

NEOTECTONICA DE LOS SEDIMENTOS PLIO-CUATERNARIOS
DE LA CUENCA DE LA PAZ (BOLIVIA)

A. Lavenu

Convenio UMSA-ORSTOM

RESUMEN.- El estudio neotectónico de las formaciones plio-cuaternarias de la cuenca de La Paz, realizado con ayuda del análisis microtectónico de las microfallas (fallas de rumbo, fallas inversas, fallas normales), nos permite, en principio, poner en evidencia diferentes fases de deformación:

- fases intra a fini-Plioceno

- . una fase de compresión de dirección Z = N000 de poca importancia (fallas inversas)
- . una fase de compresión de dirección Z = N090 (con pliegues y fallas de rumbo).

- fases cuaternarias

- . una fase de distensión de dirección X = N000 (fallas normales)
- . una fase de compresión de dirección Z = N130 (fallas de rumbo)
- . una fase de distensión de dirección X = N000 (fallas normales).

29 NOV. 1978
O. R. S. T. O. M.

Collection de Référence
n° 9437 Geol.

RESUME.-L'étude néotectonique des formations plio-quaternaires du bassin de La Paz, faite a l'aide de l'analyse microtectonique des microfailles (décrochements, failles inverses, failles normales) nous permet dans une premiere approche de mettre en évidence différentes phases de déformation:

- phases intra a fini-Pliocene
 - . une phase de compression de direction Z = N000 de faible importance (failles inverses)
 - . une phase de compression de direction Z = N090 (associant plis et décrochements).
- phase quaternaires
 - . une phase de distension de direction X = N000 (failles normales)
 - . une phase de compression de direction Z = N130 (décrochements)
 - . une phase de distension de direction X = N000 (failles normales).

PRODUCCION

La manifestación la más notable de la neotectónica en la región de Altiplano, corresponde a las fallas cuaternarias de distensión que afectan a los bloques 3 del Altiplano (Servant 1976) y que marcan generalmente la céntrica de la cuenca. Estas fallas (Allpacoma, Amachuma) han sido descritas por Lebedevolny (1962) y su dirección está trazada sobre el mapa geológico a escala 1/100.000. La mayoría de las veces se encuentran escalonadas, según la dirección general andina (N130E (1) en esta parte Norte del Altiplano).

Las direcciones se leerán siempre de Norte a Sur pasando por el Este.

En escala mayor, estas fallas N130 caracterizan el pié de la Cordillera oriental (es el caso en La Paz, al Este del lago Titicaca, etc.).

En La Paz estas direcciones de fallas de distensión (N130-N100) se encuentran dentro de la Formación La Paz subyacente, a los cuales se añaden las direcciones de fallas de compresión (fallas inversas y fallas de rumbo).

I.- Las deformaciones de los depósitos de la formación La Paz.

Podemos observar, en esta formación, la superposición de todos los movimientos tectónicos contemporáneos o posteriores al depósito de la misma. Aquí el estudio microtectónico se encuentra facilitado debido a la litología relativamente fina donde las microestructuras se marcan mucho mejor que dentro del material más grueso y menos arcilloso de los depósitos cuaternarios.

I.1.- Las deformaciones de compresión.

Dentro de la cuenca de La Paz, se encuentran zonas de deslizamiento (ej. Achocalla) a veces muy extendida, resedimentadas, donde es muy difícil diferenciar los afloramientos in situ, del material deslizado. Así, hemos hecho nuestras observaciones en la ceja de la cuenca y más escasamente en el centro, donde existen algunos afloramientos in situ.

Las principales estaciones de medidas se encuentran al Sur de La Paz (2) (Llojeta 1, Achocalla 2, Ceja Uypaca 3, Amachuma 4, Loma Ventilla 5) y al Este (Ovejuyo 6, Río Achumani 7 y Río Irpavi 8) (fig.1). Hemos estudiado esencialmente las deformaciones de ruptura (microfallas inversas, microfallas de rumbo). El análisis sobre diagrama estereográfico (Schmidt, hemisferio inferior) (3) de las fallas inversas, relativamente escasas, indica, aproximadamente una dirección de compresión N000 a NE-SW. El diagrama de la figura 2 reagrupa las zonas de Ovejuyo, Llojeta y Ceja Uypaca, pues es poco significativo, debido al número reducido de las fallas medidas y al alejamiento de las estaciones de medidas.

Las fallas de rumbo dextrales y senestrales dan dos direcciones Z (dirección de acortamiento):

N090 y N130.

(2) La toponimia utilizada es la de los mapas al 1/50.000 del IGM (Bolivia).

(3) Para los métodos de análisis gráficos de una población de fallas con ayuda de los diagramas estereográficos ver anexo.

La dirección promedio $Z = N090$ se observa en las estaciones de medidas nº1, 3, 4 (fig. 3 y 4) (4). En las estaciones 1 y 4, la dirección de compresión se aleja ligeramente de la dirección promedio $N090$. En Llojeta (est.1) la dirección Z es $N074$. En Amachuma (est.4) fallas de rumbo conjugadas dan una dirección de compresión $Z = N067$. Sin embargo, debemos tener en cuenta que nos encontramos en el nivel estructural superior (Mattauer 1975) y factores como la presencia del zócalo paleozoico cercano, accidentes profundos, etc., pueden hacer girar Z . En Rio Irpavi (est.8), fallas de rumbo dextrales, de dirección promedio $N070$, son compatibles con tal dirección de Z . A estas fallas de rumbo están ligados pliegues amplios, hectométricos a kilométricos de una dirección promedio N-S. Es el caso en el río Achumani y cerca de Llojeta.

Al contrario, las estaciones de medidas 5 y 6 (fig.5 y 6) la primera en la Formación Umala (Loma Ventilla), la segunda en la Formación La Paz (Ovejuyo) (5) dan una dirección $Z = N130$.

Por el momento, nunca hemos visto las direcciones $N090$ y $N130$ superponerse en una misma estación. Sin embargo, en la estación 4, diaclasas afectan la formación La Paz y más particularmente la cinerita Chijini. Según sus direcciones, parecen corresponder a dos familias de fallas de rumbo. La deformación relativamente reducida, daría solamente diaclasas y no microfallas de rumbo. Considerando el diagrama de las diaclasas (fig.7) podemos ver que se dibujan dos familias de direcciones promedias ($N79$ y $N174$) cuyos polos pueden dar dos direcciones de Z :

- una $N040$

- otra $N130$

No conocemos una dirección de compresión $N040$. Al contrario encontraríamos aquí la dirección $N130$ ya conocida en las estaciones 5 y 6. En Amachuma tendríamos tal vez la superposición de las direcciones $Z = N067$ (ligada a $Z = N090$) y $Z = N130$.

(4) También hemos observado esta dirección de compresión $Z = N090$ en los depósitos de la Formación Umala en Ayo-Ayo a 80km al sur de La Paz.

(5) Estas dos formaciones de nombres diferentes serían de la misma edad (R. Hoffstetter y al 1971, C.Martínez 1976 inedito).

I.2.- La deformación de distensión.

Encontramos en las Formaciones Umala y La Paz tres familias principales de fallas normales:

- a) una familia (la más numerosa) comprendida entre N070 y N115.
- b) otra comprendida entre N120 y N155.
- c) por fin, una familia, más escasa, comprendida entre N030 y N050.

El examen de los diagramas realizados (fig.8 y 9) nos muestra que podemos determinar direcciones de X (dirección de alargamiento) entre N344 y N005, es decir una dirección promedio N000. Esta fase de distensión da principalmente fallas normales E-W en promedio, pues un quinto solamente de las fallas medidas (23 sobre 119) reagrupan las familias 2 y 3. Estas últimas son compatibles tanto con una dirección de X = N000 como una dirección de X = N085. Actualmente no podemos confirmar, o negar, la existencia de tal dirección de distensión N085. Solo aparece claramente la dirección de distensión N000 que es posterior a la fase de compresión Z=N090, porque corta fallas de rumbo (Ceja Uypaca). Como lo veremos enseguida esta deformación tiene una edad cuaternaria.

II.- Las deformaciones de los depósitos cuaternarios post-La Paz.

II.1.- La deformación en compresión.

Hemos observado solamente escasas huellas de la tectónica en compresión en los terrenos cuaternarios. Al Norte de La Paz, río arriba del río Kaluyo, observaciones hechas dentro de morenas, muestran fallas de rumbo senestrales de direcciones N020 y N000. Sobre estos espejismos, la falla de rumbo se marca por estrias profundas. En la cuenca de Achocalla: margen izquierda del río Allpacoma, fallas de rumbo (observadas en compañía de J.L.Blés) afectan el "Torrente de Barrp" (6). Son fallas de rumbo senestrales N152 (con doble movimiento senestral marcado por estrias profundas y estrias más delgadas) y

(6) Dobrovolny (1962) le da una edad inferior a 9000 años.

fallas de rumbo dextrales N127. Aquí también sobre un espejo, estrias de fallas normales se superponen a las estrias profundas. Estas fallas de rumbo senestrales N152 y dextrales N127 dan una dirección de compresión cerca de N140. Las fallas de rumbo del río Kaluyo son compatibles con tal dirección. Es la misma dirección de compresión ya encontrada en Loma Ventilla y Ovejuyo (N130).

Podemos anotar, que esta dirección de compresión, al nivel de La Paz, se encuentra paralela a la dirección de la cadena de los Andes.

