

EL USO DEL METODO DE LOS DIEDROS RECTOS: IMPLICACIONES A PARTIR DEL MODELO DE DESLIZAMIENTO DEL ANALISIS POBLACIONAL DE FALLAS

G. de Vicente (1), A. Muñoz (1) y J.L. Giner (1)

(1) Departamento de Geodinámica. Fac. C.C. Geológicas.
Universidad Complutense. 28040 MADRID.

RESUMEN

El modelo de deslizamiento implica una simetría ortorrómbica de las fallas que se mueven bajo un mismo campo deformacional. Se analizan los diagramas de diedros rectos producidos por la adición de las fallas con las simetrías que predice el modelo de deslizamiento para dos elipsoides de deformación distintos, teniendo en cuenta posibles dispersiones en las orientaciones de las fallas. Se establecen las pautas características de éstas, discutiéndose la validez de las orientaciones de los ejes principales del elipsoide de esfuerzos que se deducen, especialmente cuando éstos aparecen inclinados a partir de la adición de dos figuras con un eje principal en la vertical. Se analizan dos ejemplos de aplicación en dos situaciones tectónicas distintas, comprobándose que la combinación de dos tipos de fallas distintos (e.j. fallas inversas mas desgarres) produce la existencia aparente de ejes principales inclinados. Por último se adjunta un apéndice para la rápida informatización del método.

Palabras clave: Falla, Mecanismo focal de un terremoto, Análisis Poblacional, Diedros rectos, Modelo de deslizamiento.

ABSTRACT

Slip model of brittle deformation implies an orthorhombic symmetry of faults moving under an unique strain field. Right dihedral diagrams of these symmetries have been analyzed additionally by couples taking into account possible dispersions in fault trends. Characteristics patterns of these additions have been established, discussing the validity of the deduced plunging axes orientations. Finally, an appendix is attached showing a fast way to program the method.

Key words: Fault. Earthquake focal mechanism. Populational analysis. Right dihedral. Slip model.

De Vicente, G., Muñoz, A. y Giner, J.L. (1992): El uso del método de los diedros rectos: implicaciones a partir del modelo de deslizamiento del análisis poblacional de fallas. *Rev. Soc. Geol. España*, 5: 000-000.

De Vicente, G., Muñoz, A. and Giner, J.L. (1992): Use of the right dihedral method: implications from the slip model of fault population analysis. *Rev. Soc. Geol. España*, 5: 000-000.

1. INTRODUCCION

Las fallas constituyen un elemento fundamental en cualquier tipo de análisis tectónico, si bien el amplio rango de escalas en el que aparecen hace que su estudio pueda abordarse desde distintos enfoques.

Uno de estos puntos de vista es el del análisis poblacional de fallas, que consiste en estudiar este tipo de estructuras desde un punto de vista estadístico. Para ello se miden, en una serie de estaciones estratégicamente repartidas, los parámetros característicos de cada falla, como son la orientación del plano de falla y de la estría de deslizamiento, así como el sentido de movimiento.

Dentro de este tipo de análisis uno de los métodos que ha tenido una mayor aceptación ha sido el de los die-

dros rectos (Angelier y Mechler, 1977), quizás debido a que constituye una forma muy visual de representar los distintos tipos de esfuerzo-deformación que se relacionan con los distintos tipos de fallas.

Cuando una falla se mueve, el propio plano de falla y el plano perpendicular a la orientación del movimiento relativo entre los dos labios de la falla, representada por la estría de fricción, dividen el espacio en cuatro cuadrantes. Según sea el movimiento, estos "diedros rectos" quedarán en modo alterno en compresión y en tensión (fig.1). La representación de estos elementos en proyección estereográfica es similar a la de los mecanismos focales de terremotos.

Este tipo de representación puede obtenerse bien midiendo en campo los parámetros antes mencionados, o

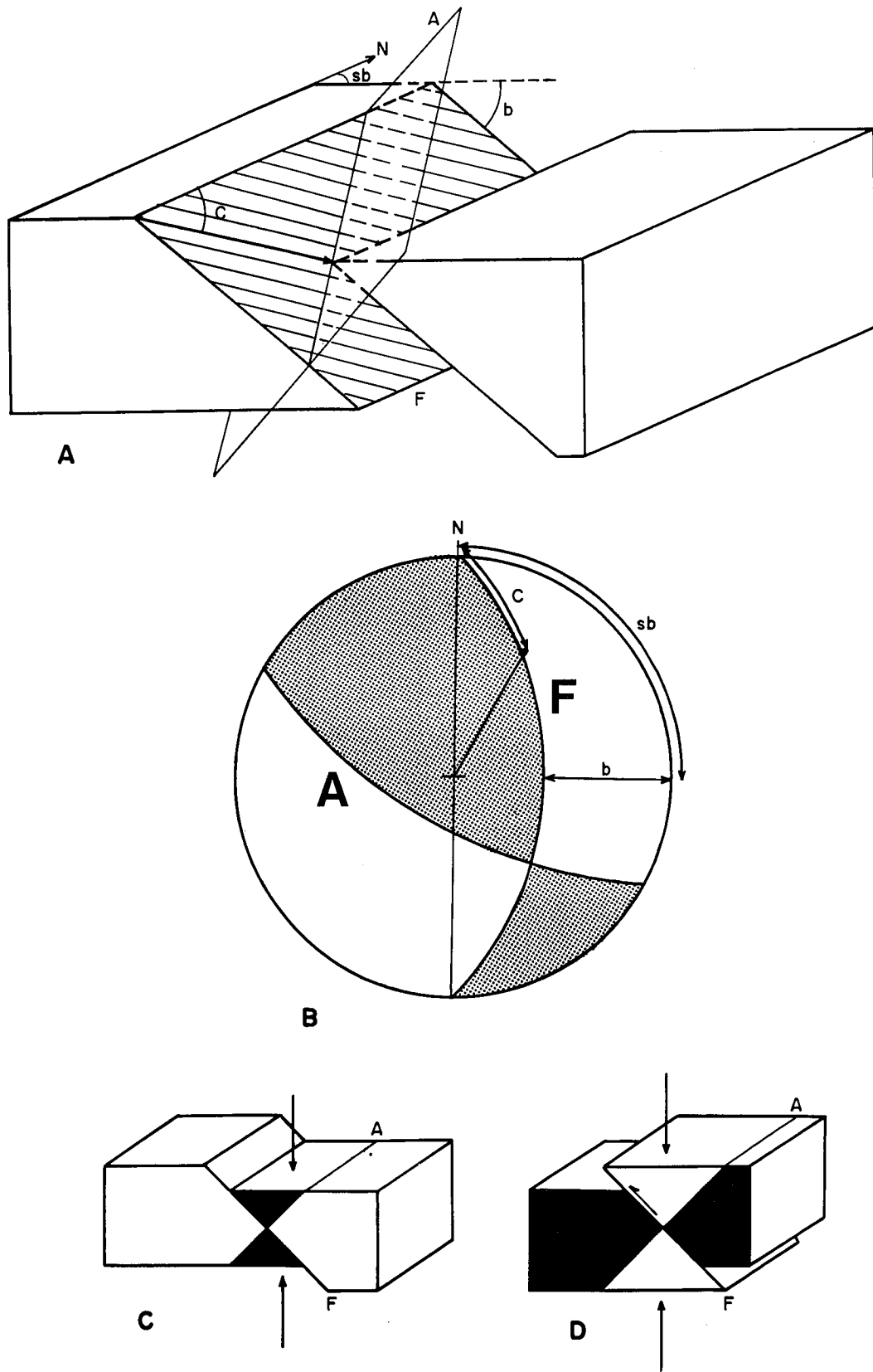


Fig. 1.—Esquema de diedros rectos en una falla en bloque diagrama A) y en proyección estereográfica (red de Wulff, hemisferio inferior) B). F: plano de falla. A: plano auxiliar perpendicular a F y a la estría (flecha). sb: sentido del buzamiento de la falla. b: buzamiento de la falla. c: cabeceo de la estría sobre el plano de falla. C) Diedros rectos de una falla normal (negro: compresión, blanco: extensión). D) Idem para una falla inversa. El diagrama B corresponde a una falla normal; El eje vertical queda dentro de la zona sombreada.

