.

Fecha	Componentes del tensor momento sísmico						magnitud	Mo * * 10 ²⁵ din-cm	
d m a	M _{xx}	M _{xy}	M _{xz}	M _{yy}	M _{yz}	M _{zz}	m _b		Región
26 02 65	0.307	0.715	0.005	0.079	0.642	0.229	5.5	0.69	B/manga.
30 07 65	0.417	-0.005	0.479	-0.933	0.146	0.515	5.4	0.54	B/manga.
16 06 61	0.425	0.391	0.126	0.039	0.542	-0.465	6.0	1.48	Snder
11 09 66	0.396	-0.410	0.603	-1.162	-0.134	0.766	5.8	1.16	B/manga.
21 03 67	-0.091	0.470	0.373	-0.747	-0.011	0.838	5.5	0.69	B/manga.
29 07 67	0.129	0.623	-0.039	-0.019	-0.780	-0.110	6.0	1.48	B/manga.
07 05 68	0.897	-0.068	-0.309	-0.968	-0.162	0.071	5.7	1.01	B/manga.
08 07 73	-0.349	-0.372	0.606	0.015	0.736	0.333	5.4	0.54	B/manga.
23 03 77	0.471	0.160	-0.473	-0.858	-0.631	0.387	5.4	0.54	B/manga.
18 02 62	-0.524	-0.756	0.314	0.223	-0.249	0.302	5.6	0.85	Bolivar
05 04 75	-0.088	-0.411	0.379	0.842	-0.211	-0.754	5.5	0.69	Mar Car
03 12 70	0.046	0.645	-0.104	0.232	0.693	-0.278	6.1	1.64	Ant-Cho
31 08 77	0.051	0.050	-0.179	0.586	0.584	-0.637	5.7	1.01	Ant-Cho
16 02 78	-0.131	0.321	0.247	0.580	0.747	-0.449	5.4	0.54	Chocó
30 07 62	-0.136	0.964	0.089	0.096	0.193	0.039	6.5	2.27	Chocó
24 08 74	-0.862	0.110	-0.364	0.452	0.556	0.399	5.7	1.01	Chocó
23 11 79	0.749	-0.433	0.250	-0.749	-0.433	0.000	6.5	2.27	Chocó
19 09 60	0.115	-0.026	0.348	-0.726	-0.648	0.611	6.0	1.48	Chocó
11 11 76	0.332	-0.409	-0.243	0.395	-0.613	-0.727	5.5	0.69	Chocó
25 01 75	0.111	0.417	0.329	-0.851	0.498	0.740	6.0	1.48	Chocó
16 09 73	-0.810	0.409	-0.365	0.645	0.341	0.165	5.5	0.69	Chocó
27 09 70	-0.036	0.510	-0.120	0.326	0.793	-0.290	5.8	1.16	Chocó
16 12 70	0.811	0.563	0.006	-0.753	0.266	-0.059	5.5	0.69	Chocó
26 09 70	0.019	-0.257	0.329	-0.725	0.673	0.707	6.0	1.48	Chocó
24 04 73	-0.048	-0.039	-0.136	0.604	0.654	-0.0557	6.4	2.11	Chocó
13 07 74	0.516	-0.250	-0.399	-0.869	-0.404	0.353	6.4	2.11	Chocó
13 07 74	0.206	-0.533	0.155	-0.747	0.078	0.541	5.5	0.69	Chocó
14 07 74	-0.937	-0.484	-0.857	0.052	0.267	0.885	5.8	1.16	Chocó
21 11 75	0.122	-0.740	-0.293	-0.464	0.438	0.342	5.8	1.16	Chocó
11 07 76	0.159	0.330	0.333	-0.820	0.461	0.661	6.1	1.64	Chocó
11 07 76	0.465	0.354	-0.488	-0.914	-0.098	0.449	6.2	1.79	Chocó
02 08 65	0.653	0.509	0.463	-0.834	0.440	0.181	5.3	0.38	Chocó
10 08 76	-0.002	-0.110	-0.132	-0.589	0.787	0.591	5.4	0.54	Nariño
12 12 79	-0.039	0.166	0.044	-0.529	0.806	0.567	6.2	1.79	Nariño
09 02 67	-0.0607	0.474	-0.164	-0.371	0.128	0.978	6.3	1.95	Huila
03 04 73	-0.499	0.495	-0.398	0.811	0.306	-0.311	6.1	1.64	Caldas
27 09 74	-0.023	0.345	0.062	-0.474	0.799	0.499	5.5	0.69	Surorient
31 07 70	0.155	0.332	-0.211	0.711	0.453	-0.866	6.5	2.27	Surorient
27 01 70	-0.159	-0.0854	0.327	0.370	0.243	-0.211	5.6	0.85	Lim Ven

