

ESTIOLITOS HORIZONTALES COMO INDICADORES DE PRESIONES TECTONICAS PRETERITAS EN LA PARTE MEDIA DE LA CORDILLERA ORIENTAL COLOMBIANA

por

Adrian E. Scheidegger* y Jairo Mojica**

Resumen

Scheidegger, A. & J. Mojica: Estilolitos horizontales como indicadores de presiones tectónicas preteritas en la parte media de la Cordillera Oriental Colombiana. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 17 (66): 445-459, 1990. ISSN 0370-3908.

Se establece la orientación de estilolitos horizontales pre a sincinemáticos en unidades silíceas del Cretácico; se deduce un eje de máxima compresión σ_1 entre $311^\circ - 330^\circ$, congruente con información obtenida del estudio de diaclasas recientes. Los datos conseguidos permiten señalar cómo entre Bogotá y Tunja no se han producido variaciones sustanciales durante el Cenozoico, en tanto que entre Tota y Sogamoso, al parecer, ocurrió una rotación dextral del eje durante el Neogeno.

Abstract

Horizontal stylolites (H-S) are secondary, intrastratal and directional structures generated by pressure-solution processes under compressional tectonic conditions. H-S resemble small needles whose axis are supposed to develop (to grow) parallel to the direction of maximal tectonic compression (σ_1). Thus H-S are useful to determine paleo-stress directions; when the age of the horizontal stylolite-bearing rocks and the age of the H-S are known, it is possible to time different compression phases.

The orientation of H-S has been measured at 25 points distributed around the Bogotá-Tunja-Sogamoso Plains (middle Colombian Eastern Cordillera). The H-S occur in several siliceous units of Middle to Upper Cretaceous age, but specially in those made up of cherts and siliceous siltstones (e.g. "Plaeners" of the Guadalupe Group and the La Luna, Hiló and San Rafael Formations).

Comparison of attitudes of the bedding planes and orientation of H-S indicates that last are pre-cinematic to syncinematic, that means prior to or approximately contemporaneous with the "final" andean uplift during Miocene-Pliocene times. However the most part of the H-S may have been generated during earlier Andean compressional phases than those recognized at several places at the late Paleocene.

* Universidad Tecnológica de Viena. Gusshausstr. 27-29. A - 1040 Viena - Austria.

** Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias. Apartado 14490, Bogotá.

In the area of Bogotá-Tunja, the H-S show a very consistent orientation (expressed in azimuths N-E) of 128° to 132° ; between Sogamoso and Tota, the average H-S orientation turns to 101° . Joint measurements conducted some years ago in the northern half of the country indicate a present orientation of σ_1 between 129° to 150° , which approximately corresponds with that obtained from H-S observations in the Bogotá-Tunja region. Consequently, it seems probably that the stress field orientation in this region has not change during Cenozoic times. Otherwise, it could be postulated that during the Neogene the orientation of σ_1 in the Sogamoso-Tota area has undergone a dextral rotation from 101° to $130^{\circ} - 150^{\circ}$.

Introducción

Los estilolitos son estructuras penetrativas, secundarias e intraestratales, en forma de agujas, conos truncados o pequeñas columnitas (de escala micro a macroscópica) que se desarrollan, ante todo, en rocas sedimentarias, por efectos de disolución diferencial (y concentración simultánea de residuos insolubles) bajo presiones dirigidas —vale decir por causa de fuerzas tectónicas—. Detalles al respecto, cuya discusión está fuera de los alcances de este trabajo, se encuentran en Heald (1955), Wagner (1964), Park & Schot (1968), Trurnit (1968 a y b), Trurnit & Amstutz (1979), Nelson (1983), Bayly (1986), entre otros. Según sea la posición de los estilolitos en relación con los planos sedimentarios, se diferencian dos tipos principales: *verticales* cuando son perpendiculares a la estratificación, *horizontales* cuando son aproximadamente paralelos a ella (v. Mojica 1985: Fig. 5). El eje de los estilolitos ha de ser paralelo a la dirección de máxima compresión (σ_1); el acortamiento producido en el caso de los estilolitos verticales puede llegar a 8%, mientras en el de los horizontales alcanza hasta 4%.

Los estilolitos verticales (E-V) han de surgir cuando σ_1 es vertical, condición que se cumple en sectores sometidos a distensión y fallamiento normal (Mattauer 1976: 375), en momentos tempranos de la diagénesis; empero, algunos autores (e. g. Trurnit 1968b, Schaefer 1980) consideran que los E-V son consecuencia de la sobrecarga litostática propia de áreas sometidas a subsidencia.

Los estilolitos horizontales (E-H) han de ser generados, por efecto de presiones laterales, una vez los materiales han alcanzado una compactación suficiente para transmitir los esfuerzos dirigidos y desarrollar planos secundarios de discontinuidad (fracturas, diaclasas), a partir de las cuales (= superficies estilolíticas) se induzca el crecimiento de los E-H, que puede darse en una o más etapas, ya sea antes, durante, o después del plegamiento de los estratos, distinguiéndose entonces entre E-H precinemáticos, sincinemáticos y postcinemáticos, respectivamente (Plessmann 1972: 341-342).

Entonces, los E-H constituyen una herramienta valiosa para la identificación de las direcciones de esfuerzos tectónicos pretéritos y de sus variaciones en el tiempo, en especial de paleorrotaciones; así mismo, las direcciones de esfuerzos deducidas a

partir de los E-H permiten poner a prueba modelos tectónicos que sugieren movimientos de colisión o rumbo-deslizantes de bloques. Al respecto vale la pena citar aquí los trabajos de Wagner (1964), Beiersdorf (1969), Plessmann (1972), Schaefer (1980), Letouzey & Tremolieres (1980), quienes han determinado con éxito las direcciones de los campos de esfuerzos meso y cenozoicos en los Alpes, las regiones extraalpinas, la cadena de los Montes Atlas. Ultimamente, Subieta et al. (1988) han identificado la presencia de E-H en sedimentitas del Cretácico Superior (Grupo Guayuta) de la región al NE de Venezuela (Serranía del Interior y Subcuenca de Maturín); según dichos autores se trata de "estilolitos tectónicos precinemáticos, al parecer generados durante el "Mioceno Medio". Allí, los E-H indican una compresión esencialmente N-S a NNW-SSE, sin que se hayan adelantado estudios sistemáticos y estadísticos como el presente. De otra parte, la generación de E-H tiene implicaciones económicas ya que: a) según Golf-Racht (1982: 30), la ocurrencia de estilolitos y cementos reprecipitados, en especial cuando son continuos, causa reducción de la calidad de los reservorios hidrocarburiíferos, puesto que actúan como barreras para los sistemas hidrodinámicos, los sistemas de fracturas y los poros intergranulares. b) De acuerdo con Trurnit (1968b), los materiales disueltos durante el desarrollo de los estilolitos migran hacia sectores altos o externos de las cuencas sedimentarias y precipitan en forma de nuevos minerales o incrementan la oferta de los mismos para los organismos; los residuos insolubles, generalmente de color oscuro, pueden elevar la concentración de minerales que originalmente era baja en las rocas que sufren el proceso de estilolitización. Trurnit & Amstutz (1979: 1121) consideran que muchos yacimientos sedimentarios se han formado por este mecanismo.

Con el objeto de estudiar las características y orientación de diversos afloramientos con estilolitos descubiertos previamente por J. Mojica, durante los meses de febrero y marzo de 1983, los autores de esta nota emprendieron varias excursiones por la Sabana de Bogotá y las áreas de Tunja y Sogamoso, que en conjunto conforman el llamado "Altiplano Cundiboyacense", una región más o menos llana en la parte media y central de la Cordillera Oriental de Colombia, a alturas comprendidas entre 2.400 y 2.600 metros sobre el nivel del mar.

Los afloramientos investigados (Fig. 1), que representan cortes de carretera o canteras con fácil