II.2.- La deformación de distensión.

Las huellas de la distensión son mucho más visibles. Particularmente son las fallas que desplazan la cubierta del glacis 3 en la ceja del Altiplano alrededor de la cuenca de La Paz (Allpacoma - Amachuma) (fig.10). Estas fallas tienen una dirección promedio N130 y los segmentos escalonados son N100. Su rechazo es normal. En Allpacoma, las estrias son pocas marcadas (pitch 81E); el rechazo es neto. Generalmente el espejo de estas fallas tiene un buzamiento hacia el N-NE, a veces hacia el S-SW.

Encontramos esta familia de fallas E-W en la Quebrada Minasa al NE de la ciudad. Aquí estas fallas tienen una dirección N080 y un buzamiento hacia el S.SW y afectan la primera glaciación cuaternaria Calvario, los depósitos Purapurani subyacentes y la superficie del glacis 3 en Huaripampa. Sobre una distancia de 500 metros, más o menos, se puede cifrar el rechazo alrededor de 30 metros como mínimo.

Cerca de Villa Ballivian, en el perfil de la autopista, se puede notar la presencia de fallas normales de direcciones N040 y N125, afectando los depósitos cuaternarios. Estas direcciones marcan aquí el límite del Altiplano y hubieran podido ser utilizadas, posteriormente, por deslizamiento de terreno. En el río Chuquiaguillo, al nivel de la antigua planta eléctrica, la cinerita Chijini, también está afectada por fallas de dirección N130. Rio arriba del río Kaluyo, estrias de fallas normales se superponen a las estrias profundas de las fallas de rumbo N000 y N020.

De modo general, las fallas cartográficas son E-W hacia NE-SW y corresponden a una dirección de distensión N-S.

Al nivel de Allpacoma-Llojeta según el esquema de la figura 11 podemos poner en evidencia dos movimientos en distensión según la misma dirección de falla (WNW-ESE con rechazo hacia el NE). Al NE de la falla, en el bloque bajo, tenemos un gran espesor de gravas Purapurani. El glacis 3, señalado por un nivel importante de altera-

ción, de color rojo, y su cubierta de gravas cuaternarias, están en contacto con las gravas Purapurani. Al SW de la falla, las gravas Purapurani no existen y el glacis 3, con su nivel de alteración corta directamente la Formación La Paz arcillosa. Eso muestra que, en un primer tiempo, antes de la formación del glacis 3, la falla de Allpacoma ha tenido un movimiento en falla normal y su rechazo es importante. La parte superior del afloramiento de la Formación La Paz está desplazada de 100m por lo menos de un lado a otro de la falla. Después de la formación del glacis 3 la falla vuelve a moverse en distensión en el mismo sentido pero con un rechazo menor (5 a 10m).

Del punto de vista cronológico, las fases de distensión cuaternarias se suceden de la manera siguiente:

- a) primera fase de distensión de dirección N000 anterior al glacis 3;
- b) fase de compresión N130 post-glacis 3;
- c) segunda fase de distensión de dirección N000 posterior a la fase de compresión N130. En efecto observamos la superposición de las estrias de falla normal y de falla de rumbo sobre los espejos de fallas de las morenas del río Kaluyo y del "Torrente de Barro" del río Allpacoma.

Entre Llojeta y el aeropuerto las observaciones muestran las fallas dispuestas de forma escalonada. A Llojeta, por debajo de estas fallas escalonadas N100, hemos medido dentro de la Formación La Paz numerosas fallas de rumbo N080 hasta N147 senestrales y N045 hasta N110 dextrales; o sea un promedio N110 para las senestrales y N050 para las dextrales (fig.4). Debemos considerar estas fallas de rumbo como cizallamientos conjugados de Riedel, verticalmente encima de una zona de cizallamiento mayor. Según el esquema de la figura 12 podemos calcular la dirección del cizallamiento mayor (en este caso N125) debido a una dirección de compresión teórica $Z = N080$. Habíamos encontrado N074 en el diagrama de la figura 4. Así, en un primer tiempo, tenemos una gran fractura N125 (que debe encontrarse en el zócalo paleozoico o mesozoico) que se mueve en falla de rumbo senestral durante, o al final del Plioceno. Después ocasiona la creación de fallas de rumbo conjugadas N110 y N050 dentro de la Formación La Paz. Por fin la fase de distensión N000 provoca la formación de fallas normales a lo largo de los segmentos N100. Eso explicaría su disposición escalonada.

CONCLUSION

El estudio de las deformaciones tectónicas de los depósitos plio-cuaternarios de la cuenca de La Paz muestra los efectos de una neotectónica bien desarrollada y sobre todo de una neotectónica de distensión.

El análisis microtectónico de las microfallas, observadas y medidas en el campo, indica que los depósitos de las Formaciones La Paz y Umala son afectados por movimientos tectónicos en compresión de dirección promedio N000 y N090.

Las formaciones cuaternarias sufren una tectónica de compresión de dirección N130. Esta fase se encuentra entre dos fases de distensión de misma dirección N000. La fase de compresión y la última fase de distensión afectan el "Torrente de Barro" de Achocalla, el cual es posterior al glacis 3. Es la formación más reciente observada que ha sufrido estas deformaciones (menos de 9000 años según E. Dobrovolsky 1962).

Así tenemos la sucesión siguiente:

- fase intra a fini-Plioceno (afectan las Formaciones La Paz y Umala).
 - . la fase de compresión de dirección Z= N090 dando pliegues y fallas de rumbo.
 - . la fase de compresión de dirección Z = N000 con fallas inversas.

No conocemos la cronología de estas dos fases.

- fases cuaternarias.
 - . la fase de distensión de dirección X = N000 (fallas normales)
 - . la fase de compresión de dirección Z = N130 con fallas de rumbo
 - . la fase de distensión de dirección X = N000 (fallas normales).

La figura 13 recapitula la posición de las estaciones de medidas y las direcciones de las diferentes fases de compresión y de distensión.

BIBLIOGRAFIA

- AHLFELD (F), BRANISA (L), 1960 - Geología de Bolivia - Ed. Don Bosco La Paz - Bolivia.
- ARTHAUD (F), 1969.- Méthode de détermination graphique des directions de raccourcissement, d'allongement et intermédiaire d'une population de failles. Bull. Soc. Géol. Fr., t XI, p.729-737.
- ARTHAUD (F).-CHOUKROUNE (P), 1972.- Méthode d'analyse de la tectonique cassante a l'aide de microstructures dans les zones peu déformées. Exemple de la plateforme Nord-Aquitaine. Rev. I.F.P. vol XXVII, N3, Sept.-Oct. 1972, p.715-732.
- ASCARRUNZ (R), 1973.- Contribución al conocimiento geológico del area comprendida entre los pueblos de Viacha - Corocoro - Umala. Soc. Geol. Bol. Bol. 20, p.29-64.
- AUDEBAUD (E) y al. 1973.- Les traits géologiques essentiels des Andes centrales (Pérou-Bolivie). Rev. géo. phys. géol. dyn. (2) vol. XV fasc. 1-2, pp. 73-114.
- BOTELLO (R) y al. 1972.- La carte tectonique de Bolivie (1/5.000.000) cah. ORSTOM ser. géol. vol IV N2, p. 149-192.
- DALMAYRAC (B) 1974.- Un exemple de tectonique vivante: les failles subactuelles du pied de la Cordillere Blanche (Pérou). Cah. ORSTOM ser. géol. vol VI, N°1, p. 19-27.
- DOBROVOLNY (E) 1962.- Geología del Valle de La Paz. Dept. Nac. geol, Minist. Min. Petr. Bol. N°3 esp. 153 p. La Paz.
- DOLLFUS (O), MECARD (F) 1968.- Les formations quaternaires du Bassin de Huancayo et leur néotectonique (Andes centrales péruviennes) Rev. géog. phys. géol. dyn. (12) Vol. X. fasc. 5, p.429-440.
- EVERNDEN (J.F.) y al. 1966.- Correlaciones de las formaciones terciarias de la cuenca altiplánica a base de edades absolutas, determinadas por el método Potasio-Argon. Serv. geol. Bol. Hoja inf. n°1 La Paz.
- FABRE (D), ROBERT (J.P.) 1975.- Analyse expérimentale des ruptures de la couverture liées a un mouvement décrochant du socle et applications. Ann. Soc. géol. Nord XCV, 3, p. 175-182.