Fig. 1.—Right dihedral scheme in a fault, in block diagram. A) stereographical projection (Wulff net, lower hemisphere). B) F: fault plane; A: auxiliary plane, perpendicular to F and to the slickenside (arrow); sb: fault dip sense; b: fault dip; c: slickenside pitch on the fault plane. C) right dihedral of a normal fault (black: compression, white: tension). D) right dihedral for a reverse fault. Diagram B corresponds to a normal fault; the vertical axis is included in the dark zone

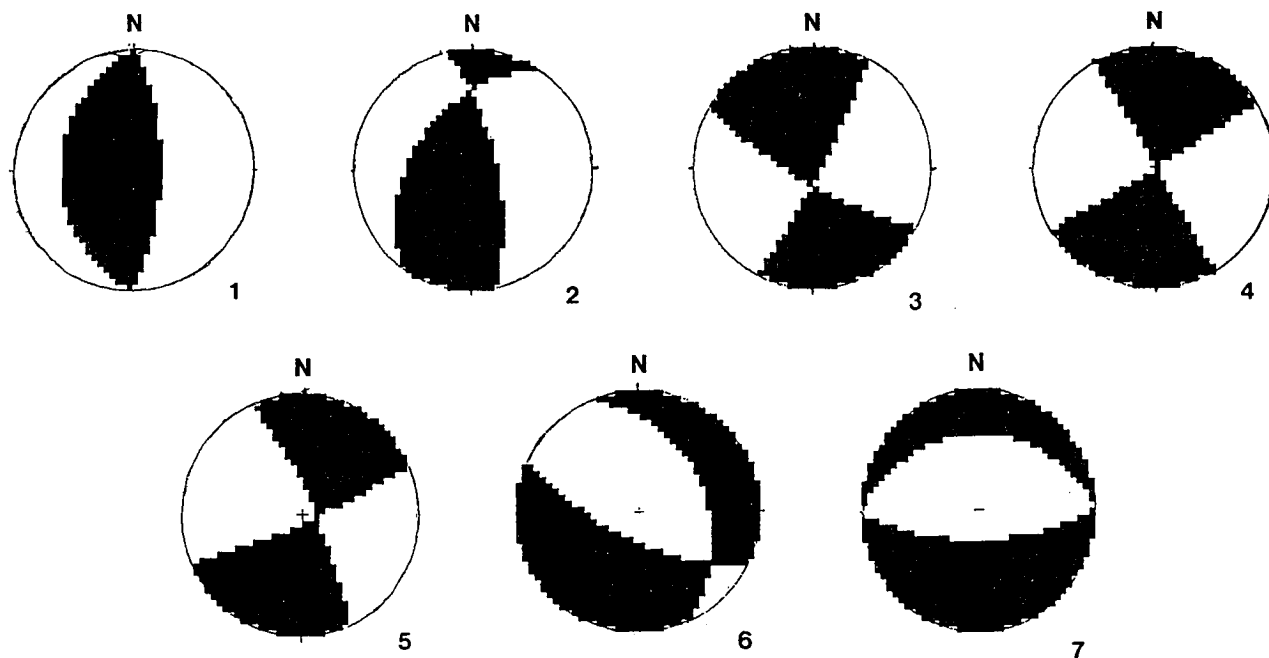


Fig. 2.—Distintos tipos de mecanismos focales para diferentes tipos de fallas (sombreado: compresión, blanco: extensión). 1- Falla normal, 2- Falla normal-direccional, 3- Falla direccional-normal, 4- Desgarre, 5- Falla direccional inversa, 6- Falla inverso-direccional. 7- Falla inversa. En todas se supone una compresión horizontal según N-S y una extensión E-W comunes.

Fig. 2.—Different types of focal mechanisms for different kinds of faults (black: compression, white: tension). 1- normal fault, 2- normal strike-slip fault, 3- strike-slip normal fault, 4- pure strike-slip fault, 5- strike-slip reverse fault, 6- reverse strike-slip fault, 7- reverse fault. A N-S horizontal compression and E-W tension is supposed for all of them

bien en fallas activas que produzcan terremotos de una cierta intensidad mediante el análisis de las ondas sísmicas que generan. De este modo, cada tipo de falla, activa o no, tiene un mecanismo focal característico (fig.2).

Si se considera que cada movimiento concreto de una falla responde a la acomodación del campo de esfuerzo-deformación sobre dicha estructura, resultará posible determinar las características de este campo regional desde el análisis de los movimientos (mecanismos focales) de las fallas relacionadas. Este "problema inverso" constituye lo que se ha venido a denominar como "análisis poblacional de fallas".

De un modo gráfico, si se suman arealmente las zonas compatibles en compresión y en extensión de todos los mecanismos focales disponibles, se podrán determinar las posibles orientaciones comunes de los ejes de máxima compresión y máxima extensión. Según queden orientados dichos ejes, se podrá deducir de una forma cualitativa el tipo de esfuerzo-deformación responsable del movimiento de dichas fallas. Esta suma areal en proyección estereográfica es lo que constituye el método de los diedros rectos (fig.3).

Puede suceder que, al superponer la población de fallas analizada, no quede ninguna zona 100% compatible en tensión y/o compresión, por lo que resulta más adecuado trabajar con diagramas de densidad de diedros rectos, en los que se calcula el tanto por ciento de compatibilidad en tensión o compresión para cada posición en el espacio (Angelier y Mechler, 1977).

El objetivo fundamental de este trabajo es el estudio de los diagramas de diedros que se obtienen al combinar de dos en dos los distintos tipos de simetrías que predice el modelo de deslizamiento para los siete tipos de elipsoi-

des de deformación más característicos. Dado que el método de los diedros rectos es un método gráfico, resulta interesante comprobar los resultados del mismo sobre dichas simetrías.

El análisis poblacional de fallas suele realizarse utilizando varios métodos distintos a la vez. Por una parte tenemos los métodos basados en la ecuación de Bott (1959), como son los métodos de Etchecopar (Etchecopar *et al.*, 1981) o el diagrama y/R (Simón Gómez, 1986). Por otra parte aparecen los métodos desarrollados desde el "modelo de deslizamiento" (Slip Model) (Reches, 1983; De Vicente, 1988).

La ecuación de Bott tiene una solución única dadas cuatro fallas cualesquiera (Carey, 1979), es decir, no implica ningún tipo de simetría en la disposición de las fallas en relación a un determinado tipo de tensor de esfuerzos. No obstante, parece claro que sí existe algún tipo de relación entre la simetría de las fallas y el elipsoide de esfuerzos, por lo menos en lo que atañe a fallas de neoformación. El conocido modelo de fracturación de Anderson es un claro ejemplo de lo que decimos. En cualquier caso, la ecuación de Bott, aplicada sobre poblaciones de fallas con simetrías marcadas, da resultados coherentes con lo que de una forma indirecta implican dichas simetrías.