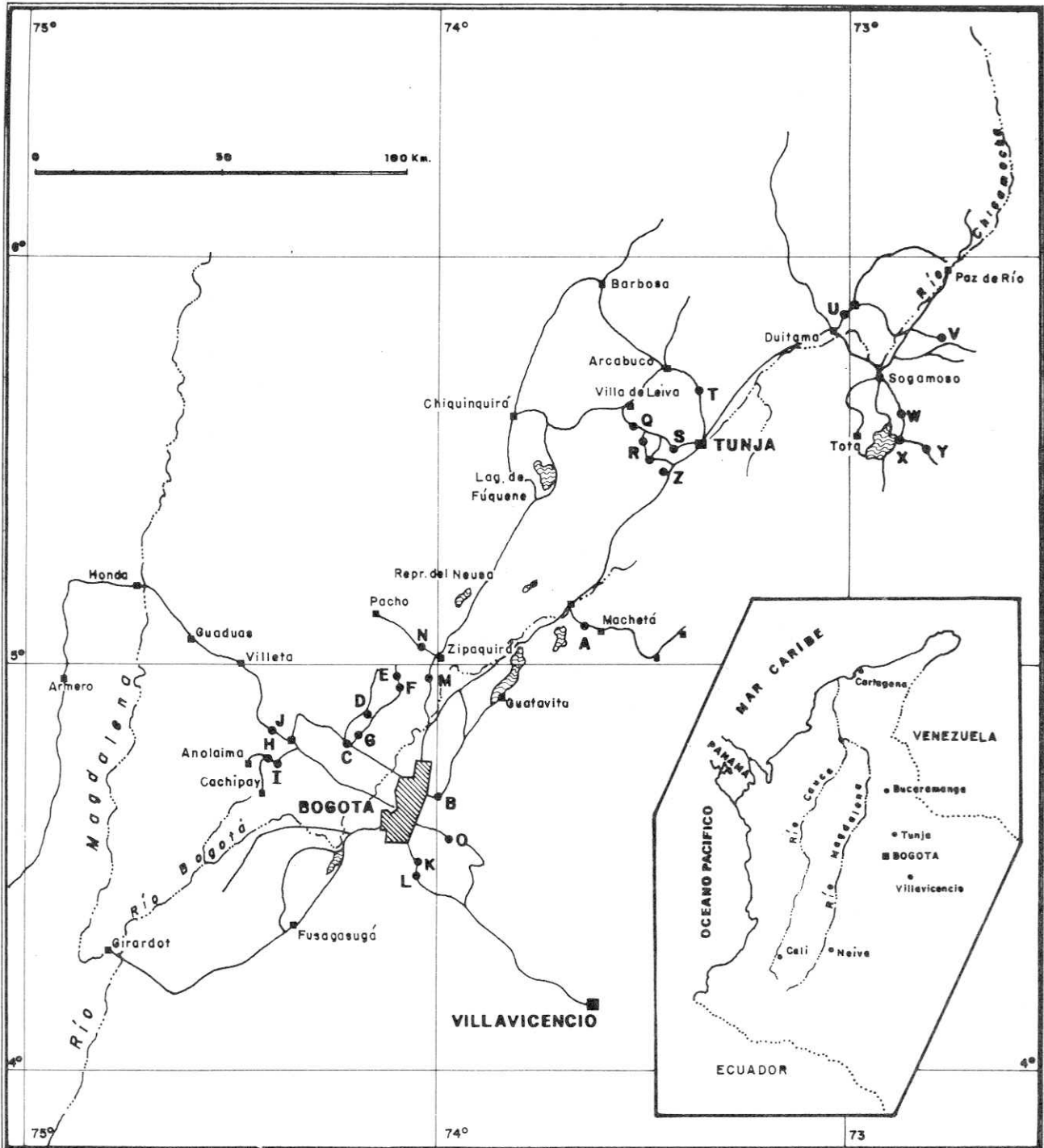


Figura 1. Localización de los afloramientos estudiados.

acceso, fueron marcados con las letras A a Z, sin incluir la P. En dicha figura se notan tres concentraciones: la primera en los alrededores de Bogotá (estaciones B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M, N, O); la segunda en la región de Tunja (estaciones A, Q, R, S, T, Z); la tercera en el área de Sogamoso (estaciones U, V, W, X, Y). Se trata de un arreglo que resultó de las posibilidades organizativas de las excursiones; no obstante, los grupos así conformados tienen también significado geológico, como se verá más adelante.

Aspectos Geológicos

En el Altiplano Cundiboyacense afloran sedimentitas del Meso y el Cenozoico en especial del Cretácico y el Terciario, plegadas durante el Mioceno-Plioceno. En el área de estudio, los estilolitos se han encontrado hasta ahora sólo en capas silíceas del Cretácico que incluyen, en orden de importancia: a) limolitas silíceas y porcelanitas grises a amarillentas, a veces fosfóricas, de los "Plaeners" del Grupo Guadalupe (Coniaciano Superior o San-

toniano a Maestrichtiano Inferior); b) Cherts oscuros, bituminosos de las Formaciones La Luna (Turoniano-Coniaciano), San Rafael (parcialmente Turoniano), Hiló (Albiano) y de la parte alta del Grupo Villeta (Formación Chipaque del Turoniano-Coniaciano); c) Areniscas cuarzosas, grises a blancuecinas, medio a finogranulares, por lo común micáceas de la Formación Une (Albiano) en la región entre Duitama y Sta. Rosa de Viterbo. Los detalles acerca de las características litoestratigráficas de dichas unidades pueden ser consultados en Julivert (1968), Etayo (1968), Renzoni et al. (1983), e Ingeominas (1986). La Fig. 2 muestra un afloramiento representativo de los "Plaeners" del Grupo Guadalupe en la localidad I, mientras que en la Fig. 3 se pueden apreciar los cherts de la Fm. San Rafael en la localidad Q.

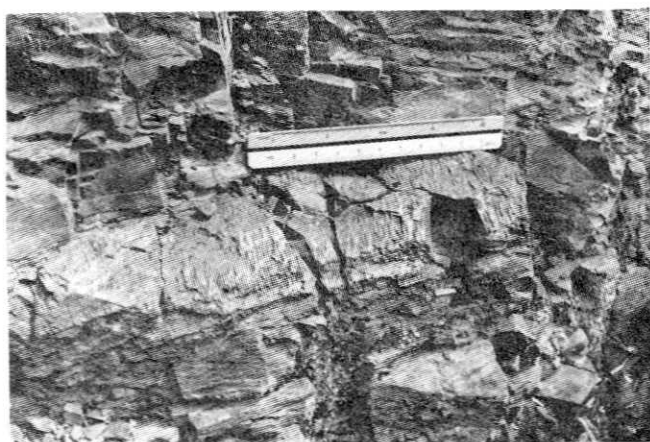


Figura 2. Afloramiento en la parte alta del Gr. Villeta (limolitas silíceas y cherts) con estilolitos horizontales. Localidad I, Zipacón.

Por lo general, cerca de los "Plaeners" se tienen paquetes de areniscas (Fig. 4, Loc. B), a veces con abundantes icnofósiles del género *Thalassinoides* (Figs. 5, 6, 7; Loc. V). Ya que tanto en las areniscas como en los "Plaeners" se presentan diaclasas bien desarrolladas, se aprovechó la oportunidad de medir sus orientaciones, con el fin de comparar-

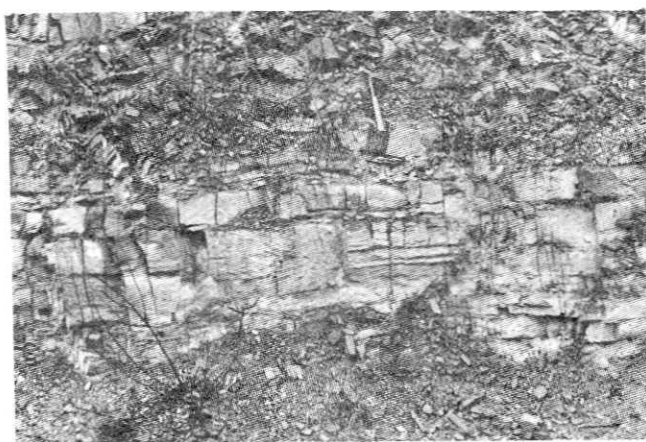


Figura 3. Cherts del cretácico inferior (Fm. San Rafael) en la localidad Q, Quebrada Churuvita, vía Tunja-Villa de Leyva.

las con las de los E-H. Es de anotar aquí, que en algunas localidades los "Plaeners" presentan macro (Fig. 8, Loc. R) y micropliegues (Fig. 9, Loc. S), claramente disarmónicos con la megaestructura de las areniscas, lo cual indica un grado alto de incompetencia en los primeros.



Figura 4. Areniscas próximas a los "niveles de Plaeners" en la localidad B, vía Bogotá. La Calera.

Morfología de los estilolitos

En las localidades investigadas ocurren tanto E-V (e. g. Fig. 10, Loc. V) como E-H (e. g. Fig. 11, Loc. S), de los cuales sólo los últimos se consideraron de interés para el presente aporte. Como se aprecia bien en la Fig. 11, los E-H se manifiestan como agujas de 2 a 3 mm de longitud (excepcionalmente hasta 5 mm) que se proyectan a partir de una superficie más o menos plana (= "superficie estilolítica") y que tienen una contraparte que encaja perfectamente, de tal forma que a una aguja en un lado de la discontinuidad, corresponde un agujero en el otro. En ciertos casos, las superficies estilolíticas muestran un arreglo paralelo, bandeado, de los E-H (Fig. 12, Loc. Q), lo cual al parecer, es reflejo de la laminación original de los sedimentos.



Figura 5. Icnofósiles en la base de una arenisca intercalada en la Fm. La Luna, vía Sogamoso-Gámeza, Localidad V.

Como norma general, se tiene que las superficies estilolíticas en un afloramiento dado son paralelas entre sí, y los E-H perpendiculares a ellas. Sin embargo, en algunos casos, ocurren también superficies estilolíticas con orientaciones variadas (Fig. 13, Loc. H), que han permitido el desarrollo de E-H oblicuos o tangenciales (Fig. 14, Loc. G). Así mismo, en las rocas que contienen los E-H se observa siempre un sistema de diaclasas conjugado (Fig. 15, Loc. C) con el de las superficies estilolíticas; en ocasiones, las diaclasas presentan estructuras en pluma (Fig. 16, Loc. D) o radiales (Fig. 17, Loc. D), las cuales pueden aparecer también, aunque con menor frecuencia, sobre las superficies estilolíticas (e. g. Fig. 18, Loc. Q).

A partir de la frecuencia y el tamaño de los E-H, se pudo determinar en la localidad B un acor-

tamiento lateral de cerca del 3%, donde aparecen 24 superficies estilolíticas por metro lineal, con estilolitos que en promedio alcanzan longitudes entre 1 y 2 mm. Empero, en muchos casos, el acortamiento puede ser mayor, dado que los E-H pueden llegar a 0.5 cm de largo.

Evaluación de los afloramientos individuales

Puesto que el objetivo de este trabajo son ante todo los estilolitos horizontales, de los afloramientos estudiados tan sólo se presentan la localización general (Fig. 1) y las características más sobresalientes (unidad litológica, edad, acceso), resumidas en la Tabla 1.