- HARTENBERGER (J.L.) 1975.- Nouvelles découvertes de rongeurs dans le Déséadien (olig.inf.) de Salla-Luribay (Bolivie). C.R. Acad. Sc. Paris. t 180, D., p. 427-430.
- HOFFSTETTER (R) y al. 1971.- Le gisement d'Ayo-Ayo (Bolivie), une succession stratigraphique Pliocene-Pléistocene datée par des mammifères. C.R. Acad.Sc. Paris t 273, D.p.2472-2475.
- HOFFSTETTER (R) y al. 1972.- Nouveaux gisements de mammifères néogènes dans les couches rouges de l'Altiplano bolivien. C.R. Acad. Sc. Paris t 275, D.p. 739-742.
- LAVENU (A) 1976.- Failles verticales a stries verticales affectant des ignimbrites plio-quatérnaires (sillar) dans le sud du Pérou (Arequipa). Cah. ORSTOM, Sér. Géol., vol VIII, n°1, pp. 3-9.
- LAVENU (A), SOULAS (J.P.) 1974.- Observations de microfailles plio-quatérnaires en distensión le long de la cote sud du Pérou. Bull. Inst. Fr. Et. And. III n°2 p. 39-48.
- MARTINEZ (C) 1976.- en prensa.
- MARTINEZ (C) y al. 1972.- Caracteres généraux des orogènes Précambriens, Hercyniens et Andins au Pérou et en Bolivie. 24th IGC. Section I, p. 136-146.
- MARTINEZ (C) y al. 1973.- Historia estructural del Altiplano de Bolivia Sintesis estratigráfica, tectónica y del volcanismo. II Congr. Latino-americano de Geol, Caracas 19p.
- MEGARD (F) y PHILIP (H) 1976.- Plio-Quaternary tectono-magmatic zonation and plate tectonics in the Central Andes Earth and Planetary Sci. Letters, V 33 p.231-238.
- SERVANT (M) 1976.- El cuaternario del Altiplano de Bolivia, Extensiones lacustres y morfogénesis. I Congr. Nac. Geol. Bolivia (en prensa).
- SERVANT (M), FONTES (J.C.) 1976.- Dataciones radiométricas sobre el cuaternario reciente del Altiplano de Bolivia. I Congr. Nac. Geol. de Bolivia (en prensa).
- SOULAS (J.P.) 1974.- La chaîne andine du Pérou central; chronologie, orientation et style des phases tectoniques du Tertiaire supérieur. Aperçus sur la tectonique quaternaire. Bull. I.F.E.A. IV n°3-4 p. 127-156.

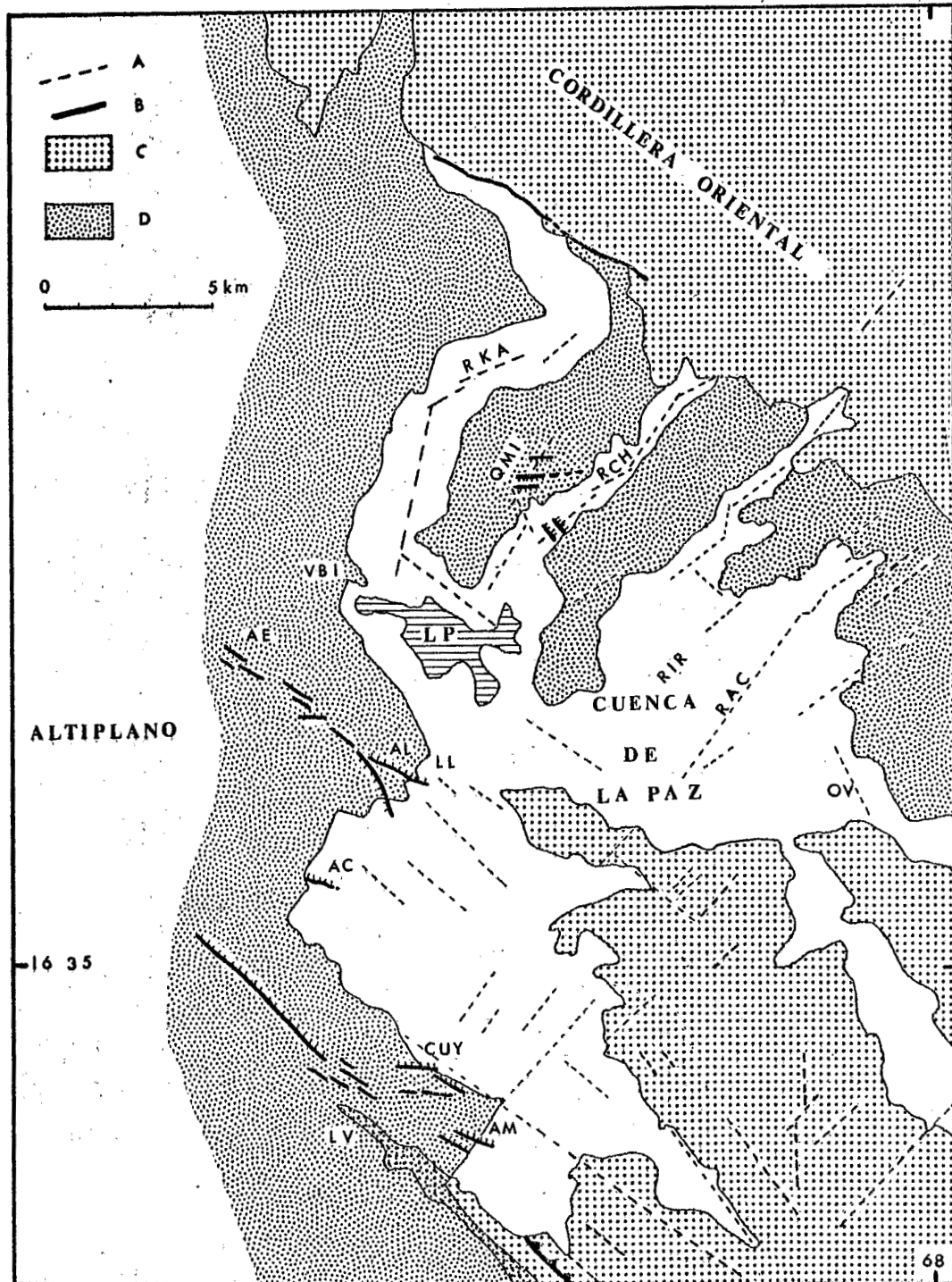


Fig.1.- Esquema de la cuenca de La Paz y sus alrededores.

A.- Alineamientos morfológicos y cartográficos principales.- B.- fallas.- C.- Formaciones pre-pliocénicas.- D.- Superficie del Altiplano.
 AC: Achocalla, AE: Aeropuerto, AL: Allpacoma, AM: Amachuma, CUY: Ceja Uypaca, LL: Llojeta, LP: La Paz, LV: Loma Ventilla, OV: Ovejuyo, QMIN: Quebrada Minasa, RAC: Río Achumani, RCH: Río Chuquiaguillo, RIR: Río Irpavi, RKA: Río Kaluyo.

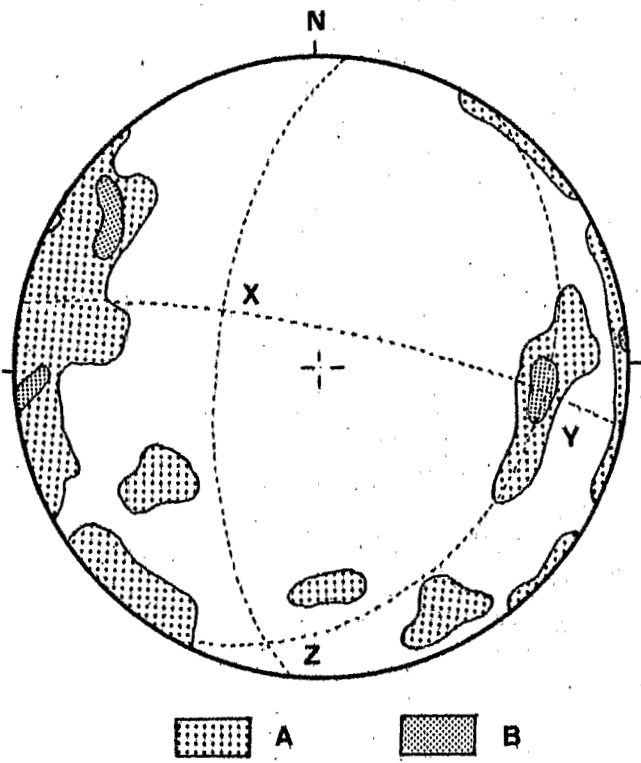


Fig.2-Diagrama de los polos de los planos de movimiento de las fallas inversas de las estaciones de medidas de Llojeta, Ceja Uypaca y Ovejuyo.

(17 f. inversas) $Z = 10^\circ - N193$.

A: 0 a 5,9% - B: 5,9 a 11,8%.
1% por unidad de superficie.

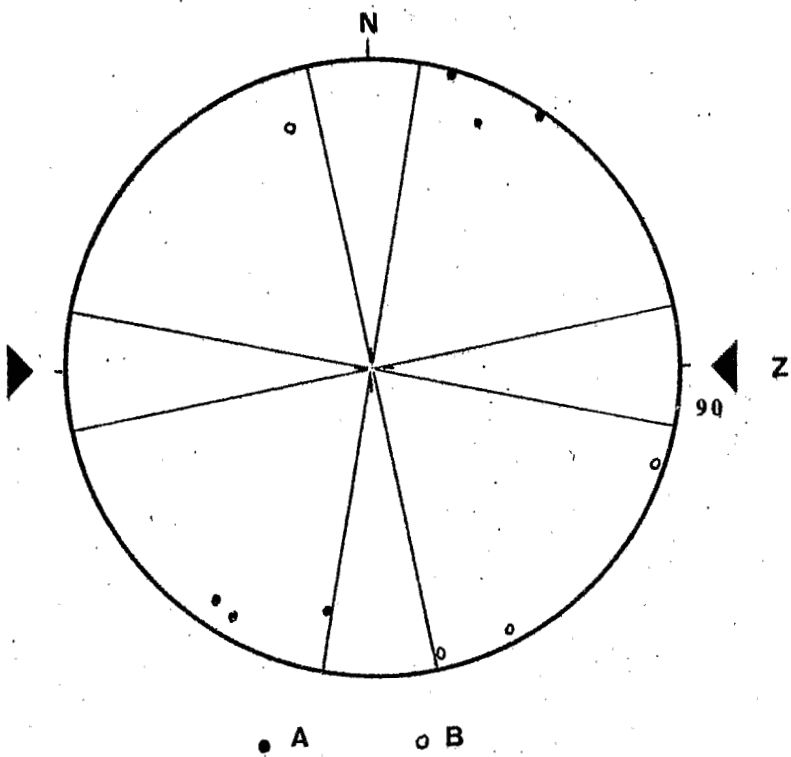


Fig.3-Diagrama de la estación de medida de Ceja Uypaca,

(10 f. de rumbo) - $Z = N 090$.