El modelo de deslizamiento predice la existencia de una simetría ortorrómbica en poblaciones de fallas cuyos movimientos dan lugar a elipsoides de deformación triaxiales ($e_i \neq 0$). Dicho modelo contempla como un caso particular (deformación plana, $e_3 = 0$) las simetrías del modelo de fracturación de Anderson. Por otro lado, también tiene en cuenta las características mecánicas de la roca deformada, resultando distintas simetrías en función de ϕ

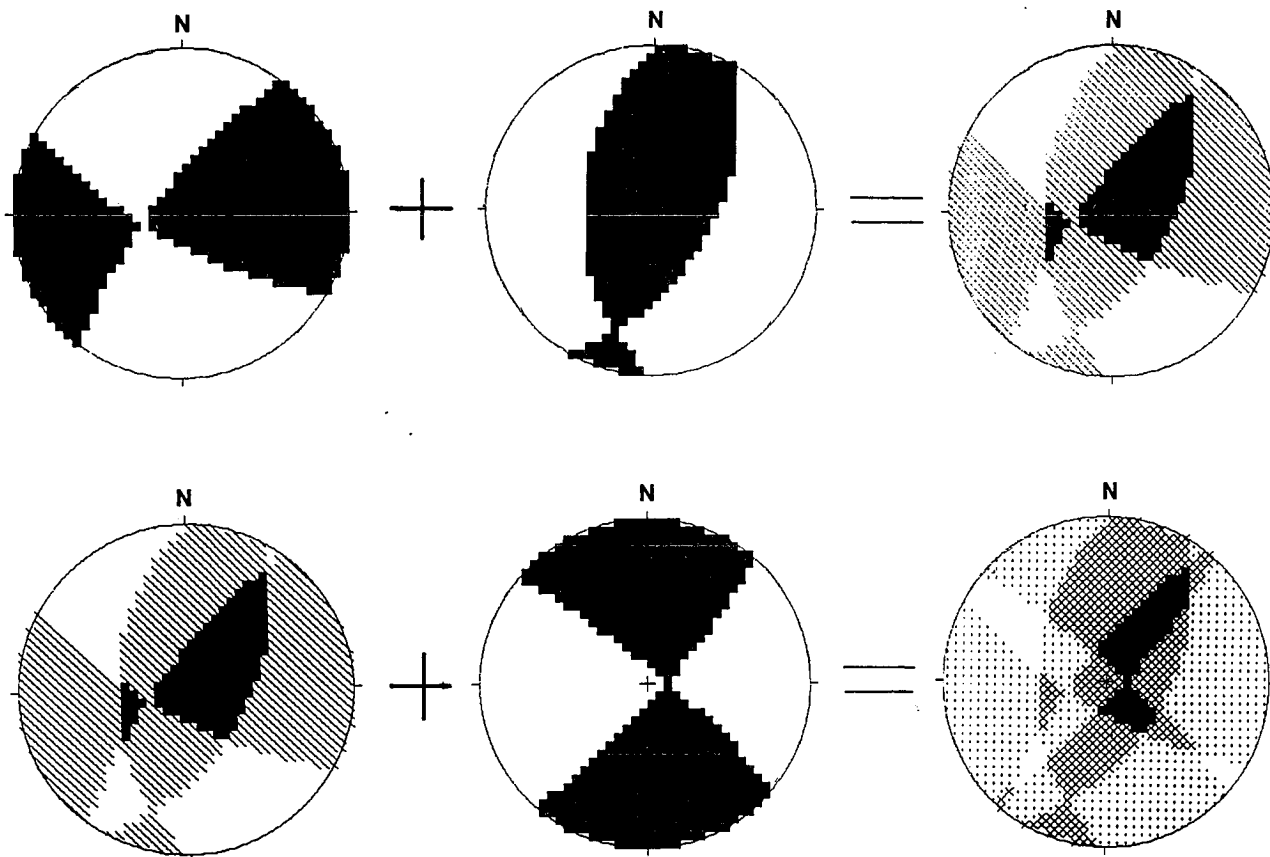


Fig. 3.—Esquema gráfico del método de los diedros rectos utilizando diagramas de densidad. La superposición areal se realiza para tantas fallas como se quiera. En éste caso se ha representado el proceso para tres fallas.

Fig. 3.—Graphic scheme of the right dihedral method using density diagrams. Areal superposition is realized for the number of faults wished.

(ángulo de rozamiento interno en el momento del movimiento).

Uno de los principales problemas del análisis poblacional es el de discriminar entre fallas pertenecientes a momentos de deformación distintos (o el de agrupar fallas que implican elipsoides diferentes pero que se han movido a la vez). El método de los diedros rectos, tal como se ha venido utilizando hasta ahora, no permite abordar este problema, y se debería utilizar sobre poblaciones ya discriminadas mediante otros métodos, o sobre terrenos no polideformados (Angelier y Mechler, 1977). Por este motivo, uno de los objetivos de este trabajo es ahondar un poco más en la interpretación de los diagramas de diedros rectos, al menos cualitativamente, y poder distinguir si éstos son el producto de uno o varios grupos distintos de fallas, así como las principales características de las mismas.

Así, si se emplea el método sobre poblaciones de fallas con características (orientación del plano de falla y de la estría) muy diferentes, la posición de los ejes de máxima compresión y tensión que se obtiene no suele estar de acuerdo con el resto de los métodos de análisis poblacional de fallas. Por ejemplo, siempre que se sumen mecanismos focales de fallas muy inversas o muy normales (cabeceo de la estría próximo a 90°) con otras de desgarre puro (cabeceo de la estría próximo a 0°), el método de los diedros rectos (fig.3) indica que la posición común de los

ejes no está ni en la vertical ni en la horizontal, sino en una posición intermedia.

¿Cómo debe interpretarse este resultado? Podemos pensar, a la vista del diagrama suma, que el elipsoide responsable del movimiento simultáneo de las fallas presenta, al menos, uno de los ejes principales inclinado. No obstante, atendiendo a las simetrías deducidas de los modelos de fracturación y de deformación (Anderson o modelo de deslizamiento), lo que también puede suceder es que una misma "fase" de deformación produzca fallas con características asimilables a máxima compresión o tensión; por lo que si sumamos elipsoides con la máxima compresión en la vertical con otros en que aparece en la horizontal, el resultado no debe sólo interpretarse como que la posición común de los ejes es inclinada. También cabe otro tipo de interpretación: estamos sumando tipos de fallas reactivadas por elipsoides distintos (en este caso, el método no tendría una aplicación directa, Angelier y Mechler, 1977).

Esta situación tectónica resulta, desafortunadamente, muy común (fallas de transferencia moviéndose a la vez que fallas de acortamiento o estiramiento), por lo que para intentar discriminar entre esas dos posibles situaciones hemos realizado un estudio teórico de las posibles sumas de diedros rectos, utilizando como simetría de fallas la deducida por el modelo de deslizamiento.

2. DIAGRAMAS SINTETICOS DE DIEDROS RECTOS

El modelo de deslizamiento (Reches, 1983) predice la existencia simultánea de cuatro familias de fallas en el caso más general (dos familias con deformación plana). En la figura 4 se muestran los diagramas de diedros rectos para distintos tipos de elipsoides de deformación, desde desgarres a extensión radial.

Las posiciones de los ejes principales que se deducen (con una única población de fallas) resultan coherentes. No obstante, cabe señalar que para fallas "mixtas" (con componente normal y direccional) se deducen tres máximos de compresión, lo que debe de interpretarse como que la cuantía de la compresión horizontal es similar a la de la vertical, y no como que la posición de este eje queda poco determinada.

Para sumar estos distintos tipos de fallas se han elegido los elipsoides más característicos (compresión radial, compresión uniaxial, fallas inverso-direccionales, desgarres puros, fallas normal-direccionales, extensión uniaxial y extensión radial), si bien hay que señalar que todas las combinaciones intermedias son evidentemente posibles.

En la figura 5 se pueden ver las combinaciones que resultan de sumar dos a dos los diagramas sintéticos de cada tipo de fallas mencionado, manteniendo constante la dirección de máximo acortamiento horizontal según el eje N-S y uno de los ejes principales en la vertical.

El modelo de deslizamiento predice que para un de-

terminado elipsoide de fallas normales, los planos auxiliares (planos cuyos polos son las estrías) son los planos de falla para ese mismo elipsoide pero para fallas inversas (y al contrario), por lo que la figura 5 presenta una perfecta simetría entre fallas normales e inversas, con eje de simetría situado en los desgarres puros. Es decir, el diagrama sintético que resulta de sumar, por ejemplo, fallas inverso-direccionales con inversas es equivalente al de sumar fallas normal-direccionales con normales pero cambiando las zonas en compresión y tensión resultantes.

De este modo la simetría que presenta la figura 5 se debe a la coherencia interna del modelo de deslizamiento, poniendo de manifiesto que los diagramas de diedros rectos son perfectamente compatibles con dicho modelo. Lo mismo sucede con las direcciones de los ejes principales deducidas para los casos radiales.