Con el objeto de obtener las orientaciones preferenciales de los E-H, las superficies estilolíti-

TABLA 1

Listado de los afloramientos

Localidad y Descripción	Fecha	Unidad Litoestratigráfica y notas
A Vía Chocontá — Machetá, km 13, 2290 m	4 3 83	Capas verticales, Fm. Plaeners.
B Vía Bogotá — La Calera, km 2.5	13 2 83	Fm. Plaeners, Gr. Guadalupe
C Vía Bogotá — La Vega, km 12, El Cajón	14 2 83	Fm. Plaeners, Gr. Guadalupe
D 21 km de la vía Bogotá — Subachoque	14 2 83	Fm. Plaeners, Gr. Guadalupe
E Vía Tabio — Subachoque, km 9, 1860 m	16 2 83	Fm. Plaeners, ejes B $313 \pm 4/11 \pm 4$
F Vía Tabio—Subachoque, 300 m al SE de E	16 2 83	Fm. Plaeners, Gr. Guadalupe
G Vía Bogotá — Tenjo, finca Chitasugá	16 2 83	Fm. Plaeners, E-H y E-Tangenciales
H 16 km al W de Zipacón, vía a Cachipay	17 2 83	Gr. Villeta, cherts; E-H y E-Tang.
I 13 km al W de Zipacón, vía a Cachipay	17 2 83	Gr. Villeta, cherts negros.
J 48 km al NW de Bogotá, vía a Villeta	18 2 83	Fm. Plaeners, Gr. Guadalupe
K Divisoria de aguas hacia los Llanos, vía a Villavicencio	19 2 83	Gr. Villeta, shales silíceos.
L 300 m al sur de K	19 2 83	Gr. Villeta, shales silíceos
M Vía Cajicá — Zipaquirá, km 4	21 2 83	Fm. Plaeners, E-H y E-Tangenciales
N Vía Zipaquirá — Pacho, km 5	21 2 83	Fm. Plaeners, Gr. Guadalupe
O Vía Bogotá — Choachí, 3200 m	25 2 83	Fm. Arenisca Dura, cherts; Gr. Guadalupe
Q Q. Churuvita, vía Tunja — Villa de Leyva	2 3 83	Fm. Plaeners, Gr. Guadalupe
R Desvío a Samacá, vía Tunja—Villa de Leyva	2 3 83	Fm. San Rafael, E-H y E-Oblicuos
S Vía Villa de Leyva — Tunja, 10 km al W de Tunja	2 3 83	Fm. Plaeners, Gr. Guadalupe. Macro y micropliegues, Ejes—B $220 \pm 7/6 \pm 6$
T Vía Tunja — Arcabuco, km 16, 3040 m	2 3 83	Fm. Plaeners, Estilolitos grandes.
U Vía Duitama — Sta Rosa, km 6, 8	2 3 83	Fm. Une, E-H en areniscas cuarzosas
V Vía Sogamoso — Gámeza (24 km al NE de Sogamoso; 2830 m)	3 3 83	Fm. La Luna. Cherts negros E-H, E-V E-Tangenciales.
W Vía Sogamoso — Laguna de Tota, km 11, 2940 m	3 3 83	Fm. La Luna.
X Km 2.5 vía Aquitania — Sogamoso, 3010 m	3 3 83	Fm. Plaeners, Gr. Guadalupe
Y Divisoria de aguas hacia los Llanos (20 km al SE de Sogamoso)	3 3 83	Fm. Plaeners, Gr. Guadalupe
Z Vía Bogotá — Tunja, Puente de Boyacá	4 3 83	Fm. Plaeners, Gr. Guadalupe

cas y las diaclasas lisas, los datos de las mediciones de campo fueron sometidos a un análisis estadístico que incluye la comparación con una distribución Dimroth-Watson y la determinación, por medio del método de minimización de errores cuadráticos, de los parámetros (direcciones) más aceptables, con los márgenes de error correspondientes. Los resultados de esta labor se muestran en la tabla 2, en la cual las superficies se representan por el azimut de la dirección de buzamiento y el ángulo de buzamiento; los ejes por el azimut de la dirección de inclinación (= dirección de cabeceo) y el ángulo de inclinación (= ángulo de cabeceo).

La inspección de la tabla 2 permite concluir que los estilolitos horizontales aquí estudiados son en general perpendiculares a las superficies estilolíticas y paralelos a las capas; por el contrario, las superficies estilolíticas aparecen perpendiculares a los estratos. En algunos afloramientos con pliegues bien marcados. (e. g. localidades E y S) se pudo determinar la posición de los ejes B.

TABLA 2

Evaluación de los afloramientos individuales

Loc.	Sup. estilolítica	agujas	capas	Diacl. lisas
A	144±17/22± 6	296±23/72±8	293±6/76±6	26±5/83±5
B	130± 4/61± 4	308± 2/30±2	312±4/30±2	47±5/87± 5
C	324± 6/66± 5	142±7/29±6	94±8/35±4	196±20/84±17
D	326± 6/78± 6	133±9/ 5±9	179±19/14± 4	44± 7/78± 7
E	135±10/81± 9	317±9/13±8	indef.	66±15/81±13
F	86± 5/69± 5	266±11/28±10	204± 5/42± 4	19± 6/53±5
G	350± 4/67± 4	165± 4/22± 4	181±12/21± 4	69± 7/78± 7
H	141± 6/63± 6	310± 6/22± 5	293±10/24± 4	216± 5/84± 5
I	298± 7/83± 4	112± 5/ 8± 6	29±24/10± 4	197± 9/80± 8
J	295± 4/66± 4	115± 4/26± 4	121± 9/22± 3	203± 3/89± 3
K	190± 9/52± 7	8±11/40± 8	89± 6/76± 6	350±13/68±12
L	236±10/58± 9	56±10/32± 9	33±12/27± 6	273±32/77±27
M	134±27/67±18	308±12/36± 9	314± 9/35± 5	68±15/79±13
N	106±35/87±26	283±31/23±24	214± 4/37± 3	321±17/72±16
O	104± 4/80± 4	288± 4/19± 4	307±25/11± 5	192± 5/86± 5
Q	309± 5/79± 5	293±19/ 2±20	141±17/17± 5	226± 6/89± 6
R	338± 9/64± 8	137± 6/34± 5	126±11/32± 6	245±11/86±11
S	317± 5/42± 3	132±12/50± 7	L 140± 4/45± 3 R 328±12/44± 8 o 140±13/44±11	48± 3/82± 3
T	324± 6/63± 5	143± 6/33± 5	147±12/31± 6	52± 5/86± 5
U	185± 4/78± 4	355± 6/23± 5	288± 5/44± 4	76± 8/62± 7
V	110±29/50±16	{250±12/34±10 {318±20/41±15 or 287±20/43±12	209± 4/46± 3	180±13/71±12
W	{61±14/43± 9 { 8± 6/89± 6 o 35±18/58±15	263±15/54± 9	286± 3/58± 2	185± 8/70± 8
X	{274±13/77±11 {27±25/90± 2 o 276±24/76±16	101± 6/26± 6	87± 6/26± 2	{285±18/66±17 {181± 5/90± 5 o 352±18/86±15
Y	260±10/61± 8	71± 7/36± 6	{341± 5/90± 5 {146± 4/67± 3 or 156± 7/82± 6	76± 8/67± 8
Z	306± 5/76± 5	125± 6/ 5± 6	115± 9/16± 2	213± 3/86± 3

te la deformación que dio origen a los pliegues pueden haber ocurrido también rotaciones alrededor de ejes verticales, que no dejan una huella clara para su identificación. Por esta razón parece mejor promediar los azimutes de las direcciones de los E—H y esperar que las posibles desviaciones de las direcciones originales se cancelen unas a otras. Con este fin es mejor, entonces, tratar los resultados no en forma individual, sino por grupos, como más adelante se lleva a cabo.

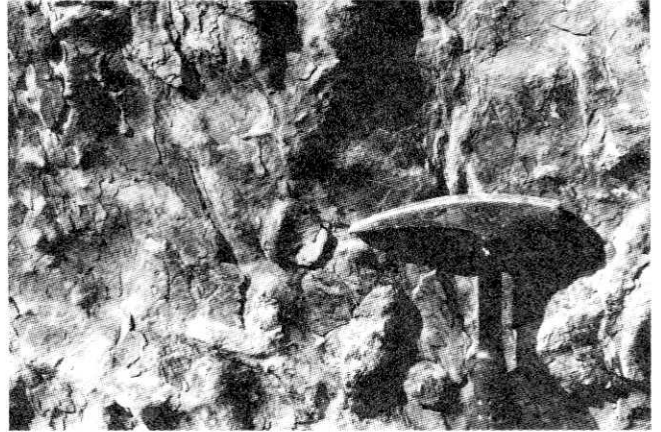


Figura 6. Icnofósiles en la base de una capa de arenisca intercalada en la Fm. La luna. Localidad V vía Sogamoso-Gámeza.

Antes de pasar al capítulo siguiente es preciso mencionar los valores obtenidos en la medición de las diaclasas de control en las areniscas estratigráficamente más próximas (v. tabla 3). Dichos datos, que no pudieron ser obtenidos en todos los casos, fueron procesados estadísticamente por el método de Kohlbeck & Scheidegger (1977) al cual se remite al lector interesado en conocer más detalles.

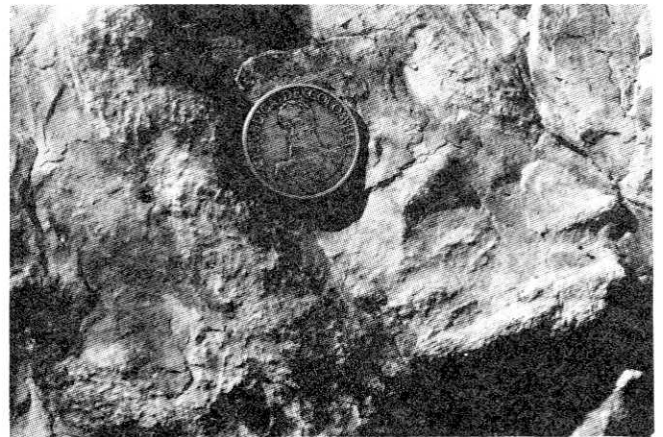


Figura 7. Icnofósiles en una intercalación arenosa de la Fm. La Luna. Localidad V, vía Sogamoso-Gámeza, cota de 2830 m.