A: Polos de las f. de rumbo senestrales - B: Polos de las f. de rumbo dextrales. (Los símbolos son los mismos para los diagramas siguientes).

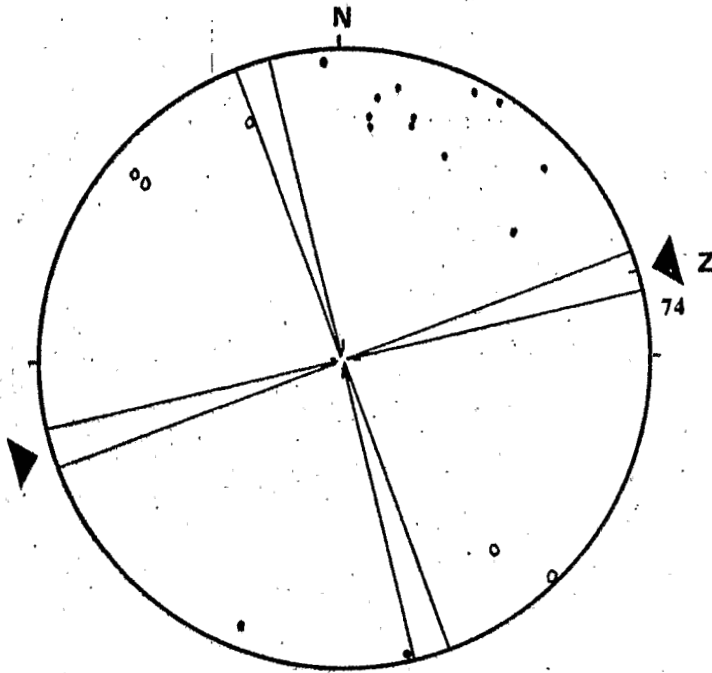


Fig.4-Diagrama de la estación de medida de Llojeta.

(18 f. de rumbo) - Z = N 074.

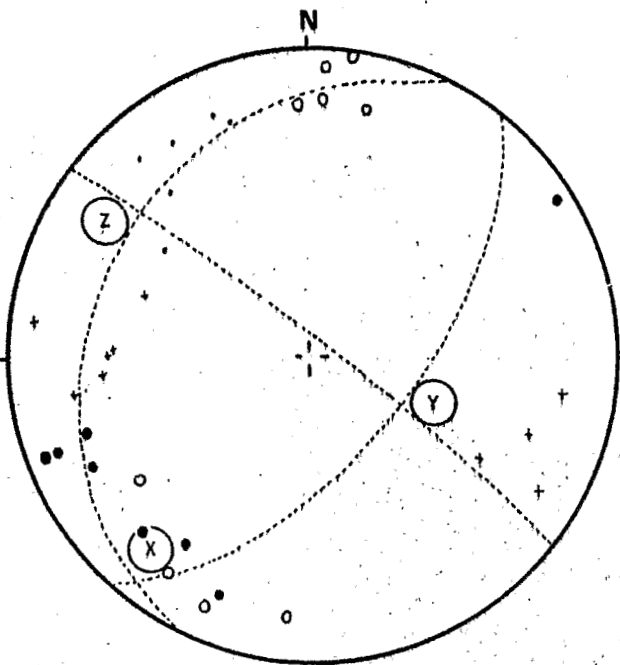


Fig.5-Diagrama de la estación de medida de Loma Ventilla.

(18 f. de rumbo) Z = 27°- N311.

A: Polos de las f. de rumbo senestrales - B: Estrias de las f. de rumbosenestrales - C:Polos de las f. de rumbo dextrales - D: Estrias de las f. de rumbo dextrales.

• A . B ○ C + D

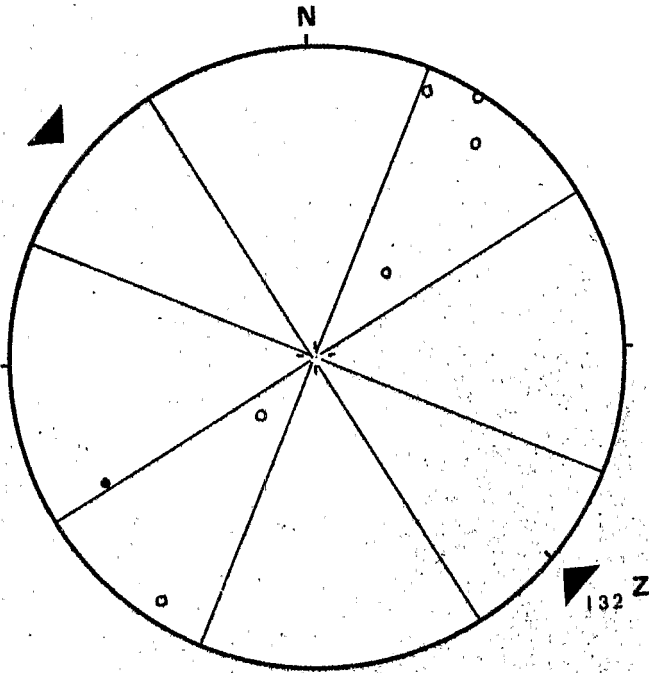


Fig. 6-Diagrama de la estación de medida de Ovejuyo.

(7 f. de rumbo) - Z = N 132.

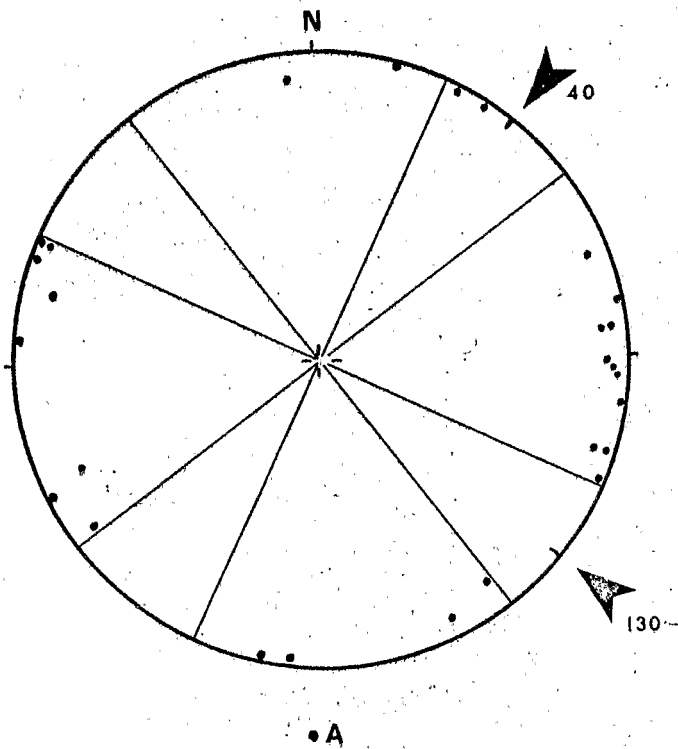


Fig. 7-Diagrama de la estación de medida de Amachuma, con dos direcciones posibles de compresión N040 y N130

A; Polos de 27 diaclasas.

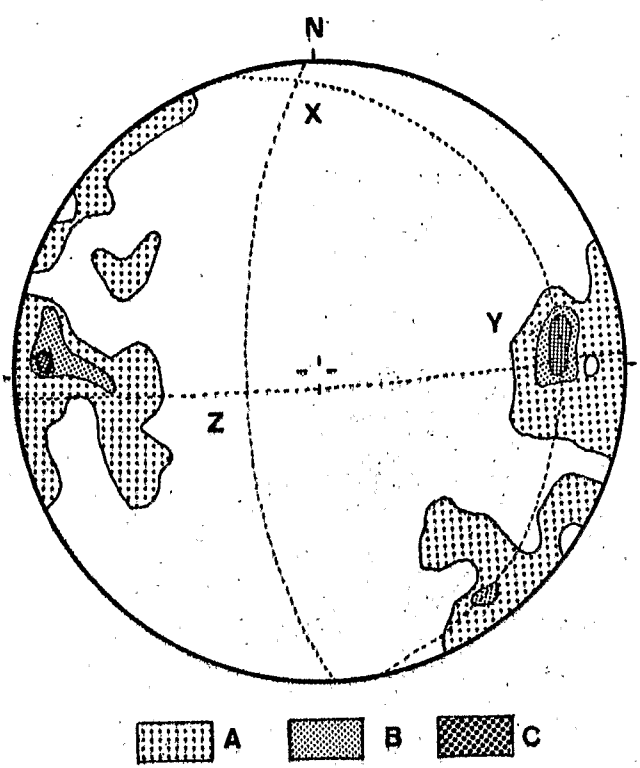


Fig.8-Diagrama de la estación de medida de Ceja Uypaca.