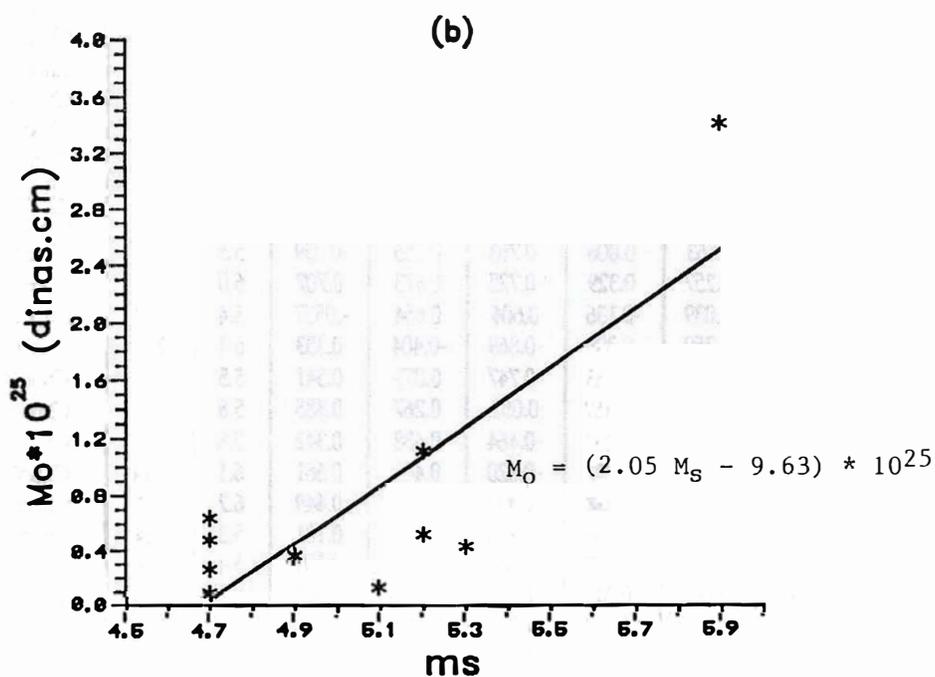
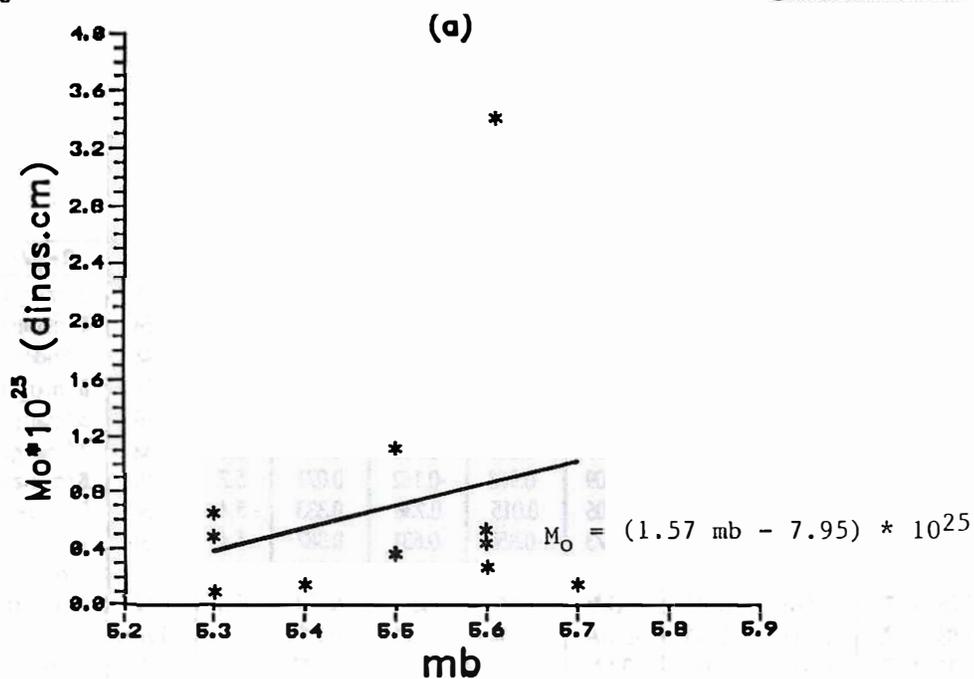


FIGURA 1. Relaciones magnitud - momento sísmico obtenidas en el territorio colombiano. (a) - Para magnitudes de las ondas Volumétricas mb, (b) - Para magnitudes de las ondas superficiales Ms

$$M_0 = (2.05 M_s - 9.63) * 10^{25}$$

donde, M_s - magnitud de las ondas superficiales. La relación aproximada entre m_b y M_s es:

$$m_b = 1.3 M_s - 1.07$$

La gran dispersión de los puntos que se nota en la figura 1 debe atribuirse por un lado a la escasez de datos obtenidos sobre el valor del momento sísmico para los terremotos ocurridos en el territorio colombiano y por otro a la gran complejidad tectónica del territorio, donde se generan sismos con mecanismos muy diferentes, ocasionando que en sismos con igual magnitud su momento sísmico varíe fuertemente; por esta razón, las relaciones descritas deben considerarse preliminares y exigen ser confirmadas en la medida que se acumulen más datos sobre el valor del momento sísmico, y deben ser determinadas para cada región sismoactiva en particular. Además, debe considerarse que pueden existir algunas debilidades en los propios valores de la magnitud empleados, ya que, como lo afirma A. Sarria, la evaluación de los epicentros y con mayor razón de los focos de los terremotos en Colombia es tan débil que se han detectado errores intolerables que afectan la evaluación de la magnitud (SARRIA, 1994 Comunicación Personal).