En varios casos puede apreciarse la aparición de ejes de esfuerzos aparentemente inclinados como resultado de la suma de dos familias de fallas que individualmente no los tienen. Para cuantificar dicho efecto, se ha adoptado una nomenclatura en la que cada diagrama se nombra primero por el número de zonas que quedan en la vertical, a continuación por las inclinadas y las horizontales seguidas por su carácter de acortamiento (P) o tensión (T) (ver notación en la tabla 1). Así, la suma de desgarres más fallas inversas será: (0-2T-2P), es decir, no aparece ninguna zona definida en la vertical, y sí dos inclinadas de carácter extensivo (T) y dos compresivas (P) en la horizontal (el diagrama equivalente para las fallas normales será el (0-2P-2T)).

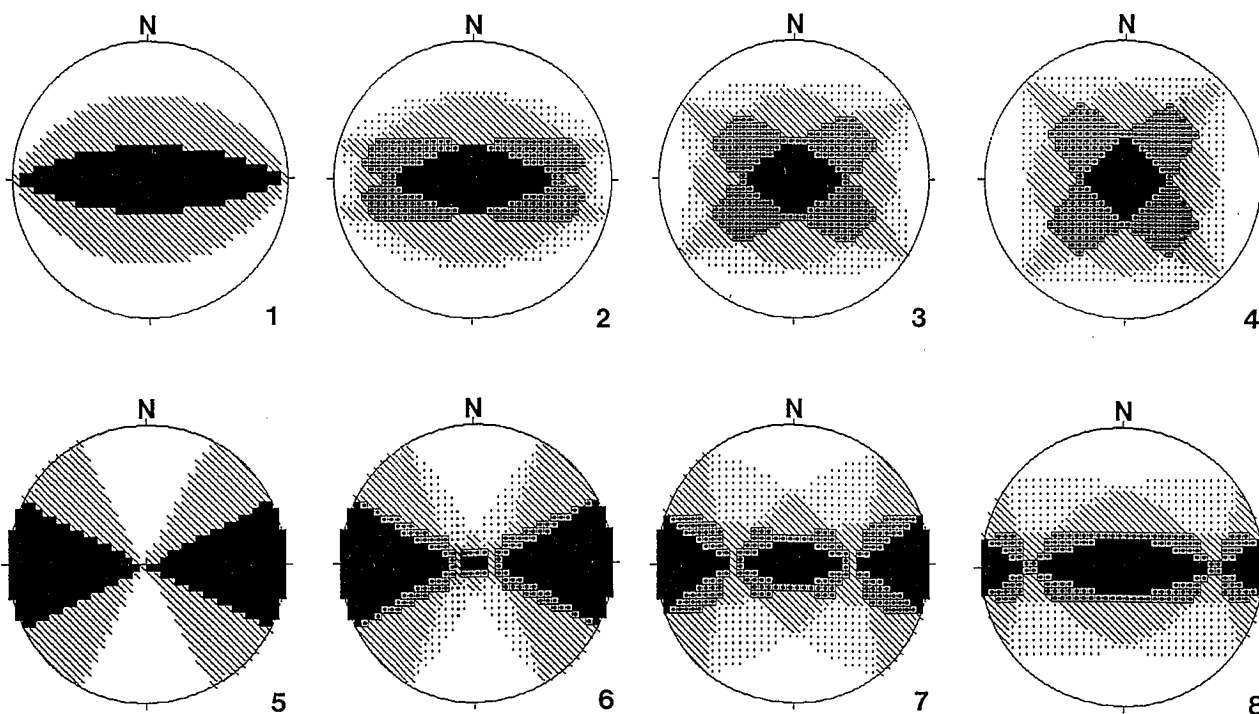


Fig. 4.—Diagramas de diedros rectos para las fallas de acuerdo con el modelo de deslizamiento para distintos tipos de elipsoides de la secuencia normal. 1- Extensión uniaxial pura. 2- Extensión radial cercana a uniaxial. 3- Extensión cercana a radial pura. 4- Extensión radial pura. 5- Desgarre puro. 6- Desgarre algo normal. 7- Igual extensión que desgarre. 8- Extensión algo direccional.

Fig. 4.—Right dihedral diagrams for faults according to slip model, for different types of ellipsoids in the normal sequence. From left to right : 1- Pure uniaxial extension; 2- Radial extension near to uniaxial ; 3- extension near to pure radial; 4- Pure radial extension; 5- Pure strike-slip likely normal; 7- Same extension as strike-slip; 8- Extension likely strike-slip.

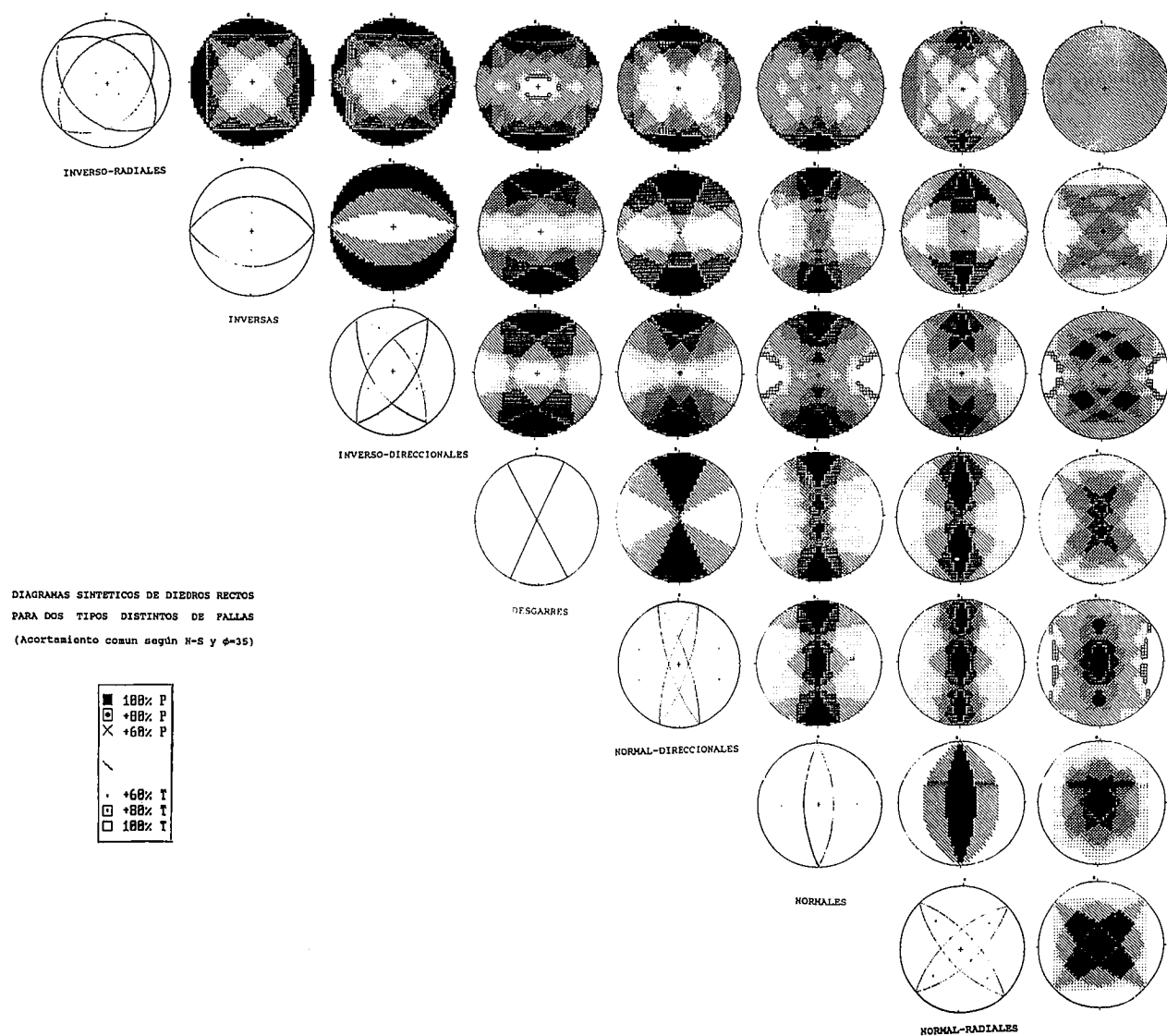


Fig. 5.—Diagramas sintéticos de diedros rectos para dos tipos de fallas diferentes con las simetrías deducidas del modelo de deslizamiento (fig. 4). A la izquierda se muestran las ciclográficas de las fallas superpuestas. La primera columna desde la izquierda de diedros rectos corresponde a los diagramas sin superponer. El resto son las posibles combinaciones dos a dos de estos diagramas. Las zonas en negro corresponden a las áreas compatibles 100% en compresión. Las zonas en blanco lo son 100% en extensión. Se ha supuesto una dirección de compresión común en la horizontal según N-S con la extensión según E-W y un ángulo de rozamiento interno en el momento del movimiento (ϕ) de 35° .