(18 f. normales, polos de los planos de movimiento)

X = 02° - N 358.

A: 0 a 5,6% - B: 5,6 a 7,2% - C: 7,2 a 16,8%.

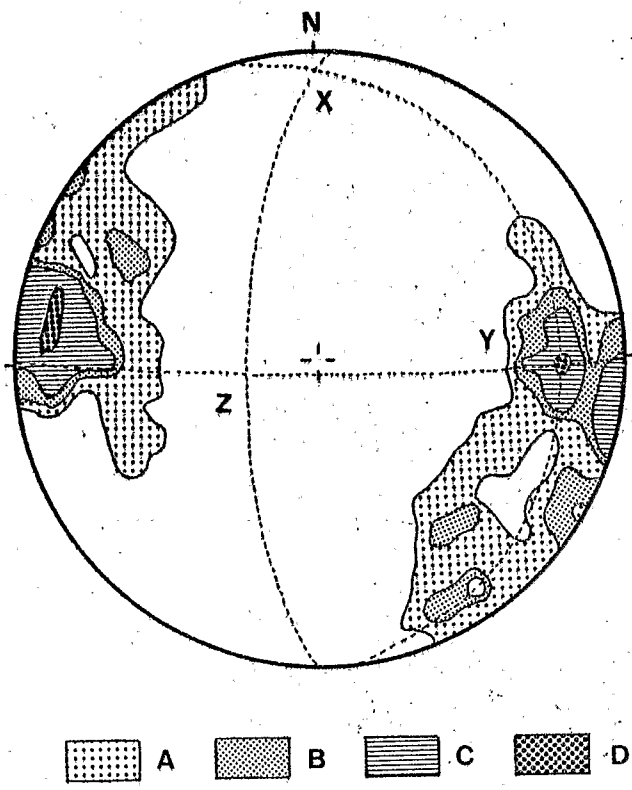


Fig.9-Diagrama de la estación de medida de Irpavi.

(40 f. normales) X = 04° - N359.

A; 0 a 2,5% - B: 2,5 a 5%
C: 5 a 12,5% - D: 12,5 a 17,5%.

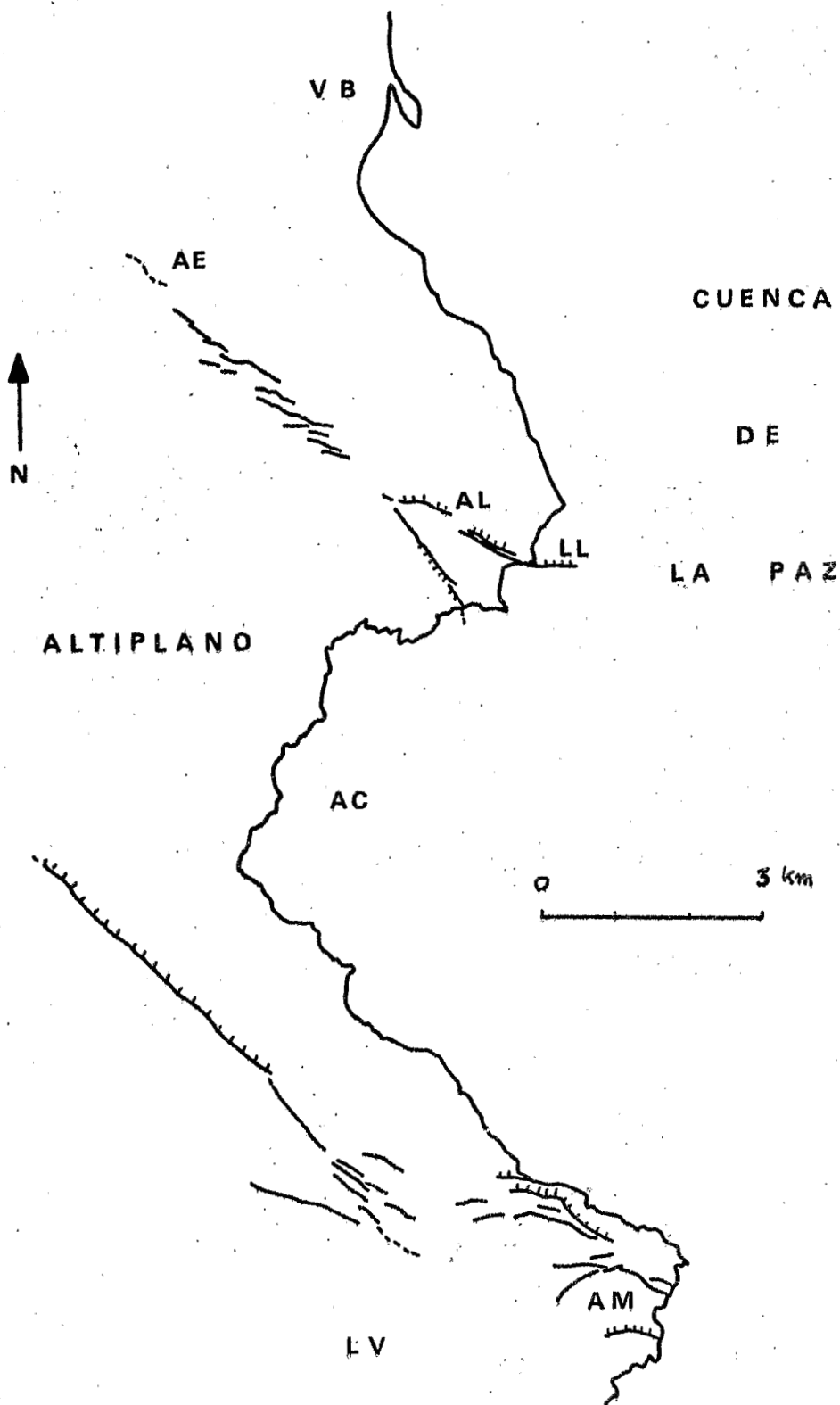


Fig.10-Esquema de las fallas normales cuaternarias que afectan al glacis 3.

(según las fotografías aéreas Hycon n°20550 y 28641).

AC: Achocalla, AE: Aeropuerto, AL: Allpacoma, AM: Amachuma, LL: Llojeta, LV: Loma Ventilla, VB: Ballivian (V)

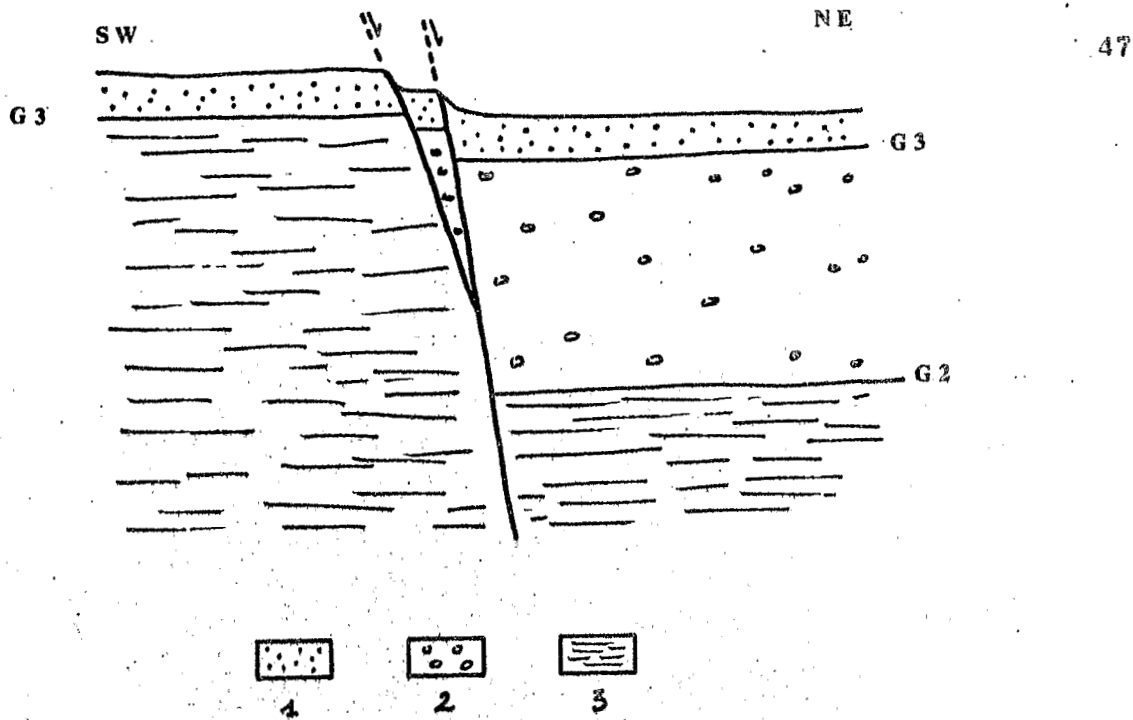


Fig. 11-Perfil esquemático perpendicular a la falla normal de Alpacomá.

1: cubierta del glacis 3 (G3) - 2: gravas Purapurani encima del glacis 2 (G2) - 3: Formación La Paz. (Las alturas no son respetadas).