Las relaciones obtenidas están, sin embargo, de acuerdo con relaciones semejantes obtenidas para toda la Tierra en general (BRUNE, 1968). El tensor de deformación se obtuvo para las dos regiones de mayor actividad sísmica en el territorio colombiano, Chocó y el "Nido" de Bucaramanga (fig. 2).

4. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1. PROCESO DE DEFORMACION EN LA ZONA DEL CHOCO.

La zona sísmica del Chocó, en la cual los focos son superficiales (CORAL- GOMEZ, 1987; SALCEDO y otros, 1994), se limitó arbitrariamente entre las coordenadas geográficas $[8.5^\circ - 4.0^\circ]N$ y $[79^\circ - 76^\circ]W$ (fig. 2). Por tanto su área es $S = 1.66 * 10^{15} \text{ cm}^2$. El espesor de la zona sismogénica en términos medios se ha tomado igual al espesor de la corteza, es decir, $h = 3.33 * 10^6 \text{ cm}$. Por tanto, el volumen de la zona es igual a $\Delta V = 5.48 * 10^{21} \text{ cm}^3$. La suma del momento sísmico obtenidos de los eventos analizados y ocurridos en la zona del Chocó en el período de estudio, es igual a $2.7 * 10^{27} \text{ dinas - cm}$. El tensor momento sísmico resultante es:

$$\| M_{ij} \| = \begin{vmatrix} 3.8 & -54 & 2.7 \\ 5.4 & -12.1 & -14.8 \\ 2.7 & 14.8 & 8.3 \end{vmatrix} * 10^{27} \text{ dinas - cm}$$

Por cuanto la zona de deformación en análisis se localiza en las vecindades de la superficie terrestre, el valor promedio del módulo de rigidez del medio puede ser tomado igual a $\mu = 3.0 * 10^{11} \text{ dinas /cm}^2$. El correspondiente tensor de velocidad de

deformación calculado por la fórmula (6), tiene la forma:

$$\| \varepsilon_{ij} \| = \begin{vmatrix} 6.1 & -8.6 & 4.2 \\ 8.6 & -19.4 & -23.7 \\ -4.2 & 23.7 & 13.3 \end{vmatrix} * 10^{-8} \frac{1}{\text{año}}$$

De aquí se puede ver que el proceso de deformación predominante en la zona es de compresión en dirección Oeste - Este ($e_{yy} = e_{22} = 19.4$), el cual ocurre con velocidad aproximada de 6.5 cm/año . Este resultado está de acuerdo con los recientes valores obtenidos para el movimiento de las placas tectónicas que convergen en la esquina noroccidental del continente Suramericano, realizadas mediante Posicionamiento Global por Satélite (G.P.S.), los cuales muestran un movimiento horizontal (Oeste - Este) de la placa Nazca, con velocidad de 7.0 cm/año (FREYMUELLER et.al., 1993). Es notorio un aumento de espesor de la capa sismogénica ($e_{zz} = e_{33}$), que ocurre con velocidad aproximada de 0.4 cm/año . Es posible que el aumento de espesor de la capa sismogénica suceda a causa de la rotación de la estructura sismogénica en el plano vertical, lo cual se evidencia por los altos valores de la componente de deformación $e_{23} = -e_{32}$. El movimiento en el plano vertical es intenso. Al parecer, bajo la presión de la placa Nazca, en la parte continental de la costa occidental de Colombia existe una estructura lítrica, que se profundiza en la medida que se aleja de la línea costera hacia el Oriente. La deformación por distensión en dirección NS ocurre con velocidad de 3.05 cm/año ; mientras que la deformación por dislocación en el plano horizontal no es muy considerable.

Estos procesos deformantes se comprueban con la orientación de los planos de ruptura y de dislocación en los focos de fuertes terremotos (SALCEDO, 1992; SALCEDO y CORAL-GOMEZ, 1994). Los datos sobre mecanismos focales permiten suponer, que los terremotos en la parte occidental de Colombia se relacionan no solo con la subducción de la placa Nazca, sino también con un conjunto de fallas conjugadas que se profundizan en dirección Occidente - Oriente.

4.2. PROCESO DE DEFORMACION EN LA ZONA DEL "NIDO" DE BUCARAMANGA.

La zona del "Nido" de Bucaramanga se caracteriza por tener una sismicidad de profundidad intermedia; la capa sismoactiva se ubica en una profundidad aproximada entre 140 km y 180 km (TRYGGVASON and LAWSON, Jr., 1970; PENNINGTON y Otros, 1981; CORAL-GOMEZ 1987; RIVERA, 1989; SALCEDO y Otros, 1994). El área de estudio fue escogida también arbitrariamente de tal manera que proyectada en la superficie está limitada entre las coordenadas $[8.0^\circ - 5.5^\circ]\text{N}$ y $[74.0^\circ - 71.5^\circ]\text{W}$ (fig. 2), que equivale a $S = 7.7 * 10^{14} \text{ cm}^2$. El volumen de la capa sismogénica es igual a $\Delta V = 3.08 * 10^{21} \text{ cm}^3$. El momento sísmico total obtenido de ocho terremotos ocurridos en el período entre 1965 y 1977 es aproximadamente de $6.7 * 10^{25} \text{ dinas - cm}$. El tensor de momento sísmico para la zona de Bucaramanga es:

$$\| M_{ij} \| = \begin{vmatrix} 14.6 & -54 & -8.3 \\ 5.4 & -30.8 & 1.3 \\ 8.3 & -1.3 & 17.2 \end{vmatrix} * 10^{25} \text{ dinas} - \text{cm}$$