Fig. 5.—Synthetic right dihedral diagrams for two different types of faults with the symmetries deduced from slip model (fig. 4). On the left, the stereographical plots of the superposed faults are shown. The figure on the left of each file corresponds to the diagrams without superposition. The rest are the possible combinations in couples of these diagrams. Black zones correspond to the 100% compatible in compression areas. White zones to the 100% tension ones. A N-S compressional direction, an E-W extensional direction and $\phi = 35^\circ$ are considered.

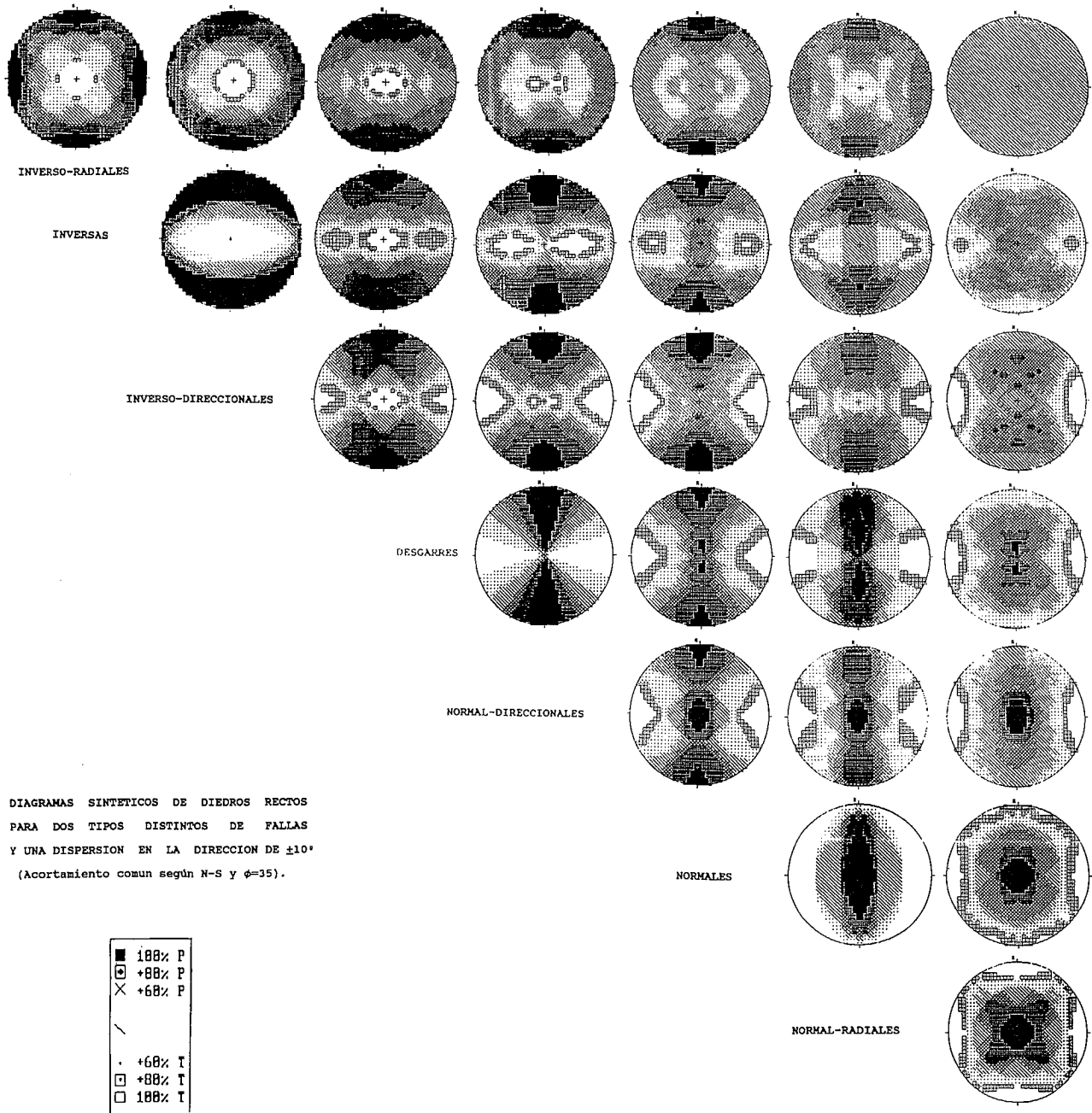


Fig. 6.-Construcción similar a la de la figura 5, pero suponiendo una dispersión en la dirección de compresión horizontal de $\pm 10^\circ$. Es decir, se varía el valor de la dirección de las fallas superpuestas con respecto a la figura anterior. Nótese que las áreas compatibles 100% en compresión o extensión se reducen ligeramente con respecto a las de la figura 5, pero se localizan en las mismas posiciones ($\phi=35^\circ$).

Fig. 6.-Similar construction to fig. 5 but considering a dispersion in the compressional direction of $\pm 10^\circ$. That is, the value of the direction of the superposed faults is modified. It is remarkable that the 100% compressional or tensional areas are slightly reduced with regards to fig. 5, but are localized in the same positions ($\phi=35^\circ$).