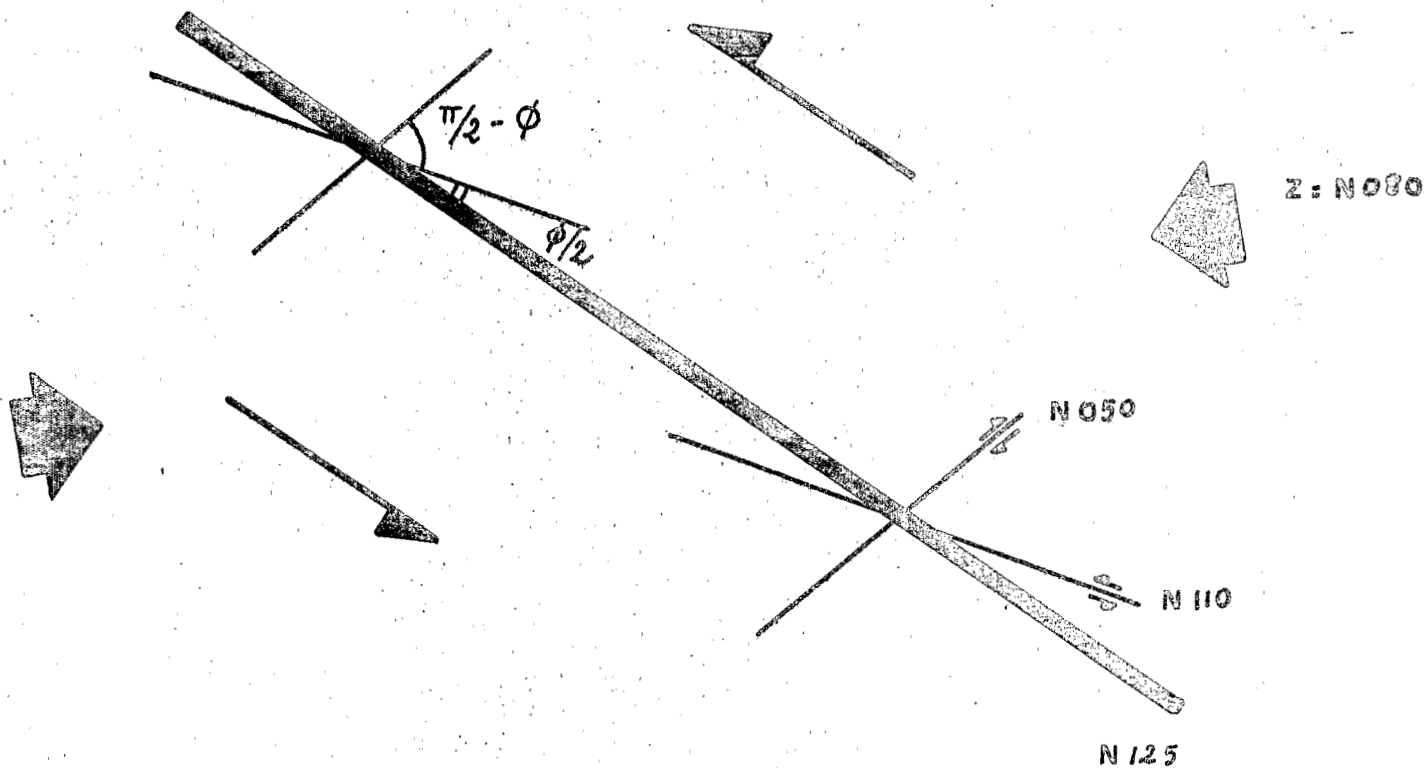


Fig. 12-Cizallamiento de Riedel. Esquema explicativo de las fallas de rumbo observadas en la formación La Paz (Allpacoma-Llojeta). La dirección teórica de la compresión es Z = N080.

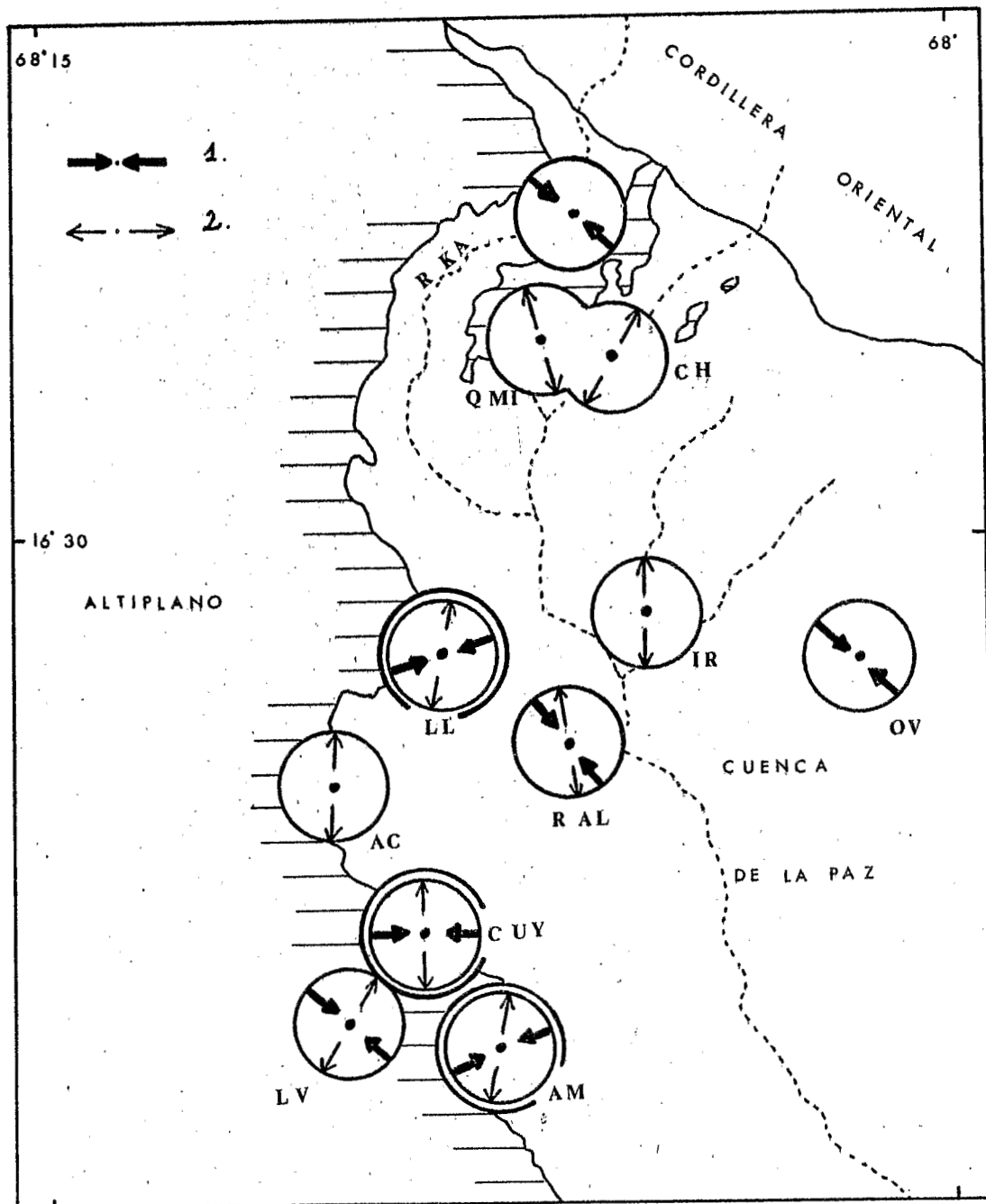


Fig.13-Esquema de las direcciones de las deformaciones.

1: dirección de compresión; 2: dirección de distensión (los círculos dobles indican la compresión pliocénica).

AC: Achocalla, AM: Amachuma, CH: Chuquiaguillo, CUY: Ceja Uypaca, IR: Irpavi, LL: Llojeta, LV: Loma Ventilla, OV: Ovejuyo, OMI: Quebrada Minasa, RAL: Río Allpacoma, RKA: Río Kaluyo.

ANEXO

METODOS DE ANALISIS DE LA TECTONICA DE RUPTURA

El análisis microtectónico a base de diagrama estereográficos, empleado en el texto precedente, está directamente extraído de los métodos de análisis de Arthaud-Choukroune (1972) y Arthaud (1969).

Método Arthaud-Choukroune.

Este método permite un estudio en zonas con pocas o sin estructuras de gran tamaño que, difícilmente, podrían ser estudiadas de manera tradicional y está basado en el examen e interpretación de microfracturas, teniendo en cuenta solamente su dirección y su naturaleza. Permite así realizar un estudio tectónico preliminar que puede servir de base a un estudio más detallado. Las microestructuras pueden ser microfallas, grietas de tracción o estilolitas.

A partir de una población de microfracturas podemos definir una deformación media que se caracteriza por tres direcciones principales de deformación. Estas direcciones se definen así:

X = dirección principal de alargamiento,

Z = dirección principal de acortamiento perpendicular a X,

Y = dirección principal intermedia perpendicular a X y a Z.

La figura 1 muestra, de una manera muy simplificada, como se deforma un volumen de referencia. Su longitud aumentará según X, disminuirá según Z y aumentará, disminuirá o no cambiará según Y.