De los datos de la tabla 2 y de la Fig. 19 resulta claro que los estilolitos y las superficies estilolíticas son anteriores al plegamiento de los estratos que los contienen. Se podría entonces tratar de "horizontalizar" las capas en cada afloramiento y obtener así la dirección de los E—H antes del plegamiento. Empero, debe tenerse en cuenta que duran-

Evaluación de los grupos de afloramientos

Generalidades. Como ya se indicó en la introducción, los afloramientos estudiados conforman

TABLA 3
Diaclasas de control en areniscas

Loc.	Máximo 1	Máximo 2	Angulo	σ_1	σ_3
B	273 ₊ 13/82 ₊ 12	164 ₊ 16/65 ₊ 14	82	287/14	22/20
C	213 ₊ 5/68 ₊ 4	314 ₊ 6/64 ₊ 5	90	174/ 3	83/35
G	343 ₊ 27/84 ₊ 23	93 ₊ 14/67 ₊ 13	74	215/24	309/10
I	273 ₊ 25/89 ₊ 21	185 ₊ 12/88 ₊ 11	88	319/ 0	49/ 2
J	74 ₊ 24/85 ₊ 18	351 ₊ 21/88 ₊ 16	83	303/ 3	212/ 5
L	242 ₊ 13/82 ₊ 13	137 ₊ 11/76 ₊ 11	78	10/18	279/ 3
M	200 ₊ 12/74 ₊ 12	105 ₊ 10/74 ₊ 9	90	242/ 0	333/23
N	84 ₊ 26/82 ₊ 22	352 ₊ 18/88 ₊ 17	89	218/ 7	308/ 4
O	68 ₊ 16/78 ₊ 15	164 ₊ 9/72 ₊ 8	88	295/22	27/ 4
T	209 ₊ 13/86 ₊ 13	271 ₊ 18/88 ₊ 17	62	330/ 2	60/ 4

tres grupos. En cada uno de ellos se calculó la mejor posición estadística de la superficie estilolítica, de los estilolitos sensu strictu, de la estratificación y de las diaclasas lisas. En aquellas localidades donde fue posible, se obtuvo también, como control, la orientación de las diaclasas recientes de las areniscas más cercanas a las rocas con estilolitos horizontales. Los resultados de la evaluación estadística en cuestión se consignan en la tabla 4, y de ellos se derivan los siguientes hechos:

Grupo Bogotá. Este grupo está constituido por los afloramientos B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M, N, O, todos localizados en las colinas que bordean la Sabana de Bogotá. Los valores obtenidos son bien definidos y demuestran que: a) Los estilolitos horizontales tienen un azimut de 128° ($= 308^\circ$) y son perpendiculares a las superficies estilolíticas. b) En promedio la estratificación es casi horizontal, ya que las diferentes inclinaciones medidas se anulan entre sí o dan lugar a una inclinación estadística incierta. c) Las diaclasas lisas son ortogonales a las superficies estilolíticas y paralelas a los estilolitos horizontales, lo cual, en el caso de que fueran contemporáneas con los E-H, permitiría interpretarlas como diaclasas de "compresión" o desgarre paralelo a la dirección de máxima com-

presión. Empero, tales diaclasas son más jóvenes que los E-H, pues ellas son ante todo verticales y no han sido rotadas por el plegamiento. d) Las diaclasas de control en las areniscas vecinas se ajustan bien al esquema de esfuerzos indicado por los E-H, y parecen corresponder con el tipo de diaclasas conjugadas, dado que la dirección de máxima compresión deducida a partir de la teoría de Mohr concuerda exactamente con la obtenida de los E-H, en tanto que la dirección de mínima compresión resulta

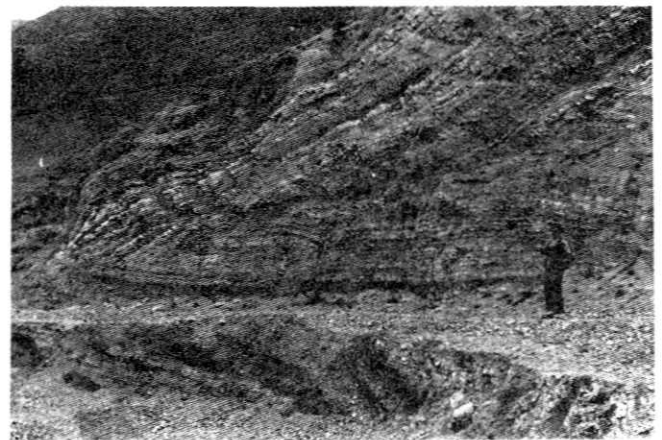


Figura 8. Macropliegues en zig-zag en la localidad R, Samacá, Fm. Plaeners.

TABLA 4
Grupos

Grupo	Sup. Estil.	capas	Diacl. lisas	Diacl. de Control	Angulo	σ_1	σ_3
(1) B - O	131 ₊ 5/86 ₊ 5	308 ₊ 4/ 8 ₊ 4	257 ₊ 38/ 5 ₊ 4	38 ₊ 5/85 ₊ 4	178 ₊ 14/80 ₊ 8	84 ₊ 17/83 ₊ 10	86 311/12 41/2
(2) AQRSTZ	317 ₊ 7/64 ₊ 8	132 ₊ 10/32 ₊ 10	134 ₊ 12/32 ₊ 7	44 ₊ 4/88 ₊ 4	209 ₊ 13/86 ₊ 13	271 ₊ 18/88 ₊ 17	62 330/ 2 60/4
(3) UVWXY	219 ₊ 28/90 ₊ 19	281 ₊ 23/22 ₊ 28	301 ₊ 11/49 ₊ 10	190 ₊ 14/81 ₊ 12			

normal a las diaclasas “lisas” que acompañan a las capas con E—H. Las conclusiones anteriores se muestran gráficamente en la Figura 19.

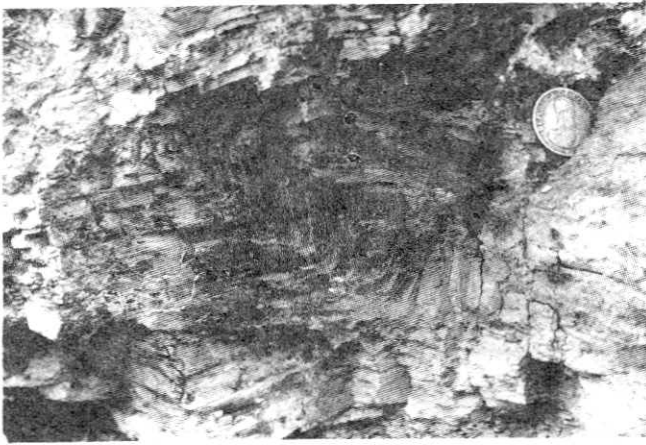


Figura 9. Micropliegues en zig-zag en la localidad R, Samacá, Fm. Plaeners.

Grupo Tunja-Villa de Leiva. Comprende los afloramientos A, Q, R, S, T, Z. Los resultados obtenidos son, en principio, similares con los del Grupo Bogotá. Empero, la dispersión de los valores promedio es algo mayor, y la inclinación (o cabeceo) de las agujas estilolíticas, aunque con azimut semejante, resulta en dirección opuesta a la del Grupo Bogotá, según se aprecia en la Fig. 19.



Figura 10. Estilolitos verticales en la localidad V, E de Gámeza.

Grupo Sogamoso. Incluye los afloramientos U, V, W, X, Y. Dado que en esta región se encontraron abundantes estilolitos oblicuos y tangenciales, resulta que la dirección promedio de los E—H (Y en la Fig. 19) no es perpendicular con la de las superficies estilolíticas (H en la Fig. 19). Así mismo, la orientación estadística de los E—H tiene un azimut de 101° , en lugar de los $128^\circ - 132^\circ$ de los Grupos Bogotá y Tunja-Villa de Leiva. Las diaclasas “lisas” son, también aquí, paralelas con las agujas estilolíticas, lo cual permitirá interpretarlas como diaclasas de compresión (“Zerrklüfte”). Debido a que las rocas con E—H en la región de Sogamoso no se pre-

sentan asociadas con areniscas próximas en la columna estratigráfica, no se obtuvieron datos en las diaclasas de control. Los resultados gráficos se muestran en la Fig. 19.

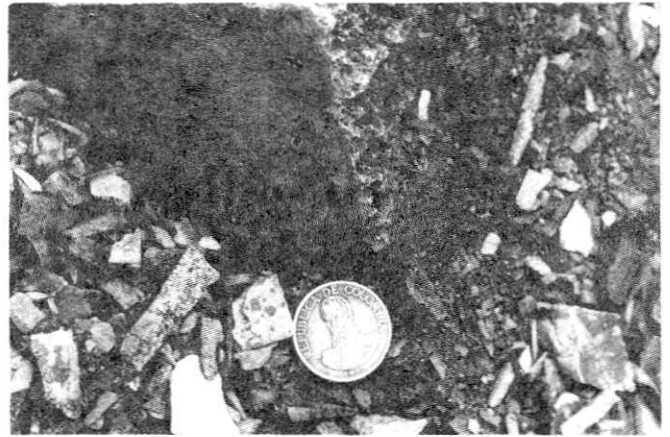


Figura 11. Estilolitos horizontales en la localidad S. Alto de Volador, vía Tunja-Villa de Leyva, Fm. Plaeners.

Discusión de los Resultados

Los resultados obtenidos de las mediciones adelantadas muestran que en la Sabana de Bogotá los E—H tienen una orientación consistente que varía entre 128° y 132° , y que se interpreta como indicadora de la dirección de compresión tectónica que dio origen a los E—H. En la región de Sogamoso, la dirección preferencial de los E—H es algo diferente, con 101° de azimut E.