Por cuanto la capa sismogénica es de profundidad intermedia, para ella se puede tomar $\mu = 5.0 * 10^{11}$ dinas / cm^2 . El tensor de velocidad media de deformación es:

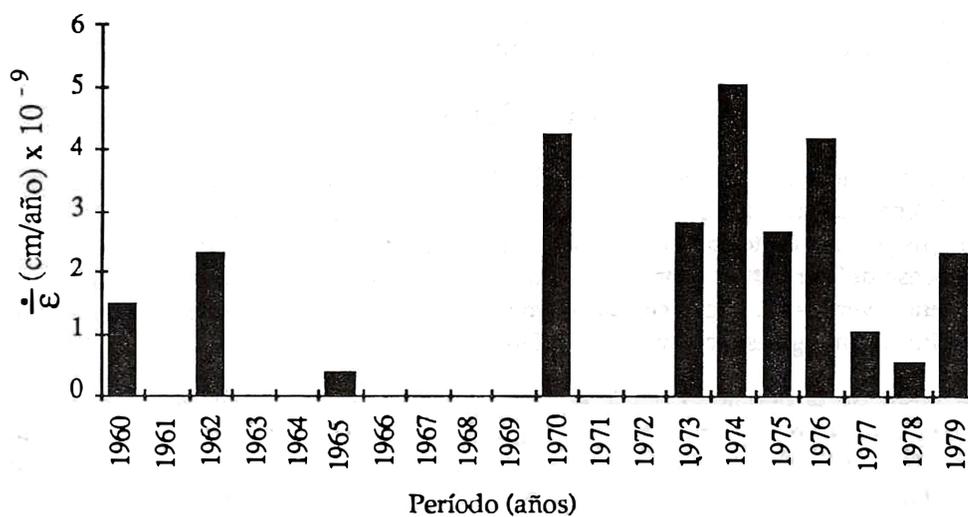
$$\| \epsilon_{ij} \| = \begin{vmatrix} 29.6 & -11.0 & -16.8 \\ 11.0 & -62.5 & 2.6 \\ 16.8 & -2.6 & 34.9 \end{vmatrix} * 10^{-9} \frac{1}{\text{año}}$$

Aquí, como en la zona del Chocó, el proceso de deformación predominante es de compresión en dirección Oeste - Este ($e_{yy} = e_{22} = -64.9$), que ocurre con velocidad aproximada de 1.7 cm/año . El aumento de espesor de la capa sismogénica ocurre con velocidad de unos 0.14 cm/año aproximadamente. Es notoria una distensión en dirección NS - con velocidad de 0.82 cm/año . De esta manera, en la zona de "Nido" de Bucaramanga, la velocidad de los procesos deformantes es un poco menor que en la zona del Chocó: esto, al parecer, se explica porque la zona sismogénica de Bucaramanga es profunda y se ubica por debajo de las estructuras continentales, que obstaculizan o impiden el desarrollo de los movimientos intensos. Aunque la sismicidad del «Nido» de Bucaramanga es alta, ella se caracteriza por la ausencia de terremotos catastróficos. Su desarrollo en el futuro, probablemente, también sucederá de tal forma que se observe un incremento del número de terremotos con magnitudes intermedias. Los movimientos verticales aquí ocurren en el plano XY ($e_{13} > e_{23}$), a diferencia de la zona del Chocó, donde estos movimientos son más intensos en el plano YZ ($e_{23} > e_{13}$). En la zona de Bucaramanga es más intensa la deformación por dislocación en el plano horizontal. Las deformaciones en la zona del "Nido" de Bucaramanga se encuentran en parte bajo la influencia del movimiento de la placa del Caribe. Estos resultados también están de acuerdo con los recientes datos obtenidos por mediciones geodésicas (G.P.S.) en la parte Norte de los Andes (FREYMUELLER et.al., 1993).

Como la zona del Chocó se ubica en el borde de la placa continental y cerca de la influencia de la placa Nazca, era de esperar por eso, que la intensidad de los procesos deformantes en ella sean mayores que en el "Nido" de Bucaramanga.

Por otro lado, la actividad sísmica en una región se define por la variación en el tiempo de las características del proceso de deformación. Así, el terremoto más fuerte, como regla, se relaciona con un período de caída de la intensidad de la deformación (KASTROV, 1975). En el presente trabajo se calculó la velocidad media de deformación por año para ambas regiones estudiadas. En la figura 3 se muestran las gráficas obtenidas para la variación de la velocidad media de deformación para las zonas de Chocó en el período de 1960 - 1979 (figura 3a) y del "Nido" de Bucaramanga desde 1965 hasta 1977 (figura 3b). Lo que se observa en la zona del Chocó es más representativo.