Cuando la deformación según Y es mínima, tenemos una deformación plana según el plano XZ (fig.2). Las fallas inversas, en este caso, son inexistentes o poco numerosas. Con reglas sencillas, podemos determinar las direcciones principales de deformación,

- a) los polos de las grietas de tracción, sobre red de Schmidt, dan un máximo, cuyo eje medio corresponde a X.
- b) los picos estilolíticos de origen tectónicos son dispersados sobre un cono de abertura variable. Su eje corresponde a la dirección Z.
- c) para las microfallas podemos considerar dos casos:
 - en los casos sencillos de dos familias de planos, el plano que contiene los polos de las dos familias y las estrias incluye también los ejes X y Z. La intersección de las dos familias corresponde a Y.
 - en los casos más complejos de una repartición variable de las fallas nos referiremos al método de Arthaud.

Así, en cada estación de medida podemos determinar:

- 1) un "ángulo de separación" el más agudo posible entre las fallas de rumbo, dextrales y senestrales, de tal modo que una de las dos direcciones principales X o Z esté comprendida entre dos posiciones extremas las más cercanas posibles.
- 2) una posición media de las grietas de tracción y una posición media de los picos estilolíticos. Se verifica que el ángulo entre estas dos posiciones medias sea aproximadamente de 90° y que se encuentren efectivamente dentro del ángulo de separación de las fallas de rumbo.

Cuando tenemos suficiente microestructuras, tenemos una determinación precisa de las direcciones principales de deformación y el margen de error para X e Y es aproximadamente de 10° . La figura 3 muestra un ejemplo de tal método.

Método Arthaud.

Este método se propone describir la geometría de la deformación definiendo tres ejes principales de deformación. Estos ejes se deducen de la observación de todos los planos estriados de un gran número de fallas o microfallas que afectan rocas durante una tectónica de ruptura. Estas tres direcciones principales de deformación son X, Y y Z.

Dentro de una roca que sufre una tectónica de ruptura, el mecanismo elemental de deformación es un movimiento relativo de dos bloques a lo largo de una falla que separa estos dos. Se puede describir este movimiento gracias a dos elementos geométricos directamente mesurables:

- el plano de falla
- y en este plano, la dirección verdadera del movimiento según la traza de las estrias.

La determinación de las direcciones principales de deformación se hace fácilmente con construcción geométrica.

Procedemos así para definir X, Y y Z:

- suponemos que dentro del volumen estudiado, todas las fallas se reparten de cualquier manera. Todas se mueven durante la misma fase tectónica y así tienen el mismo valor (principio 1).
- a cada falla está asociado un plano, perpendicular a la falla y que contiene las estrias (fig.4a). En el plano de movimiento (M). Este plano "M" contiene por definición, por lo menos, una de las direcciones principales de deformación (principio 2) (fig.4b). Los planos M están marcados por todas las fallas. Si estos principios están verificados, los planos M, ligados a una población de fallas, tienen una distribución geométrica sencilla: todos los planos M que contienen una dirección principal tienen una intersección común, la cual corresponde a esta dirección principal (fig.5). Como el modelo tiene tres direcciones principales, los planos M se agrupan teóricamente en tres familias (o 3 guirnaldas) que se cortan según tres direcciones ortogonales que corresponden a estos tres ejes principales de deformación.

Una vez que conocemos la dirección de X, Y y Z, podemos buscar cuáles son las direcciones compatibles con el sentido del movimiento indicado por las estrias sobre cada falla. De manera práctica procedemos de la siguiente forma:

- sobre una red estereográfica, marcamos el polo (pF) del plano de falla y la traza (Es) de las estrias que contiene esta falla (cada medida debe ser numerada).
- (pF) y (Es) se llevan, por rotación, sobre un círculo mayor de la red. Es la traza del plano M. Su polo es (pM).

- hacemos eso para cada falla y estudiamos la repartición de los polos (pM).
- todos los planos M que contienen una dirección principal (intersección común) tienen su polo en el plano perpendicular a esta dirección. Así los polos (pM) se reparten según círculos mayores. El polo de tal círculo corresponde a una dirección principal de deformación.

El reparto de los (pM) según tres guirnalda perpendiculares, dos a dos, es un caso teórico, cuando las fallas tienen una distribución cualquiera. Estas guirnalda contienen todos los planos M y definen un triedro trirectángular. El polo de una guirnalda corresponde a la intersección de las dos otras. Según el sentido del movimiento indicado por las estrias, se puede fácilmente determinar las posiciones relativas de X, Y y Z. En general, tenemos dos de las tres guirnalda (fig.6) y en estas dos guirnalda los (pM) se reparten según dos máximos. Estos máximos pueden indicar una dirección principal, si ellos corresponden a la intersección de cizallamiento conjugado .

BIBLIOGRAFIA.

- ARTHAUD (F) 1969.- Méthode de détermination graphique des directions de raccourcissement, d'allongement et intermédiaire d'une population de failles. Bull.Soc.Géol.Fr. t XI,p.729-737.
- ARTHAUD (F), CHOUKROUNE (P) 1972.- Méthode d'analyse de la tectonique cassante a l'aide de microstructure dans les zones peu déformées. Exemple de la plate-forme Nord-Aquitaine. Rev. I.F.P., vol.XXVII, n°5 p. 715-732

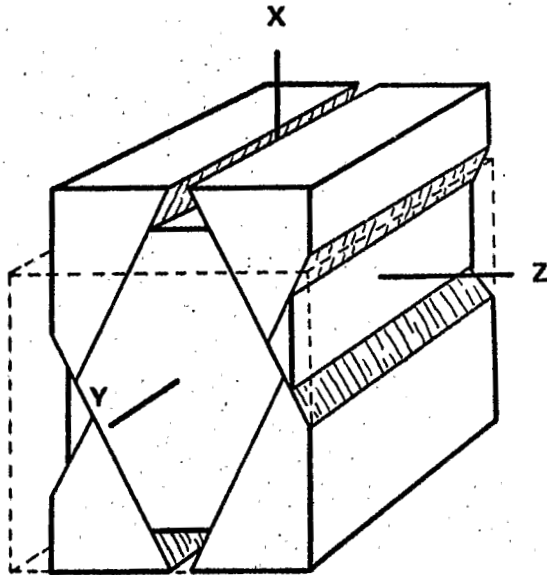


Fig.1-Esquema muy simplificado ilustrando las nociones de direcciones principales de deformación.

En este caso particular X, Y y Z son paralelos a las aristas de un cubo. Las intersecciones de los planos de fallas son paralelas a Y. El cubo inicial es acortado según Z, alargado según X e igual según Y. (Arthaud 1969).

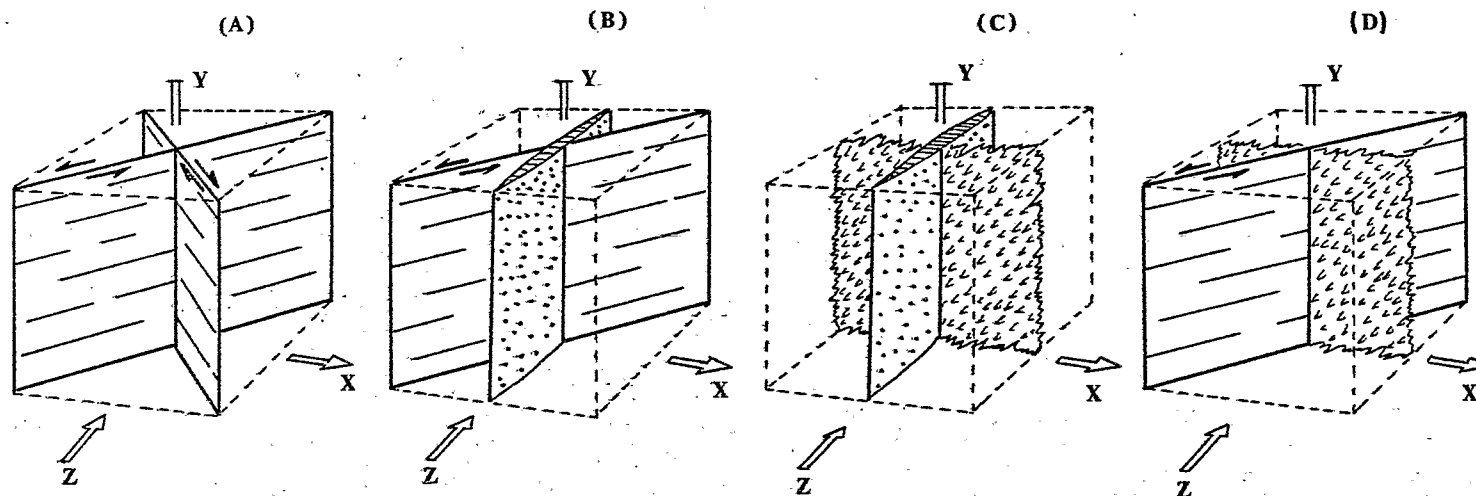


Fig.2-Esquema mostrando la orientación de las direcciones principales de deformación con relación a sistemas sencillos de microfractura. Se supone la deformación plana (Y constante) en los cuatro ejemplos.

- A: microfallas de rumbo dextral y senestral,
- B: grieta de tracción y microfalla de rumbo,
- C: grieta y plano estilolítico,
- D: microfalla de rumbo y plano estilolítico.

(Arthaud - Choukroune 1972).