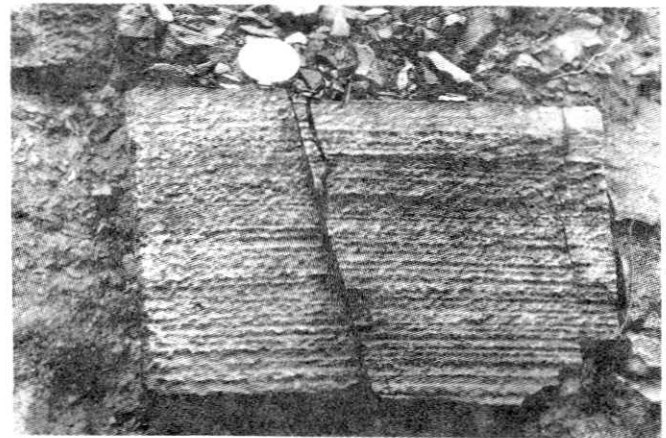


Figura 12. Superficie estilolítica bandeada en la localidad Q, Quebrada Churuvita vía Tunja-Villa de Leyva, Fm. San Rafael.

Dado que las superficies estilolíticas se encuentran siempre perpendiculares y los E—H siempre paralelos a la estratificación (rotando en el mismo grado que las capas en caso de que éstas no sean horizontales), se deduce que se trata de E—H precinemáticos o sea que su generación es anterior al plegamiento de las sedimentitas que los contienen, que como ya se anotó, varían en edad entre Aptiano/Albiano a Santoniano/Campaniano. Empero, de

acuerdo con las teorías generales sobre el origen de los E-H (Wagner 1964, Trurnit 1968a y b, Trurnit & Amstutz 1979, entre otros), éstos empiezan a desarrollarse sólo cuando las rocas han alcanzado una consolidación suficiente para fracturarse y transmitir los esfuerzos dirigidos, es decir cierto tiempo después de la sedimentación y a partir de las etapas tempranas o posteriores a la litificación. De otro lado, van der Hammen (1958) ha postulado que la Orogénesis Andina (\pm equivalente a la Orogénesis Alpídica o Tacónica) en Colombia manifiesta sus primeras etapas de plegamiento/elevación y erosión a finales del Paleoceno ("Fase Protoandina"). Una segunda, más fuerte y definitiva fase de plegamiento y elevación "final" se dio entre el Mioceno Superior y el Plioceno ("Fase Euandina").

Sin embargo, dado que, como se recordará, las superficies estilolíticas son siempre perpendiculares a las capas, se deriva que los E-H que nos ocupan

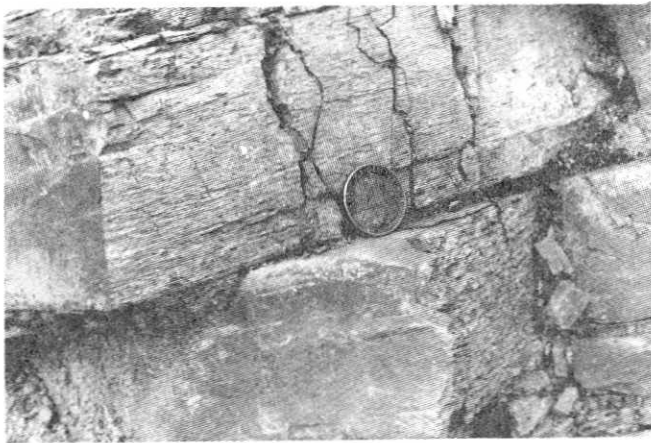


Figura 13. Numerosas superficies estilolíticas en la localidad H, Oeste de Zipacón, cherts negros en la parte alta del Gr. Villeta.



Figura 14. Estilolitos tangenciales en la localidad G, vía Tabio-Tenjo, Fm. Plaeners.

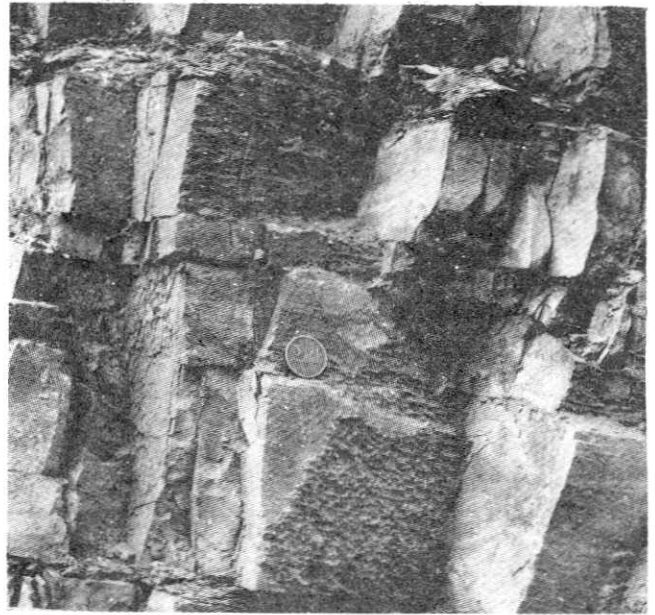


Figura 15. Diaclasas lisas y conjugadas con superficies estilolíticas, en la localidad C, Cantera El Cajón, vía Bogotá-La Vega Fm. Plaeners

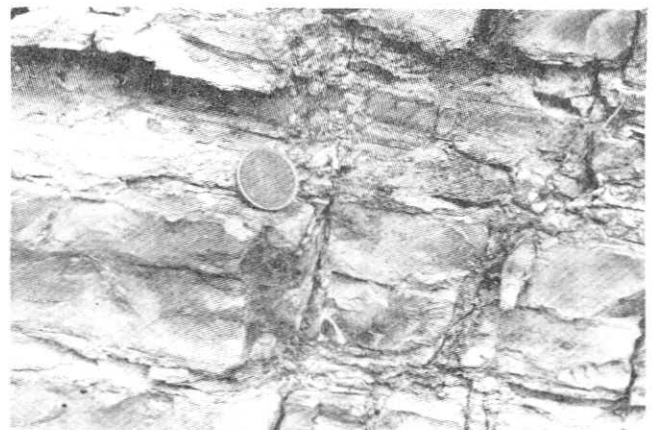


Figura 16. Diaclasas con estructuras en pluma, en la localidad D, Suroeste de Tenjo, Fm. Plaeners.

deberían haberse formado entre el Cretácico muy tardío y el Eoceno. De otra parte, los resultados antedichos se contraponen a la idea de Macellari & De Vries (1987: 290), en el sentido de que los repliegues comunes en las rocas silíceas y estilolíticas del Cretácico Superior de Colombia y Venezuela representan derrumbes sinsedimentarios, propios del borde del talud continental, o zona de "upwelling". De acuerdo con lo aquí expuesto, se trata más bien de plegamientos disarmónicos —desarrollados durante el Terciario— debidos a la incompetencia de los estratos que contienen los E-H.

En el caso de las diaclasas "lisas" que acompañan a los E-H, se tiene que tales diaclasas presentan por lo común estructuras radiales y en pluma, pero no son perpendiculares a la estratificación y, por el contrario, se mantienen en posición vertical (o sea que son independientes de la inclinación de las capas, v. tabla 2).

Por ello debe asumirse que son el producto de un fracturamiento posterior a los E-H y que se trata tal vez, de diaclasas de desgarre (Zerrklüfte).



Figura 17. Diaclasas con estructuras radiales en la localidad D, Suroeste de Tenjo, Fm. Plaeners.

La posición y orientación de las diaclasas de control en las areniscas tampoco dependen de la orientación y buzamiento de las capas, por lo cual, si se las acepta como diaclasas conjugadas, pueden ser interpretadas como de origen reciente. Las bisectrices al ángulo menor de tales diaclasas en el caso de los Grupos Bogotá y Tunja-Villa de Leiva indican una probable compresión máxima en dirección $311^{\circ}/12$ y $330^{\circ}/2$ (v. tabla 4). Dichas direcciones son conformes con las determinadas, a escala regional, por Mojica & Scheidegger (1983). Empero, la incertidumbre en la determinación del ángulo agudo conformado por la intersección de las familias de las diaclasas no permitiría establecer con precisión si el campo de esfuerzos ha permanecido constante desde el Plioceno hasta el Holoceno, o si se ha rotado en 90° .

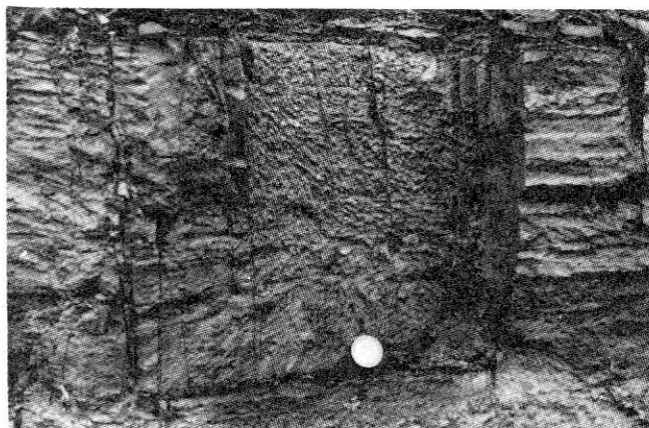


Figura 18. Estructuras en pluma desarrolladas sobre una superficie estilolítica. Localidad Q, Quebrada Churuvita, vía Tunja-Villa de Leyva, Fm. San Rafael.