(a)



(b)

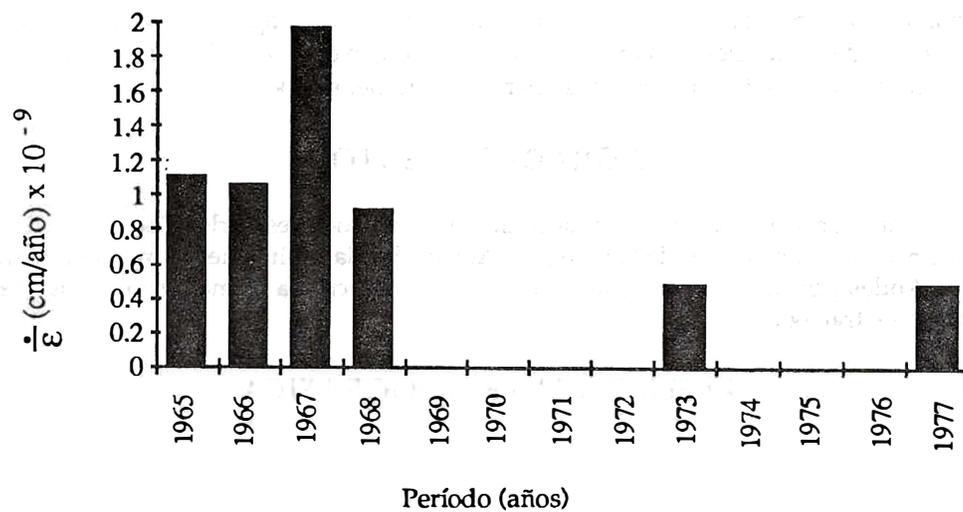


Figura 3. Variación de la velocidad media de deformación con el tiempo en las zonas sismoactivas de Chocó (a), y del "Nido" de Bucaramanga (b).

Dos mínimos en los valores de la velocidad media de deformación, observados en 1965 y en 1978 preceden dos fuertes terremotos ocurridos en la zona el 26 de septiembre de 1970 con magnitud $m_b = 6.0$ y el 23 de Noviembre de 1979 con magnitud $m_b = 6.5$. Los valores de la velocidad media de deformación para diferentes zonas de Colombia representan cantidades de un mismo orden.

5. CONCLUSIONES

El cálculo del tensor de velocidad media de deformación para dos zonas sismoactivas diferentes del territorio colombiano muestra que, la geodinámica de estas zonas se define por diferentes procesos tectónicos. Lo común para ellas es que predomina un proceso deformante compresivo orientado en dirección Oeste - Este y fuertes movimientos verticales. El carácter de los movimientos para las zonas de Chocó y "Nido" de Bucaramanga esencialmente es diferente.

A pesar de la debilidad desde el punto de vista estadístico de las correlaciones encontradas en este trabajo y de algunos valores de la magnitud de los datos empleados, las velocidades de deformación aquí obtenidas por un método de análisis de datos sismológicos están de acuerdo con los recientes datos geodésicos obtenidos para el movimiento de las placas litosféricas que convergen en la esquina noroccidental del continente Suramericano.

Los bajos niveles en la variación de la velocidad media de deformación en la zona del Chocó pueden interpretarse como premonitores a largo tiempo de fuertes terremotos. Mientras que en la zona del "Nido" de Bucaramanga la velocidad media de deformación permanece casi constante en el tiempo, es decir, no se aprecia en esta zona una fuerte caída de la velocidad media de deformación, lo cual se explica por la ausencia de fuertes terremotos en la zona, al menos dentro del período aquí observado.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus sinceros agradecimientos a los Doctores Carlos Coral Gómez de la Universidad Nacional de Colombia y Alberto Sarria Molina de la Universidad de los Andes por sus valiosos comentarios y revisión crítica al manuscrito final del presente trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- AKI K., RICHARDS P.G. (1980). *Quantitative Seismology. Theory and methods*: Freeman, San Francisco, Vol. I, II, 932p.
- BRUNE J. N. (1968). *Seismic moment, seismicity, and rate of slip along major fault zones*, J. Geophys. Res., Vol 73, No.2, p. 777 - 784.
- CORAL-GOMEZ C. (1987). *Los terremotos en Colombia y características de su origen profundo*, Univ. Nal., Bogotá, 199p.