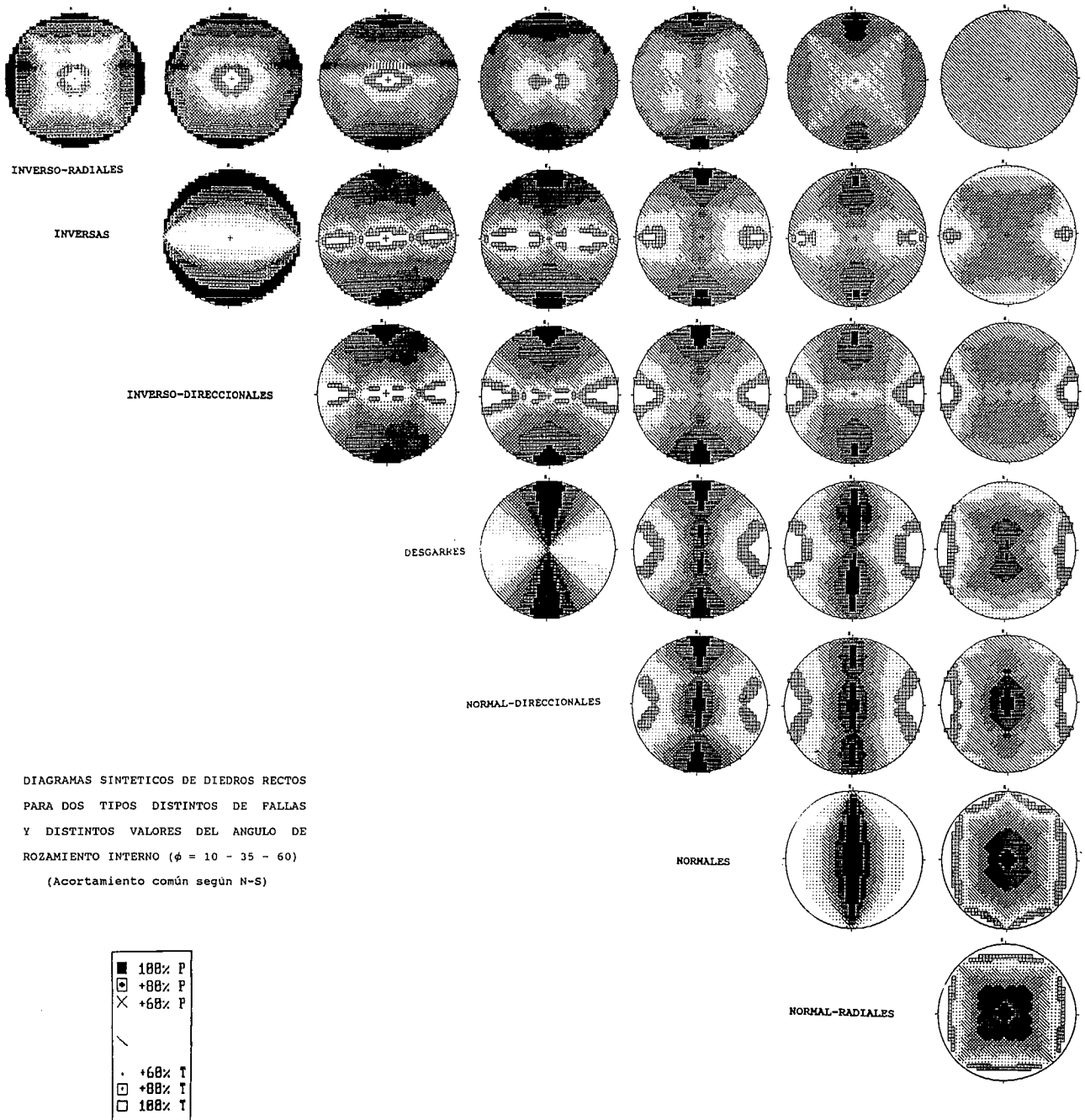


Fig. 7.—Construcción similar a las de las figuras 5 y 6 pero suponiendo una dispersión debida al cambio del ángulo de rozamiento interno (ϕ), lo que afecta fundamentalmente, según el modelo de deslizamiento, al valor del buzamiento de las fallas. Las áreas compatibles 100% se reducen con respecto a las de la figura 5, pero quedan en las mismas posiciones (al igual que en la figura 6). Se suponen valores de ϕ de 10° , 35° y 60° .

Fig. 7.—Similar construction to fig. 5 and 6 but changing the internal friction angle (ϕ). According to slip model this modification affects the fault dip value. The 100% compressional or tensional areas are reduced with regards to fig. 5, but are localized in the same positions as in fig. 6. ϕ values of 10° , 35° and 60° are supposed.

De este modo, apreciamos que sumando fallas de características diferentes, pero originadas bajo un elipsoide con un eje principal vertical, sólo se obtienen diagramas con áreas en compresión o extensión en la vertical, a no ser que existan fallas con movimiento fundamental según la dirección (desgarres).

El uso práctico de la tabla suma de diedros rectos que proponemos, podría no ser efectivo si no se tiene en cuenta que no es probable encontrar poblaciones reales de fallas con unas simetrías tan marcadas como las que teóricamente predice el modelo de deslizamiento. Para cuantificar el efecto de los errores de medida o las diferentes características que los materiales pueden introducir en los diagramas finales, se ha realizado otra serie de sumas suponiendo dos efectos diferentes. En el primer caso (fig. 6) se ha supuesto una dispersión en la dirección de máximo acortamiento horizontal de $\pm 10^\circ$, es decir, a los diagramas de la figura 5 se les han sumado otros dos girando la misma figura 10° hacia el E y otros 10° hacia el W. En este caso el parámetro que se varía es el de la dirección de las fallas.

El modelo de deslizamiento implica diferentes simetrías de fallas en función de ϕ (ángulo de rozamiento interno en el momento del movimiento). La figura 5 se ha confeccionado suponiendo un $\phi=35^\circ$. En la figura 7 se han sumado los diagramas correspondientes a $\phi=10^\circ$, $\phi=35^\circ$ Y $\phi=60^\circ$, con lo que fundamentalmente se varía el valor del buzamiento de las fallas. Los diagramas sumas así obtenidos (figuras 6 y 7) presentan unas características muy similares. En relación a los diagramas "sin dispersión" (figura 5) se aprecia una disminución en las áreas compatibles 100% en compresión o en tensión, llegando a desaparecer en algún caso (sobre todo en los que corresponden a situaciones tectónicas improbables). Cuando se suman desgarres continúan apareciendo ejes algo inclinados, con lo que se puede concluir que en poblaciones de fallas reales con simetrías del modelo de deslizamiento, este efecto se va a seguir produciendo.

3. EJEMPLOS DE APLICACION EN SITUACIONES REALES

El método de los diedros rectos puede aplicarse tanto a poblaciones de fallas como a mecanismos focales de terremotos. Se ha elegido una población de fallas bien contrastada con otros métodos de análisis poblacional como es la del borde S del Sistema Central Español, y una población de mecanismos focales en la zona del Hindukush, por presentar ambos casos fallas o mecanismos focales de terremotos, tanto asimilables a desgarres como a fallas inversas.

- Fallas en el borde S. del Sistema Central Español.

El Sistema Central se caracteriza, durante la deformación alpina, por la existencia de importantes cabalgamientos de dirección N60E acompañados de fallas de

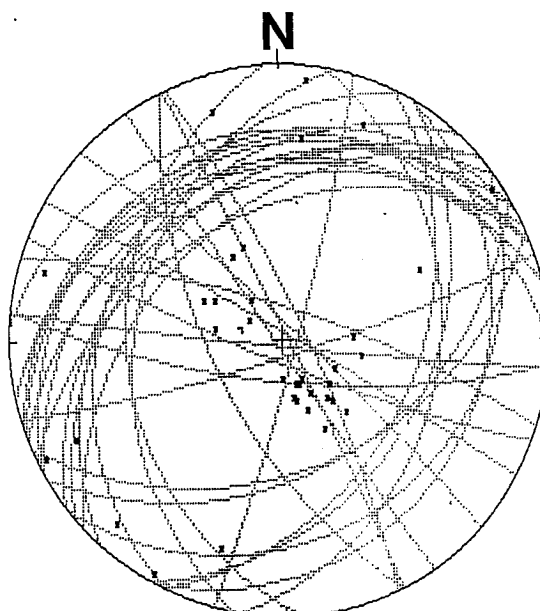


Fig. 8.—Ciclográficas de las fallas alpinas medidas en el borde Sur del Sistema Central Español (zona de Tamajón). Aparecen desgarres y fallas inversas. Red de Wulff, hemisferio inferior.

Fig. 8.—Stereographical plot of alpine faults measured on the southern border of the Spanish Central System (Tamajón zone). Strike-slip and reverse faults can be identified.

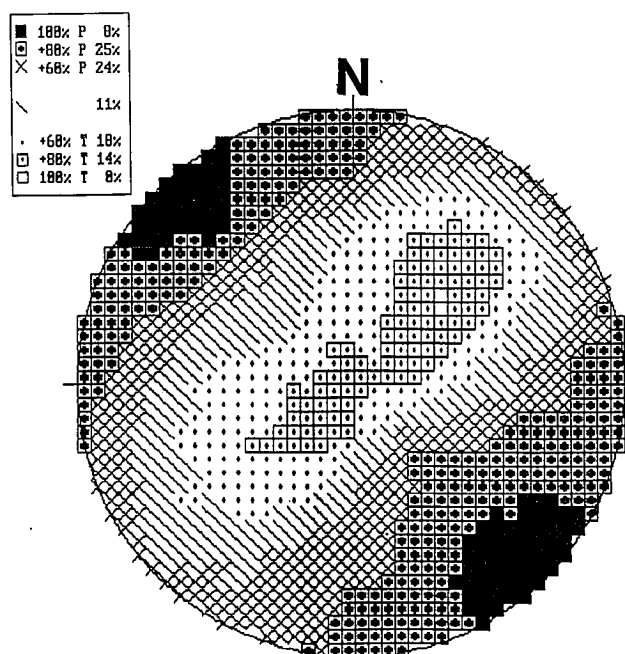
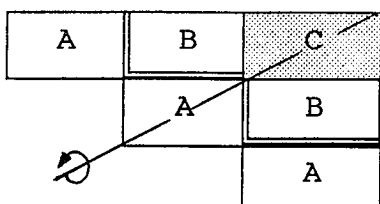


Fig. 9.—Diagramas de diedros rectos de las fallas representadas en la fig. 8. Se aprecia un máximo de compresiones horizontal según N140E, mientras que la zona compatible 100% en extensión queda, aparentemente, muy bien localizada (cuadrados blancos). No obstante, la zona compatible entre el 80 y el 99% muestra dos máximos simétricos respecto al eje vertical. Compárese con los diagramas sintéticos de sumas de desgarres con fallas inversas de las figs. 5, 6 y 7.