Se podría intentar resolver el interrogante anterior mediante el uso de otros datos. Así, por ejemplo, Pennington (1981) ha compilado las soluciones de planos de falla de numerosos terremotos históricos en el sector septentrional de Los Andes. Seis de tales soluciones (tabla 5) serían aplicables en el área de este estudio, aunque los focos se encuentran localizados un poco al occidente. El examen de dicha tabla muestra una falta total de consistencia de las direcciones de compresión deducidas de los diferentes sismos. De hecho, un cálculo por medio del computador para el eje -P con el mejor ajuste produjo la cifra $258 \pm 90/87 \pm 65$, es decir un error de 90° . Esto significa que los ejes -P tienen una distribución aleatoria. Entonces, la pregunta arriba planteada no puede ser respondida por tal medio. Una precisión al respecto exige, por lo tanto, nuevos estudios de la micro y la macrotectónica.

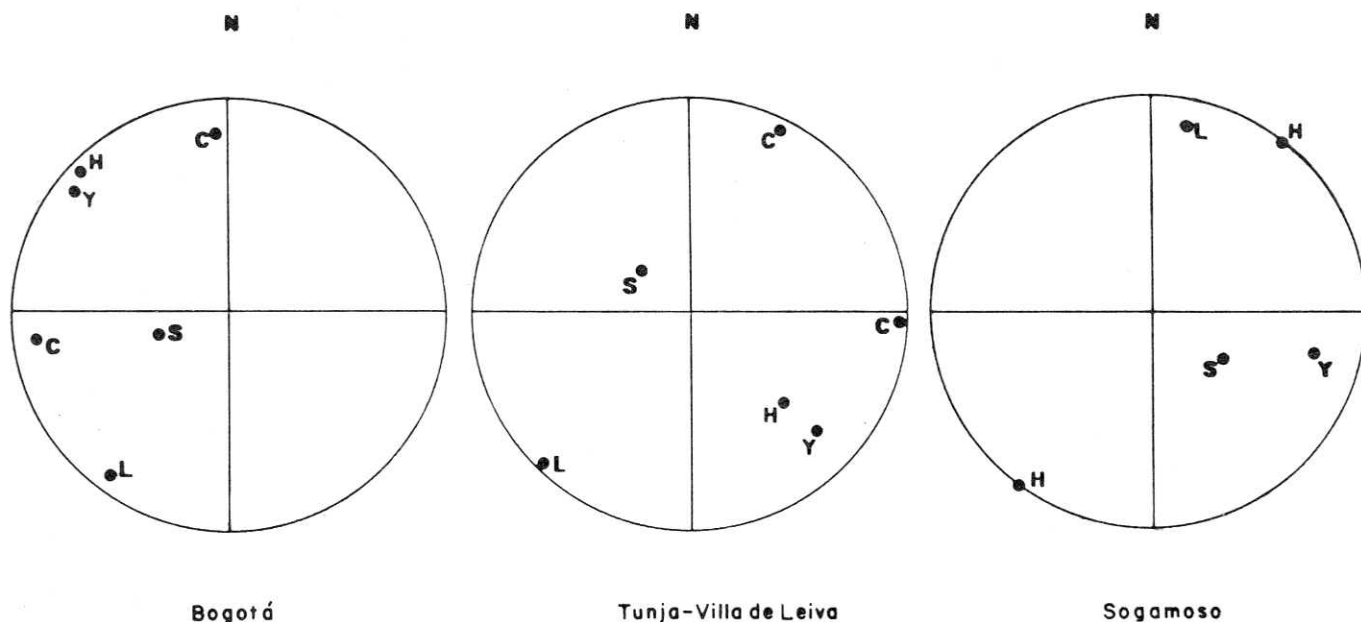


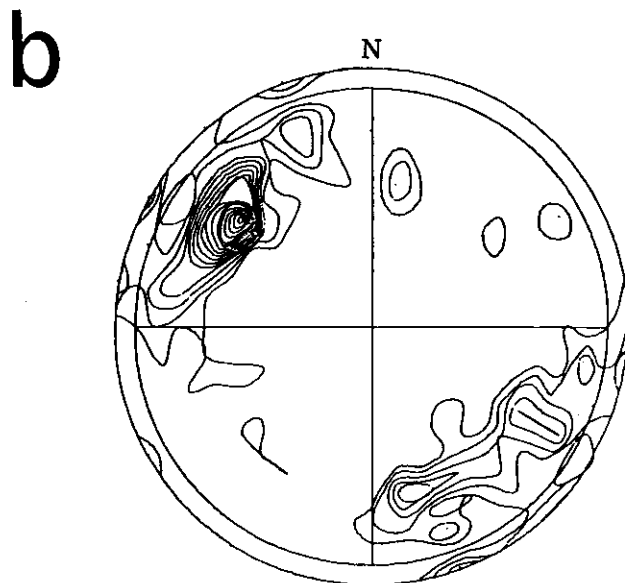
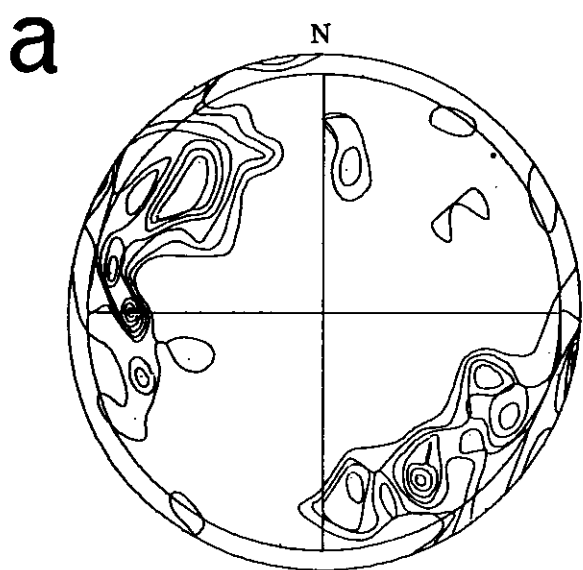
Figura 19. Representaciones estereográficas (hemisferio inferior) de las estructuras estudiadas en los grupos de afloramientos Bogotá, Tunja-Villa de Leyva y Sogamoso. Los puntos significan la posición promedio de: Y, dirección de estilolitos horizontales; H, polos de las superficies estilolíticas; S, polos de las capas; L, polos de las diaclasas lisas; C, polos de las diaclasas de control en areniscas asociadas con las rocas estilolíticas.

BCDEFGHIJKLMNO - SUP. ESTIL.

BCDEFGHIJKLMNO - AGUJAS

LAMBERT PROJECTION

LAMBERT PROJECTION



BCDEFGHIJKLMNO - CAPAS

BCDEFGHIJKLMNO - DIACL.LISAS

LAMBERT PROJECTION

LAMBERT PROJECTION

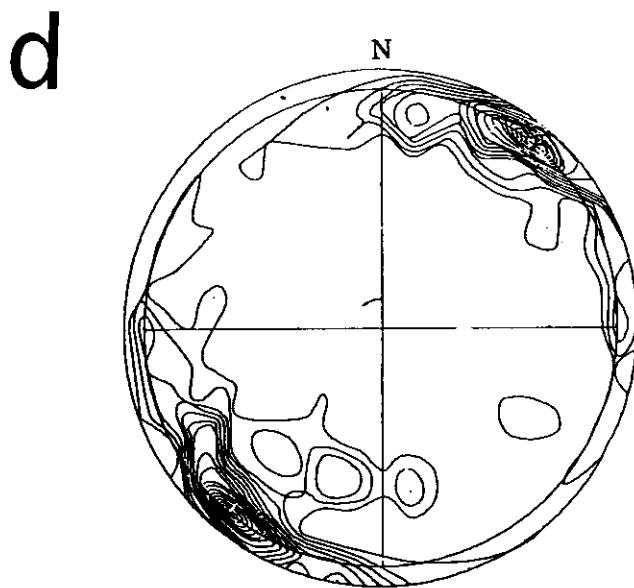
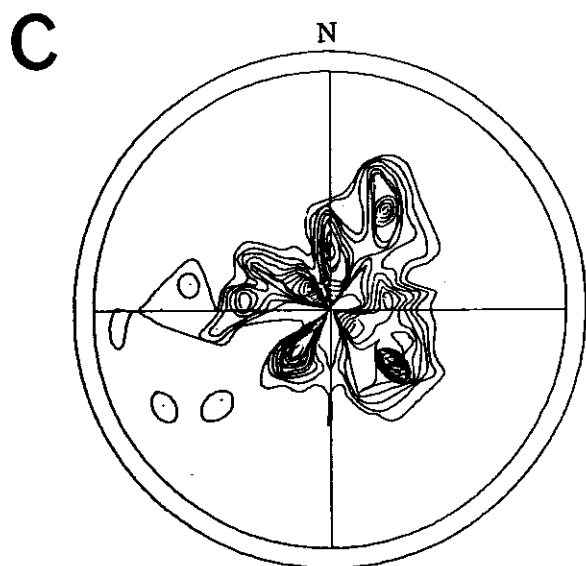