- DZIBLADZE E. A. (1982). *El flujo sísmico de la masa rocosa en el Cáucaso*. Rev. Fizika Zemli, Akad. Nauka URSS (en Ruso), No. 10, p.111 - 117.
- FREYMUELLER J. T., KELLOGG J.N. and VEGA V. (1980). *Plate motion in the North Andean Region*. J. Geophys. Res., Vol 98, p. 21853 - 21863.
- KASTROV B. V. (1974). *Momento sísmico, energía de los terremotos y flujo sísmico de rocas*. Rev. Fizika Zemli, Akad. Nauka URSS (en Ruso), No. 1, p. 23 - 40.
- KASTROV B. V. (1975). *Mecánica de los focos de terremotos tectónicos*. Nauka, Moscú, (en Ruso), 172p.
- MESCUA J., RUEDA J., BUFORN E. (1991). *Seismic Deformation in the Azores - Alboran Sea Region*. Public. I.G.N. Serie Monografía No. 8, p. 205 - 211.
- MINSTER J., JORDAN T. (1978). *Present-day plate motions*, J. Geophys. Res., Vol 83, p. 5331 - 5354.
- PENNINGTON W. D., MOONEY W. D., HISSENHOVEN R., MEYER H., RAMÍREZ J. E., MEYER R. (1981). *Resultados de un estudio de reconocimiento de microsismos en Bucaramanga, Colombia*. En: Investigaciones geofísicas sobre estructuras océano-continentales del Occidente colombiano. Inst. Geofísico, Univ. Javeriana, Bogotá, p. 49 - 62.
- RISNICHENKO YU. V. (1965a). *Relación entre el flujo de la masa rocosa y la sismicidad*. Ponencias de la Academia de Ciencias de URSS, 161, No.1.(en Ruso).
- RISNICHENKO YU. V. (1965b). *Acerca del flujo sísmico de la masa rocosa*. En: Dinámica de la corteza terrestre. Nauka, Moscú, (en Ruso).
- RISNICHENKO YU. V. (1985). *Problemas de la Sismología*. Obras Escogidas. Nauka, Moscú, (en Ruso), 408p.
- RISNICHENKO YU. V., DZIBLADZE E. A. (1976). *Velocidad de los movimientos verticales causados por flujo sísmico de la masa rocosa*. Rev. Fizika Zemli, Akad. Nauka URSS, (en Ruso), No.1, p. 23 - 31.
- RISNICHENKO YU. V., KOCHETOV V. M., MISHARINA L. A. GUILÉVA N. A. (1977). *Movimientos sismotectónicos verticales en las zonas de los Baicales*. Rev. Fizika Zemli, Akad. Nauka URSS, (en Ruso), No. 11, p. 41 - 52.
- RISNICHENKO YU.V., SOLOVEVA O.V., KUCHAY O.A., MIJAILOVA P.S., VACILEVA O.N. (1982). *Deformación sismotectónica de la corteza terrestre del sur de Asia Central*. Rev. Fizika Zemli, Akad. Nauka URSS, (en Ruso), No. 10, p. 90 - 104.
- RIVERA A. (1989). *Inversion du Tensor des contraintes et des mecanismes au foyer a partir*

des donnees de polarite pour une population de seismos (Application a l'Ecude du foyer de seismicite intermeiate de Bucaramanga - Colombia). These de Doctorat. Universite Louis - Pasteur de Strasburg, 266p.

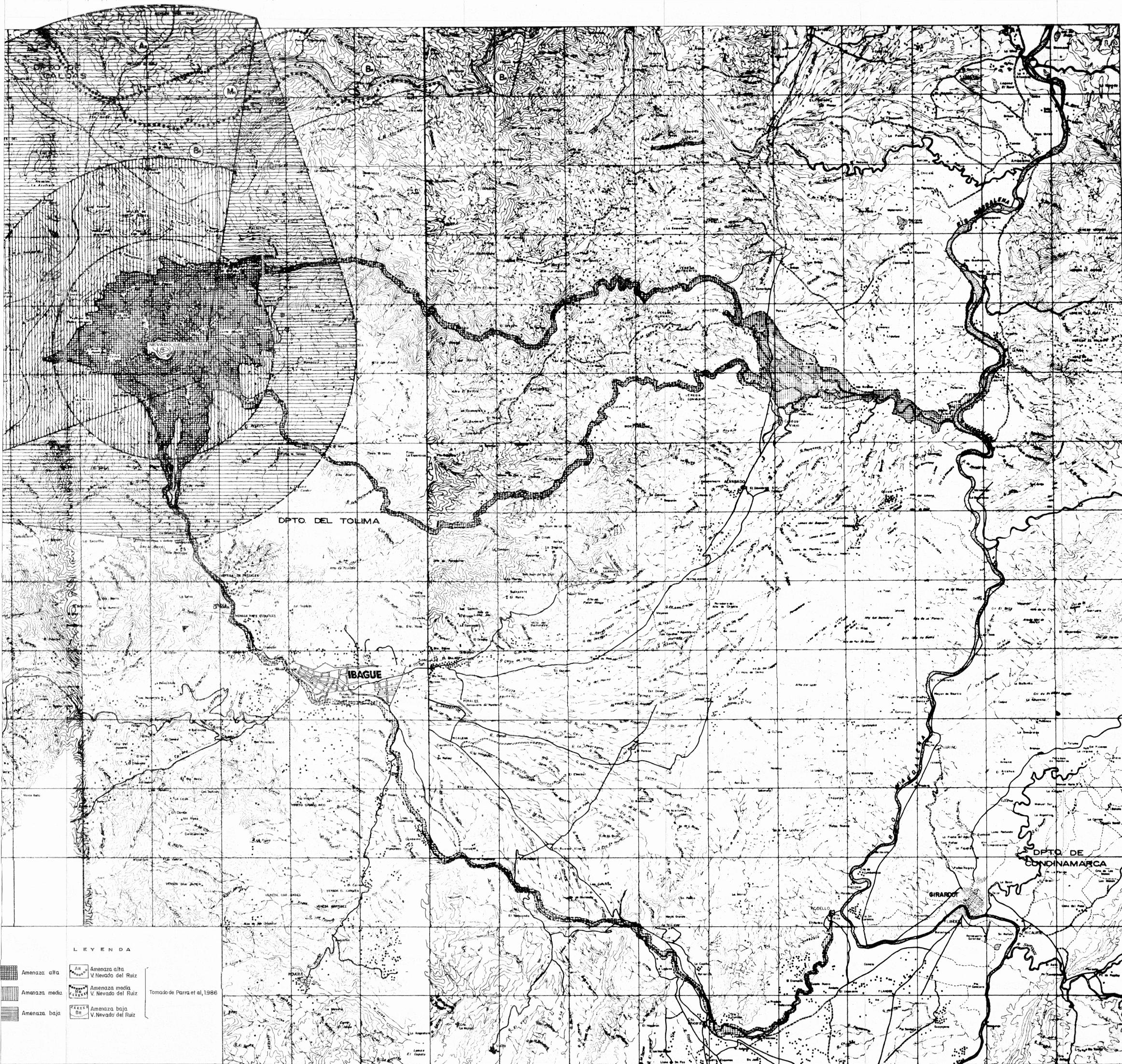
SALCEDO E. (1992). *Sismicidad y peligro sísmico de Colombia*. Tesis Ph.D. Edit. Univ. Estatal de Moscú, Moscú - Rusia, 268p.