Fig. 9.—Right dihedral diagrams of the faults represented in fig. 8. A N140E horizontal compressional maximum can be observed, whilst 100% extensional zone is clearly localized (white squares). However, the 80-99% compatible zone shows two symmetrical maximums with regards to the vertical axis. This figure can be compared with the synthetical diagrams of addition of strike-slip and reverse faults of fig. 5, 6 and 7.

TABLA DE DIAGRAMAS SINTETICOS DE DIEDROS RECTOS						
1T-0-4P	1T-0-6P	1T-0-2P	0-2T-2P	0-0-2P	0-2P-0	0-0-0
	1T-0-2P	1T-2T-2P	0-2T-2P	0-2T-2P	0-4TP-0	0-2T-0
		1T-0-4TP	0-2T-4TP	0-0-4TP	0-2P-2T	0-0-2T
			0-0-4TP	0-2P-4TP	0-2P-2T	0-2P-2T
				1P-0-4TP	1P-2P-2T	1P-0-2T
					1P-0-2T	1P-0-6P
						1P-0-4T



SITUACION TECTONICA:

- A - PROBABLE
- B - POCO PROBABLE
- C - IMPROBABLE

Tabla 1.-Para nombrar los diagramas de las figuras 5,6 y 7 se adopta la siguiente nomenclatura: Se escribe de izquierda a derecha el numero de ejes que quedan en vertical seguido por los inclinados y finalmente los horizontales. El carácter de éstos se nombra con una P (compresión) o con una T (extensión). Así, el diagrama correspondiente a la suma de desgarres y fallas inversas, por ejemplo los de las figuras 9 y 11, sería el (0-2T-2P). La simetrías que se deducen del modelo de deslizamiento implican una simetría de esta tabla y de las figuras 5,6 y 7 con eje entre (0-0-4TP) (desgarres) y (0-0-0) (suma de extensión radial con compresión perfectamente radial). Se distinguen tres zonas en función de la existencia de una situación tectónica: A) probable, B) poco probable y C) improbable.

Table 1.-In order to give a name to the diagrams of figures 5, 6 and 7, the following nomenclature is adopted: from left to right it must be writing the number of vertical axes followed by the number of inclined axes and, finally, the horizontal ones. The character of these axes is appointed with a P (compression) or with a T (tension). By this way, the diagrams corresponding to the addition of strike-slip and reverse faults (for example figs. 9 and 11) would be (0-2T-2P). The symmetries deduced from slip model implie the symmetry of this table (and of the figs. 5,6 and 7), with a binary axes passing trough (0-0-4TP) (strike-slip) and (0-0-0) (addition of pure radial extension and pure radial compression). The most probable diagrams in real tectonics situations are included in zone A; zone B corresponds to uncommon situations and C) to higly uncommon (the most improbable).

transferencia, N10E sinestrales y N140E dextrales. En la estación de medida próxima a Tamajón (provincia de Guadalajara), estas directrices parecen algo mas norteadas debido a la presencia de una importante serie de fallas de desgarre de dirección N140E (De Vicente, 1988; Capote *et al.*, 1990).

Las ciclográficas de las fallas analizadas pueden verse en la figura 8. Corresponden a una dirección de compresión común según N140E. El diagrama de diedros rectos correspondiente es el figura 9. En él se aprecia claramente una dirección de compresión horizontal según N140E, mientras que el máximo de extensión aparece muy reducido e inclinado. Si nos fijamos en la distribución del área correspondiente a mas del 80% compatible en extensión, se puede apreciar que aparecen dos máximos simétricos respecto al eje vertical, por lo que utilizando la nomenclatura anteriormente indicada (tabla 1), sería una figura del tipo (0-2T-2P), es decir, que se correspondería con una suma de fallas mas o menos inversas con otras de tipo desgarre, lo que está de acuerdo con los resultados de otros análisis y con los datos de campo.

- Mecanismos focales del Hindukush.

Este caso presenta una serie de mecanismos focales de carácter inverso acompañados por un único evento de tipo desgarre-normal (Ram y Yadav, 1984), lo que nos permite observar el efecto que produce sobre el diagrama total. Los planos de falla han sido seleccionados siguiendo el método propuesto por De Vicente (1988) y Capote *et al.* (1991) basado en el modelo de deslizamiento, y se muestran en la figura 10. El diagrama de diedros rectos (que no precisa esta selección previa) puede verse en la figura 11, resultando muy similar al anterior, y es también del tipo (0-2T-2P). En este caso, una única falla con carácter de desgarre normal nos está dibujando una posición del eje de extensión aparentemente inclinado y dos zonas, compatibles con mas del 80% en extensión, simétricas respecto a la vertical.

4. CONCLUSIONES

El método de los diedros rectos presenta algunos in-

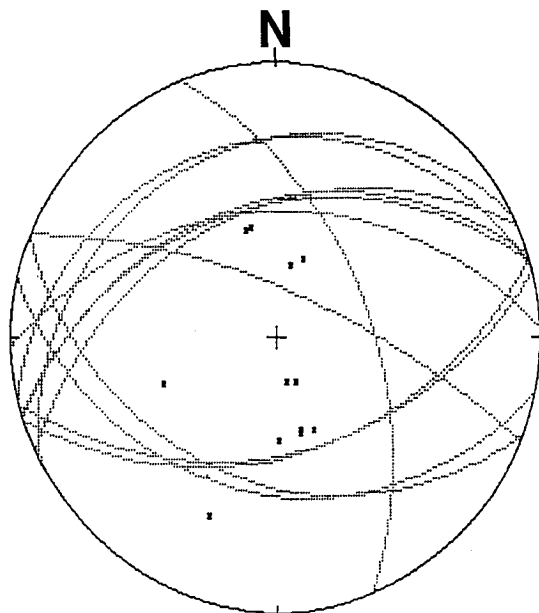


Fig. 10.—Ciclográficas de las fallas que se ajustan al modelo de deslizamiento de los mecanismos focales del Hindukush. Nótese que son todas inversas excepto la más norteada que corresponde a un desgarre con ligera componente normal. Red de Wulff, hemisferio inferior.

Fig. 10.—Stereographical plot of the faults of focal mechanism from Hindukush, fitting slip model. All of them are reverse, except the one with the closest direction to N-S, which is a strike-slip fault with a slightly normal component.

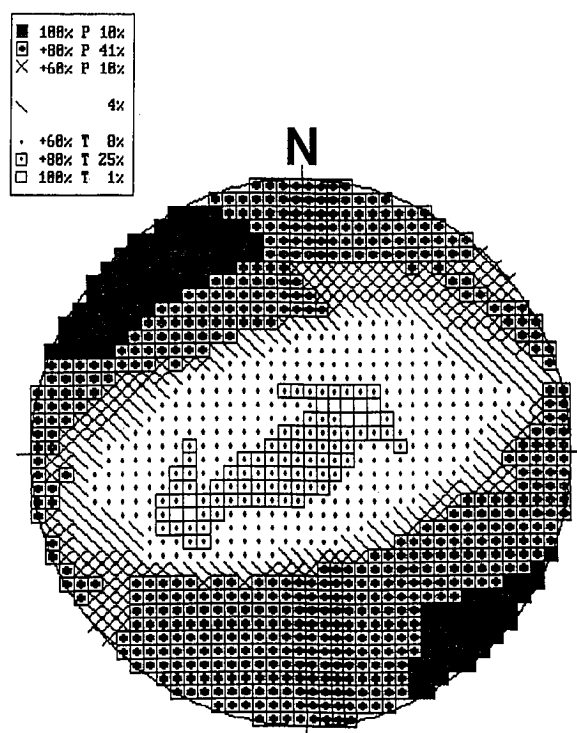


Fig. 11.—Diagrama de diedros rectos de los mecanismos focales de Hindukush (fig. 10). La situación es similar a la de la figura 9.