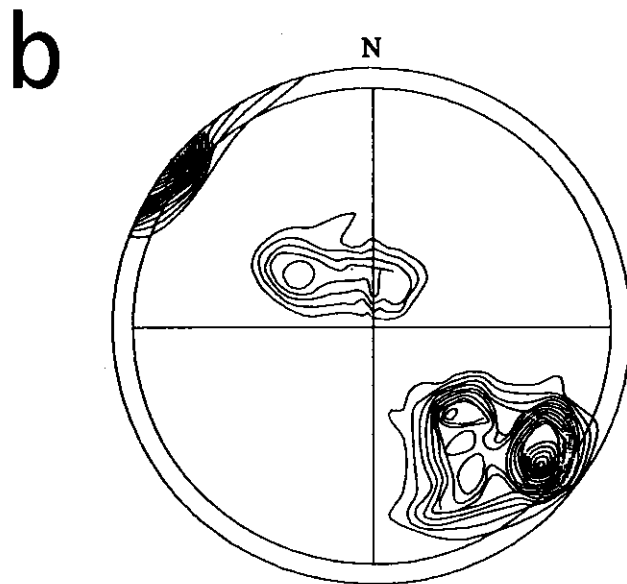
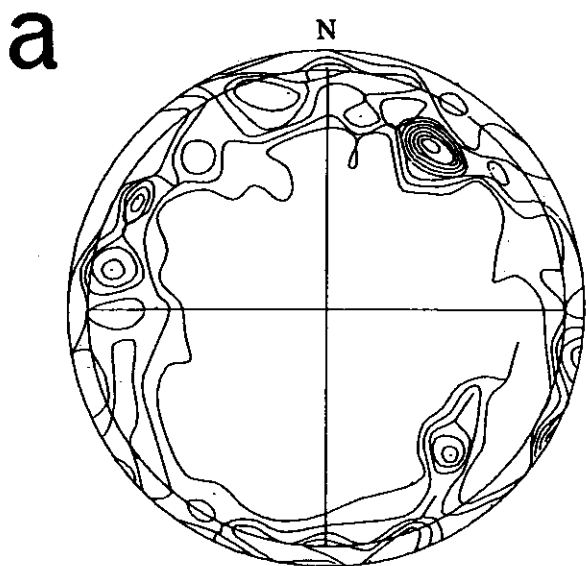
Figura 20. Diagramas de densidad de polos de: a) superficies estilolíticas, b) estilolitos horizontales, c) superficies de estratificación, d) diaclasas lisas; localidades B C D E F G H I J K L M N O . Norte magnético.

BCDEFGHIJKLMNO - CONTROL EN ARENISCAS

AQRSTZ - SUP. EST.

LAMBERT PROJECTION

LAMBERT PROJECTION



AQRSTZ - AGUJAS

AQRSTZ - CAPAS

LAMBERT PROJECTION

LAMBERT PROJECTION

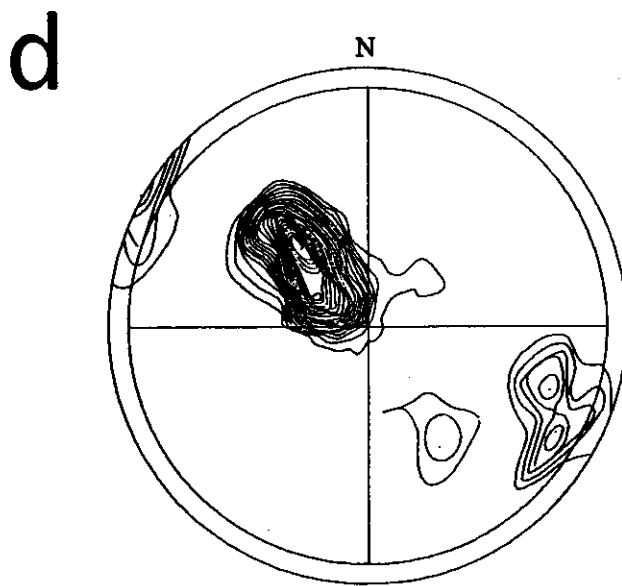
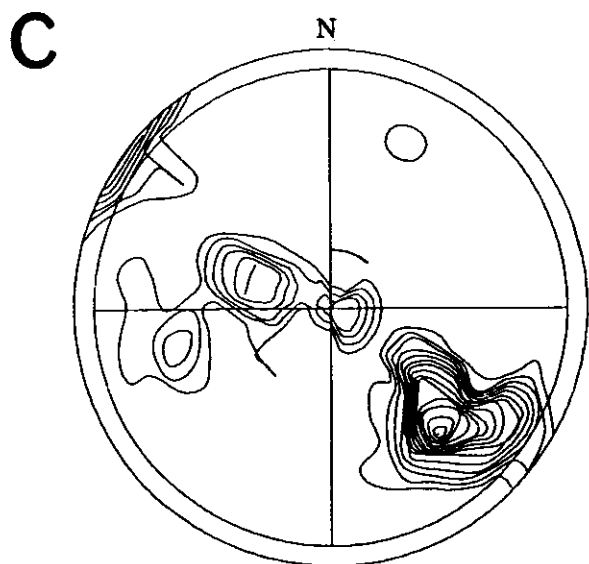


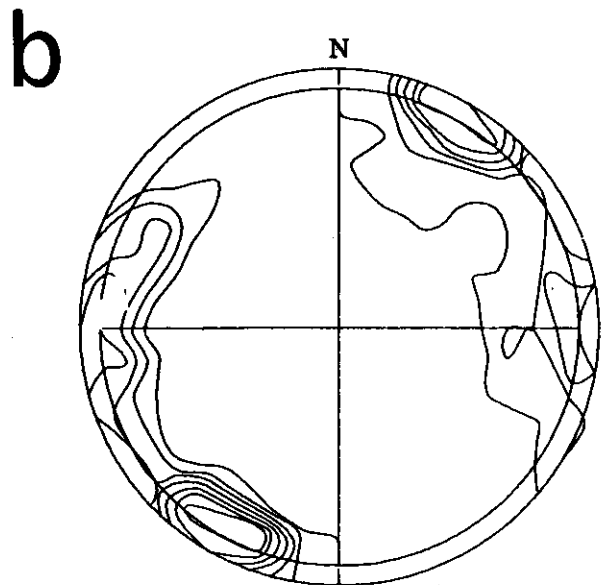
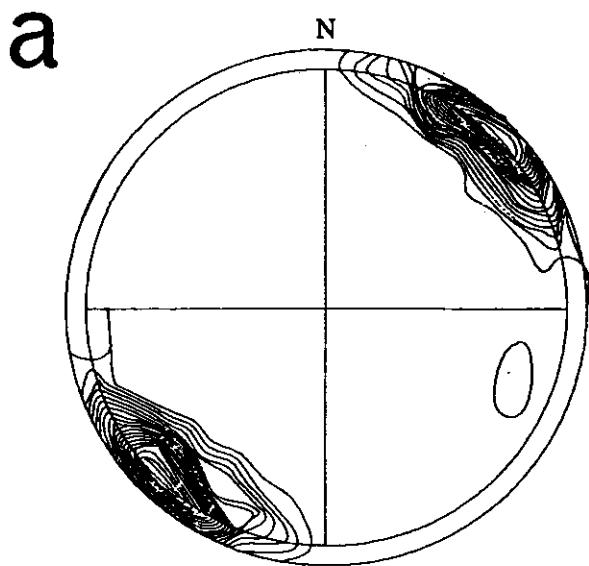
Figura 21. Diagramas de densidad de polos de: a) diaclasas de control en areniscas en las localidades B C D E F G H I J K L M N O; b) superficies estilolíticas, c) estilolitos horizontales y d) superficies de estratificación en las localidades A Q R S T Z. Norte magnético.

AQRSTZ - DIACLASAS LISAS

AQRSTZ - CONTROL DE ARENISCAS

LAMBERT PROJECTION

LAMBERT PROJECTION



UVWXY - SUP. EST.

UVWXY-AGUJAS

LAMBERT PROJECTION

LAMBERT PROJECTION

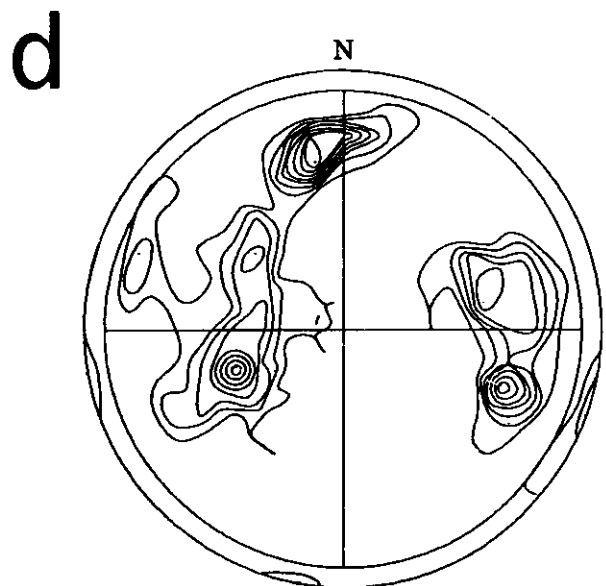
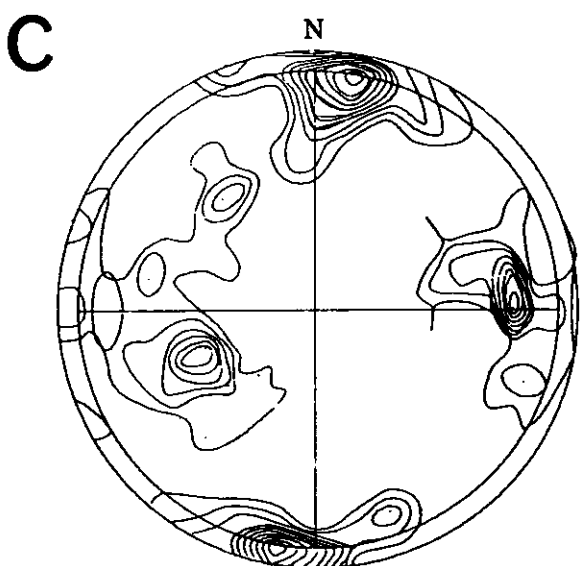