SALCEDO E., CORAL-GÓMEZ C. (1994). *Atenuación de intensidades sísmicas en el territorio colombiano*. Rev. Geofísica Colombiana. (en imprenta).

SALCEDO E. Y OTROS (1994). *Proyecto Sismotectónica del territorio de Colombia*. INGEOMINAS. Informe interno, 48p.

TRYGGVASON E. and LAWSON J. E., Jr. (1970). *The intermediate earthquake source near Bucaramanga, Colombia*, Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 60, No. 1, p. 269 - 279.

YUNG S. L. (1979). *Acerca del mecanismo de deformación de un bloque sismoactivo de la corteza terrestre*, Rev. Fizika Zemli, Akad. Nauka URSS (en Rusó), No.10, p.14 - 23.



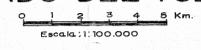
LEYENDA

	Amenaza alta		Amenaza alta V. Nevado del Ruiz
	Amenaza media		Amenaza media V. Nevado del Ruiz
	Amenaza baja		Amenaza baja V. Nevado del Ruiz

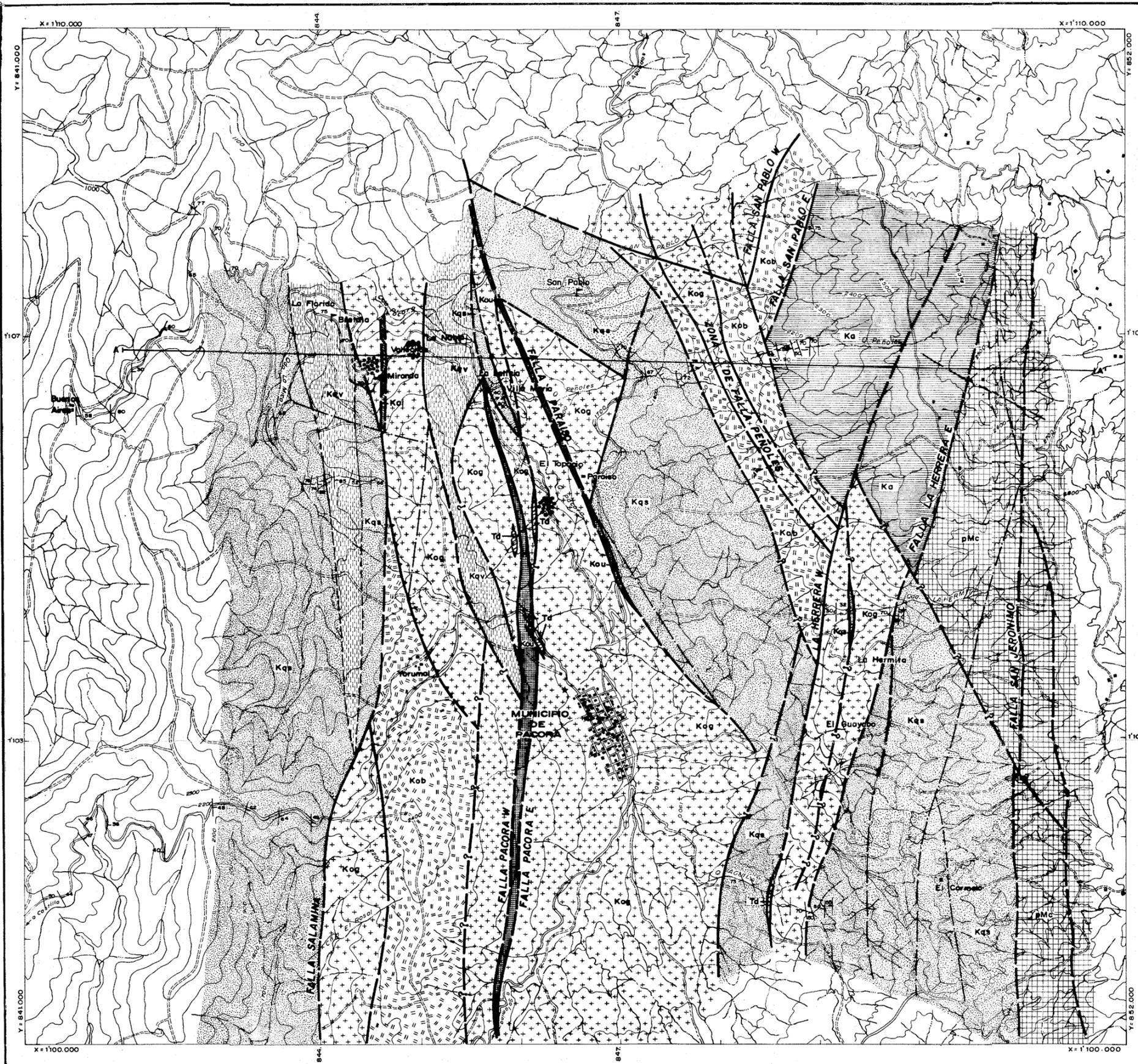
Tomado de Parra et al, 1986

REPUBLICA DE COLOMBIA
 INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES GEOLOGICO-MINERAS
 INGEOMINAS

**MAPA PRELIMINAR DE AMENAZA VOLCANICA POTENCIAL DEL
 NEVADO DEL TOLIMA**



Con la colaboración de JEAN-CLAUDE THOURET, U de Grenoble (Francia), MAURO ROSSI, U de Pisa (Italia)