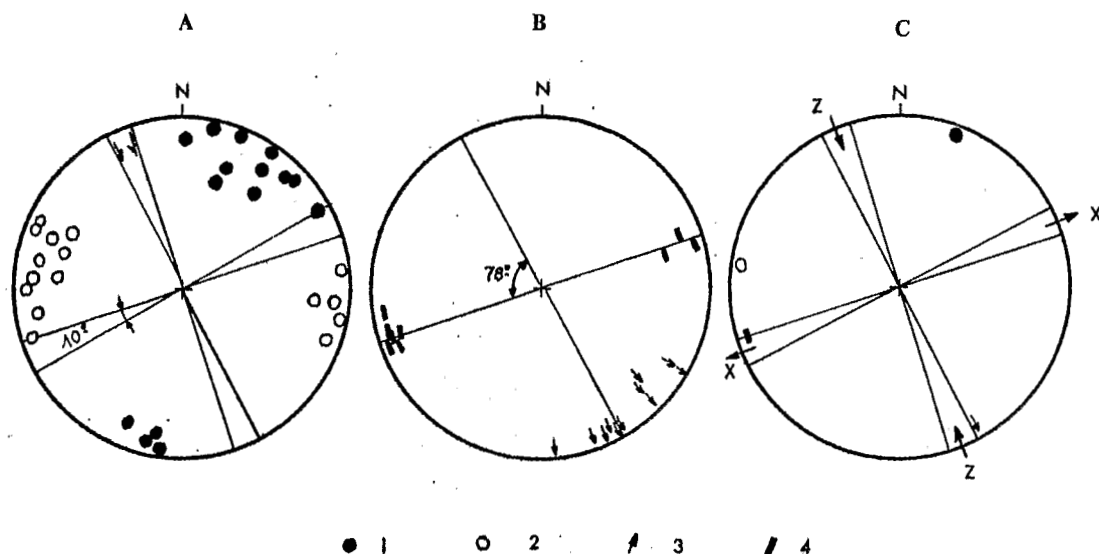


Fig.3-Determinación de las direcciones principales de deformación.

- A: determinación del ángulo de separación de las microfallas,
 B: determinación de las direcciones promedias de las grietas y de las estilolitas.
 C: determinación de X, Y y Z a partir de los valores medios y del ángulo de separación.
 1: microfalla de rumbo dextral - 2: microfalla de rumbo senestral - 3: pico estilolítico - 4: grieta de tracción.

(Arthaud - Choukroune 1972).

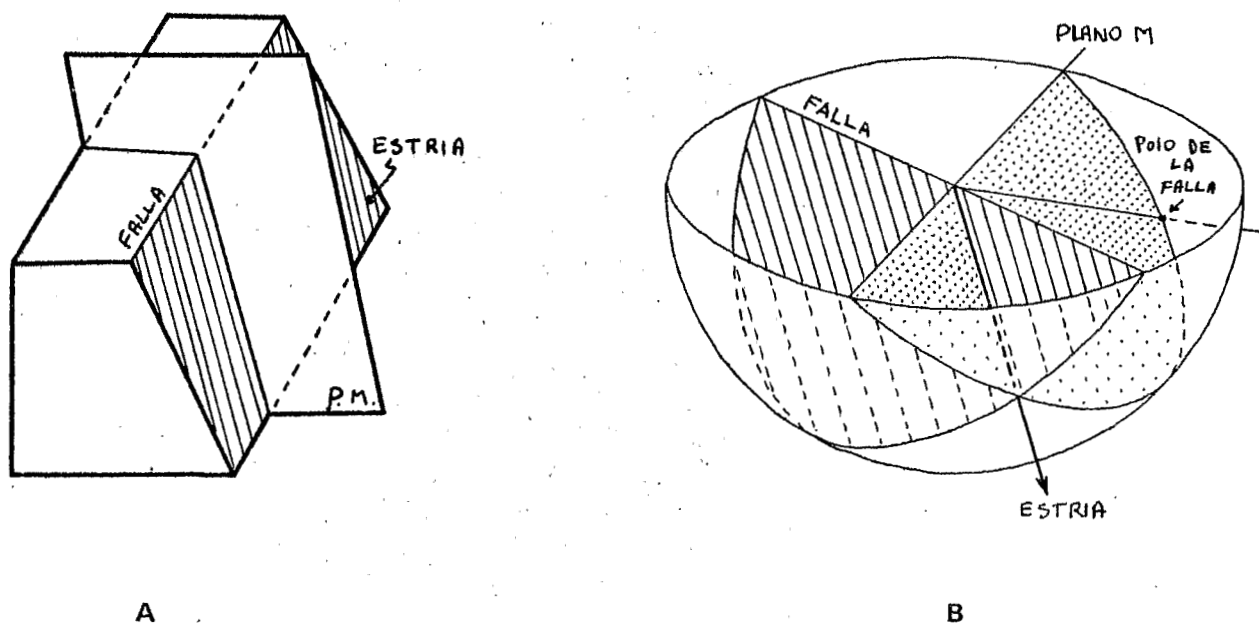


Fig.4-A: Plano de falla con sus estrias y el plano de movimiento (pM) perpendicular al plano de falla y conteniendo la dirección de las estrias.

- B: Mismo esquema representado dentro de un hemisferio inferior. El plano M contiene la dirección de estria y el polo de la falla. Toda recta de este plano se proyecta sobre la falla según la dirección de la estria (Arthaud 1969).

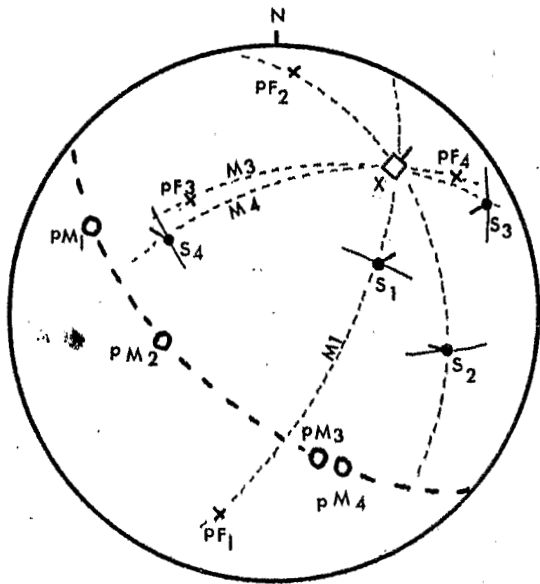


Fig.5-Ejemplo de determinación de una dirección principal a partir de las fallas.

A partir de cuatro fallas, F1 a F4 y de sus estrias, S1 a S4, determinamos 4 planos de movimiento M1 a M4 (guiones delgados) cuyos polos se reparten sobre un círculo mayor (guiones gruesos). El polo de este círculo (intersección de los planos M1 a M4) es la dirección principal buscada; la flecha sobre cada estria indica el movimiento del bloque superior. La dirección construida es la dirección de extensión, sólo compatible con los sentidos de desplazamientos de las fallas. Corresponde a X. Z e Y son indeterminados sobre la guirnalda de los pM. (Arthaud 1969).

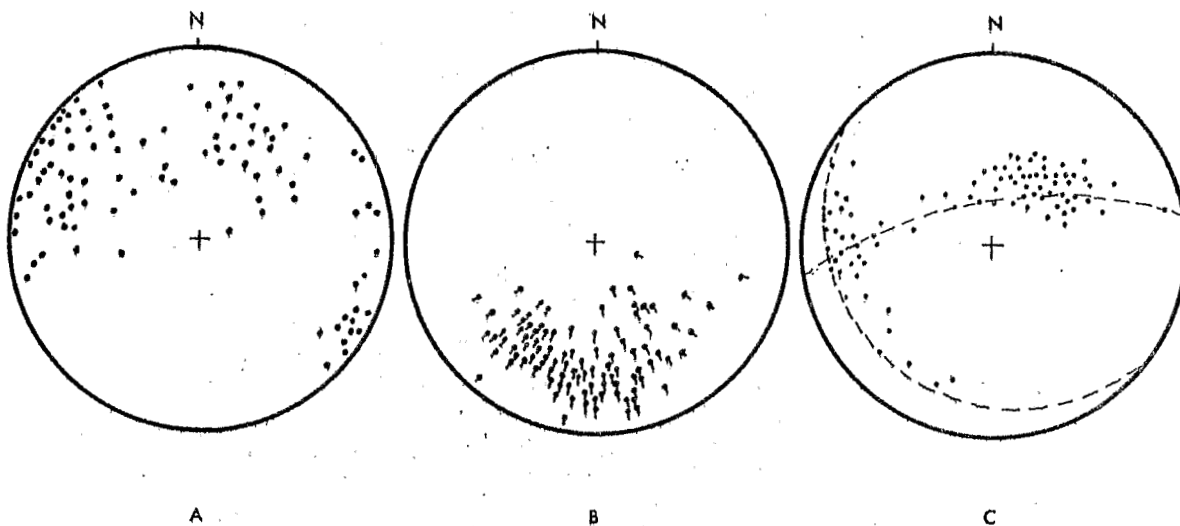


Fig.6-Construcción de las guirnaldas a partir de los polos de los planos de movimiento.

A: polos de fallas - B: dirección de las estrias - C: polos de movimiento con sus dos máximos y las dos guirnaldas.