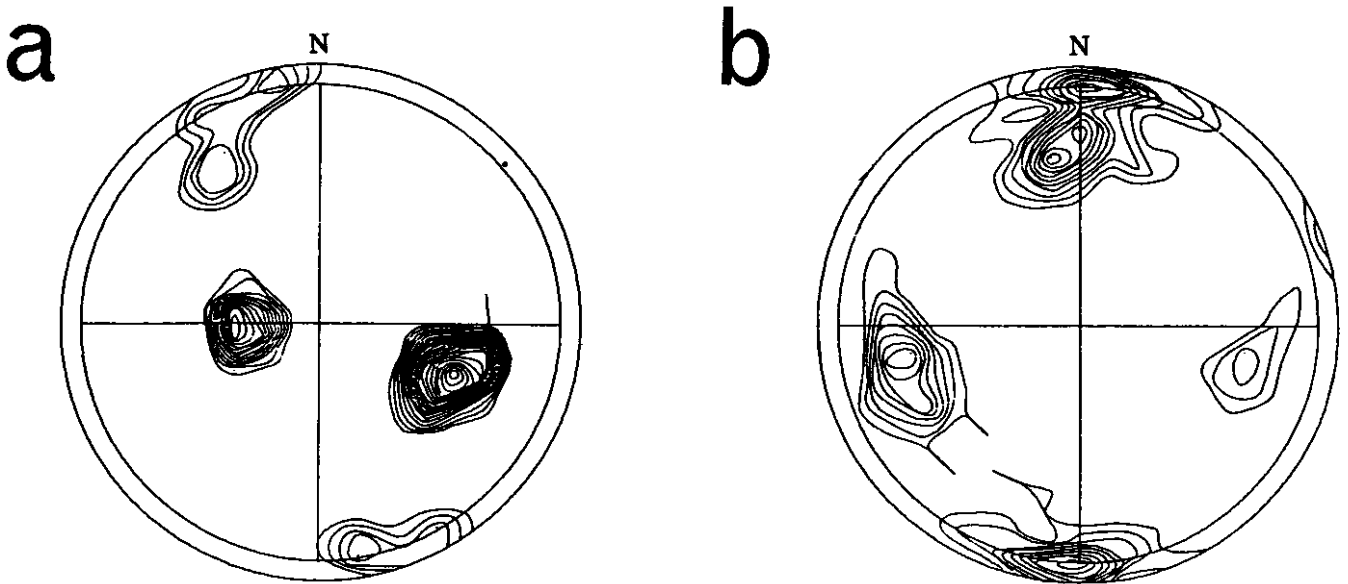
Figura 22. Diagramas de densidad de polos de: a) diacclasas lisas y b) diacclasas de control en areniscas, en las localidades A Q R S T Z; c) superficies estilolíticas y d) estilolitos horizontales, en las localidades U V W X Y. Norte magnético.

UVWXY - CAPAS

UVWXY - DIACLASAS LISAS

LAMBERT PROJECTION

LAMBERT PROJECTION



COLOMBIA EARTHQUAKES - SAB. BOGOTA P - AXES

LAMBERT PROJECTION

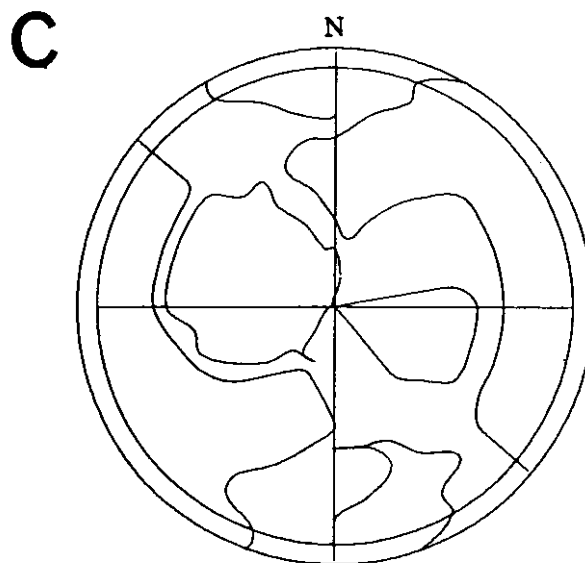


Figura 23. Diagramas de densidad de polos de: a) superficies de estratificación y b) diaclasas lisas, en las localidades U V W X Y; c) ejes P de mecanismos focales en los alrededores de la Sabana de Bogotá. Norte magnético.

TABLA 5

Terremotos — alrededores de Bogotá

Fecha	Lat N	Long W	h Km	σ_1	σ_3
1967-01-09	5.1	77.6	20	177/11	275/64
1970-12-16	6.0	77.5	13	280/59	100/31
1973-04-03	4.7	75.7	150	293/59	108/31
1973-04-24	5.0	78.1	42	77/56	316/20
1973-04-24	5.2	75.8	117	335/08	68/20
1976-11-11	5.0	78.2	33	134/53	306/37

BIBLIOGRAFIA

- BAYLY, B. 1986. A mechanism for development of stylolites. *Jour. Geology*, 94 (431-435), Chicago.
- BEIERSDORF, H. 1969: Druckspannungsindizien in Karbonatgesteinen Sud-Niedersachsens, Ost-Westfalens und Nord-Hessens. *Geol. Mitt.*, 8, 217-262, 28 Fig., Aachen.
- ETAYO, F. 1968: Sinopsis estratigráfica de la región de Villa de Leiva y zonas próximas. *Bol. Geol. U.I.S.*, 21, 19-32, 4 Figs., 1 tabla, 1 mapa, Bucaramanga.
- GOLF-RACHT, T.D., van 1982: Fundamentals of fractured reservoir engineering. *Developments in Petroleum Science* 12. Elsevier Sci. Publ. Co., Amsterdam.
- HEALD, M.T. 1955: Stylolites in Sandstones. *Jour. Geology*, 63, 101, 114, Chicago.
- INGEOMINAS 1986: Mapa de terrenos geológicos de Colombia. *Publ. Geol. Esp., Ingeominas*, No. 14, I, 1-235, Bogotá.
- JULIVERT, M. 1968: Colombie (première partie). *Lexique stratigr. internat.*, V, 4a., 1-650, 27 Figs., Centre Nat. Rech. Sci. Paris.
- KOHLBECK, F. & SCHEIDEGGER, A.E. 1977: On the theory of evaluation of joint orientation measurements. *Rock Mech.* 9: 9-25, 5 Figs., Viena.
- LETOUZEY, J. & TREMOLIERES, P. 1980. Paleo-Stress Fields around the Mediterranean since the Mesozoic from Microtectonics. Comparison with Plate Tectonic Data. *Rock Mech., Suppl.* 9, 173-192, 9 Figs., Viena.
- MACELLARI, C.E. & DE VRIES, T.J. 1987: Late cretaceous upwelling and anoxic sedimentation in northwestern South America. *Paleogeogr. Paleoclimat., Paleocology*, 59 (279-292), 8 Figs., Amsterdam.
- MATTAUER, M. 1976: Las deformaciones de los materiales de la corteza terrestre. 524 pp., Ed. Omega, Barcelona.
- MOJICA, J. 1985: Estilolitos horizontales en sedimentitas del Cretácico de la Cordillera Oriental, y su significado tectónico. *Geol. Colombiana* 14: 7-23, 15 Figs., Bogotá.
- MOJICA, J. & SCHEIDEGGER, A.E. 1983. Diaclasses recientes en Colombia y su significado tectónico. *Geol. Colombiana* 12: 57-90, 15 Figs., 5 tablas, Bogotá.
- NELSON, R.A. 1983: Localization of aggregate Stylolites by Rock Properties. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 67 (2): 313-322, 11 Figs., Tulsa.
- PARK, W.C. & SCHOT, E.H. 1968: Stylolites: their nature and origin. *J. Sed. Petr.*, 38: 175-191, 14 Figs., Menasha.
- PENNINGTON, W.D. 1981: Subduction of the Eastern Panamá Basin and Seismotectonics of North-Western South America. *Journ. Geoph. Res.*, 86, 811 (10753-10770), 13 Figs., 1 Table.
- PLESSMANN, W. 1972: Horizontal-Stylolithen im francoesisch-schweizerischen Tafel- und Faltenjura und ihre Einpassung in den regionalen Rahmen-. *Geol. Rundschau*, 61: 332-347, 7 Figs., Stuttgart.
- RENZONI, G.; ROSAS, H. & ETAYO, F. 1983: Mapa Geológico de la Plancha 171, Duitama, esc. 1: 100.000. Ingeominas, Bogotá.
- SCHAEFER, K. 1980: Paleo- and Recent Stress Fields in Tunisia and Libya from the Cenozoic Structural Bearing-. *Rock Mech., Suppl.* 9: 147-158, 5 Figs., Viena.
- SUBIETA, T.; CARNEVALLI, J. & HUNTER, V. 1988: Evolución tectonoestratigráfica de la Serranía del Interior y de la Subcuenca de Maturín-. *Mem. III Simp. Boliv. Expl. Petrol. Cuencas Subandinas*, T2 (547-578), 4 Figs., Caracas.
- TRURNIT, P. 1968a: Die Schnittführung bei der Beurteilung von Druck-Loesungsphänomenen. *Schweiz. Min. Petr. Mitt.* 48, H 2: 485-508, Basel.
- . 1968b. Druck-Loesungsstadien innerhalb der Entwicklung einer Geosynclinal. *N. Jb. Geol. Palaeont. Mh.* 6: 376-384, 3 Figs., Stuttgart.
- TRURNIT, P. & AMSTUTZ, G.C. 1979: Die Bedeutung des Ruckstandes von Druck-Loesungsvorgängen fuer die stratigraphische Abfolgen, Wechsel-lagerung and Lagerstaettenbildung. *Geol. Rundschau*, 68: 1107-1124, 16 Figs., Stuttgart.
- VAN DER HAMMEN, T. 1958: Estratigrafía del Terciario y Maestrichtiano continentales y Tectogénesis de los Andes Colombianos. *Bol. Geol.* 6 (1-3): 67-128, 7 planchas, Bogotá.
- WAGNER, G.H. 1964: Kleintektonische Untersuchungen im Gebiet des Noerdlinger Rieses. *Geol. Jb.* 81: 519-600, 45 Figs., 5 tablas, Hannover.