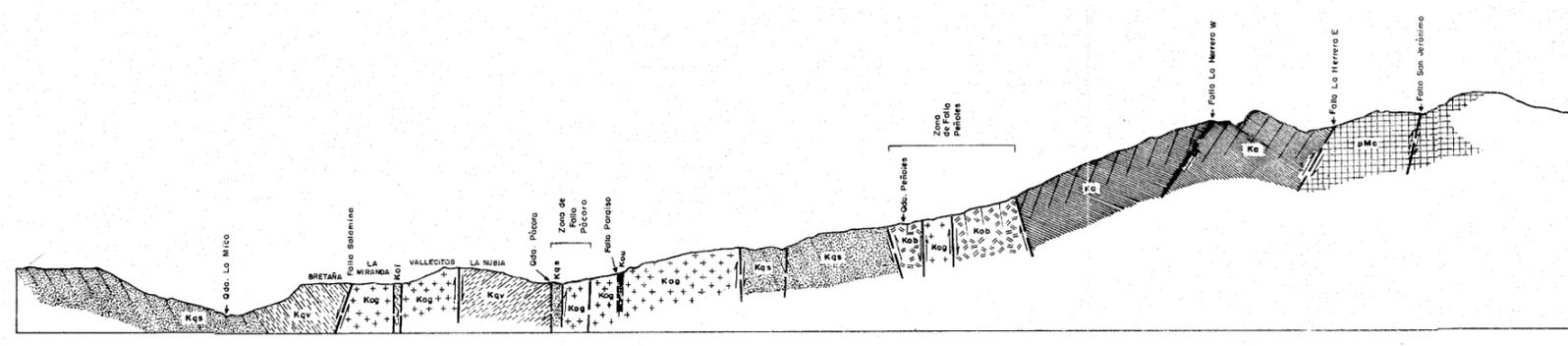
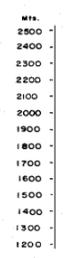
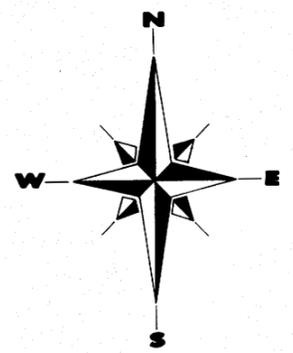
Cartografía geológica después de González H., et al., 1980

LEYENDA

- PRECAMBRIANO SUPERIOR**
 - Rocas hipoabisales porfíricas. Andesitas y dacitos.
- COMPLEJO QUEBRADAGRANDE**
 - ALBIANO**
 - Grauvacas, limolitos, lutitas y conglomerados gris verdosos o negros con aporte volcánico. Intercalaciones de basaltos y en menor cantidad andesitas. Kqs = Predominan sedimentos epiclasticos y volcánicos Kqv = Predominan volcanitas básicas.
- FORMACION ABEJORRAL**
 - CRETACEO INFERIOR**
 - Lutitas y limolitos silíceos gris oscuros con intercalaciones de areniscas finogranulares gris claros.
- OFIOLITA DE PACORA**
 - PRE-ALBIANO**
 - Basaltos, brechas almohadilladas, brechas
 - Kog: Gabbros isotrópicos, * Plagiogranitos
 - Kgc: Gabbros cúlminos
 - Kou: Ultramafitas tectónicas y cumulos (harzburgitas, lherzolititas) wehrlitas serpentizadas y serpentinitas.
 - Kof: Rocas afiolíticas indiferenciadas (serpentinitas, gabbros, basaltos).
- COMPLEJO CAJAMARCA**
 - Metamorfitas.

CONVENCIONES

- CONTACTOS**
 - Comprobado
 - Aproximado
- FALLAS**
 - Comprobado. Inclinación. ∇
 - Aproximado
 - Inferido
 - Falla inversa de ángulo bajo con dirección de buzamiento
 - Alineamiento foto geológico.
- RUMBO Y BUZAMIENTO EN ROCAS SEDIMENTARIAS**
 - Inclinado
 - Vertical
- RUMBO E INCLINACION EN ROCAS METAMORFICAS**
 - Inclinado
 - Vertical
- FOLIACION CATACLASTICA EN ROCAS IGNEAS**
 - Inclinado
 - Vertical



CORTE A-A'

INGEOMINAS

MAPA GEOLOGICO DE LOS COMPLEJOS OFIOLITICO Y QUEBRADAGRANDE EN LA ZONA DE PACORA

Autor : Jairo Alvarez A.		Dibujó : Mo. Patricio Lopera C.	
Fecha : Agosto / 86		PL 1 de 1	