Fig. 11.—Right dihedral diagrams of the focal mechanisms from Hindukush (fig. 10). The result is similar to fig. 9.

convenientes a la hora de analizar fallas que, aun producidas bajo un mismo evento tectónico, posean características geométricas diferentes.

Como ya indicaron Angelier y Mechler (1977), no es conveniente utilizar el método sólo con las áreas que quedan 100% compatibles en extensión y en compresión, sino que resulta preferible utilizar diagramas de densidad (al menos hasta el 80%).

Si estas zonas comunes presentan algún tipo de inmersión, habrá que comprobar:

1.—si las zonas de carácter contrario (compresión y tensión) aparecen en la horizontal.

2.—si las zonas con inmersión son simétricas respecto al eje vertical.

Los diagramas que cumplan estas dos condiciones serán debidos, probablemente, a la suma de dos o más poblaciones de fallas de características (orientación del plano de falla, de las estrías y el sentido del movimiento) diferentes, por lo que, en este caso, resulta conveniente analizarlas por separado.

En caso contrario, si no hay ningún máximo en la horizontal, o si no existe una simetría respecto al eje vertical, se podrán deducir inmersiones reales de los ejes de máxima compresión y máxima tensión.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido financiado por los proyectos PB87-0544 de la C.I.C.Y.T. y 2490 de la Universidad Complutense.

Agradecemos las correcciones y comentarios realizados por los revisores del artículo, los cuales han ayudado a mejorar cualitativamente el contenido del mismo.

APENDICE I

El desarrollo de un programa informático para el cálculo de los diagramas de diedros rectos resulta más sencillo si: A) se trabaja con diagramas de densidad y B) si se reduce el problema a dos dimensiones.

De este modo, los planos nodales (falla y plano auxiliar), representados por sus ciclográficas, pueden definirse en proyección estereográfica por dos centros (O1 y O2), de coordenadas C1X, C1Y y C2X, C2Y respectivamente y por dos radios (RC1 y RC2) (figura 12).

La intersección de estas ciclográficas de los planos nodales definen en la proyección cuatro tipos de áreas distintas atendiendo al criterio de si la distancia a un punto concreto desde los centros de proyección (DIS1, DIS2) son mayores o menores que los radios de proyección (RC1, RC2).

Así, un punto como A (figura 12) cumple la condición de que $DIS1 < RC1$ y $DIS2 < RC2$, por lo que este campo lo podemos denominar como (- -). De la misma forma se pueden diferenciar otros tres campos, (+ +), (+ -) y (- +).

Resulta evidente que la misma construcción del mecanismo focal implica que las áreas (+ +) y (- -) siempre quedarán con el mismo carácter extensional (T) o compresional (P). Lo mismo ocurre para las áreas (- +) y (+ -).

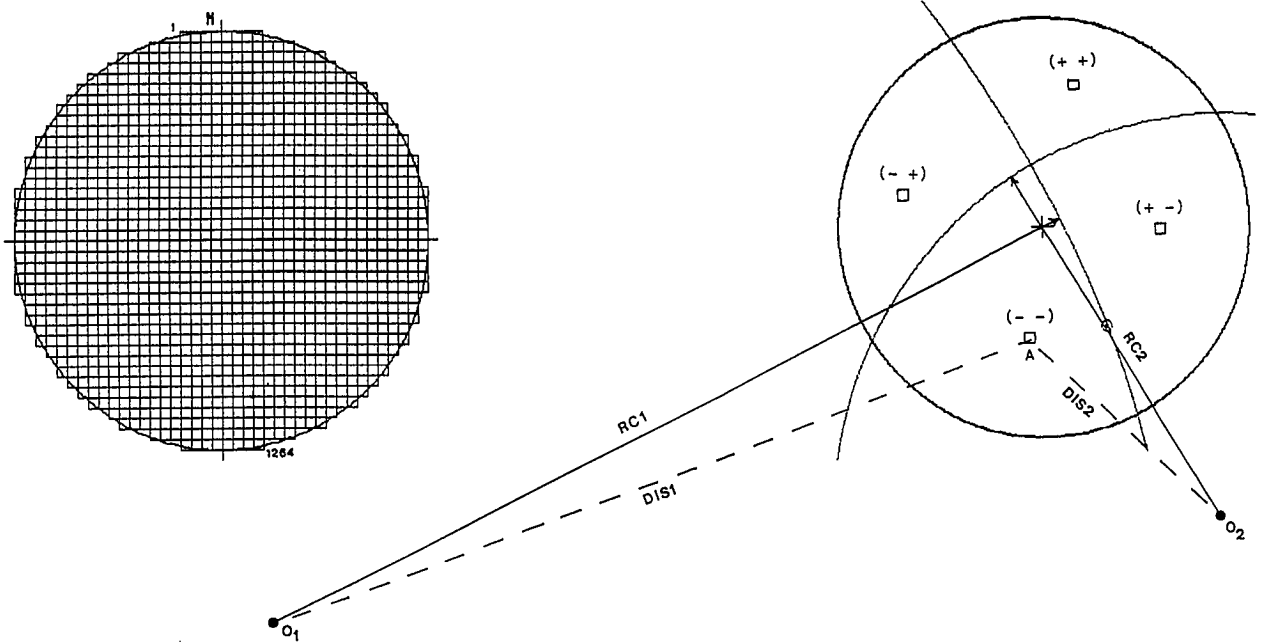


Fig. 12.-Construcción gráfica del método de cálculo del programa DREC. O1 y O2 son los centros de las ciclográficas de los planos nodales, siendo RC1 y RC2 los radios respectivos. Para un punto A dentro de la esfera de proyección, se pueden dar cuatro situaciones diferentes: 1) que las distancias desde los centros hasta A (DIS1 y DIS2) sean menores que los radios (zona (- -)), 2) que sean las dos mayores (zona (+ +)), y 3) y 4), que una sea mayor y otra menor (zonas (+ -) y (- +)). El programa calcula 1264 pixels, asignándolos a cada una de estas posibilidades.

Fig. 12.-Graphic construction of the calculation method of DREC program. O1 and O2 are the stereographical plot centers of nodal planes. RC1 and RC2 are the respective radius. For a point A inside the projection sphere, four different situations can occur: 1) the distances from the centers to A (DIS1 and DIS2) are shorter than radius ((- -) zone); 2) both distances are larger than radius ((+ +) zone); 3) and 4) one is larger and the other is shorter ((+ -) and (- +) zones). The program calculates 1264 pixels assigning them to one of these possibilities.

Por otro lado, y dadas las simetrías del dibujo, el centro de la proyección (que coincide con el eje vertical), siempre va a quedar en el área (- -) excepto en una falla que buze 90°. Con este criterio, y teniendo en cuenta que excepto en una falla vertical, siempre puede definirse si es más o menos normal o inversa, puede concluirse que, para fallas con componente normal, las áreas (+ +) y (- -) van a tener un carácter de acortamiento (y de estiramiento las (+ -) y (- +)), mientras que ocurre lo contrario para fallas inversas.

El programa DREC para PC con pantalla EGA se basa en las consideraciones que acabamos de exponer. Está preparado para dividir la falsilla en 1264 pixels, con lo que se consigue un aspecto final apropiado con un tiempo de cálculo razonable. Su organigrama de trabajo puede verse en la figura 13. El programa calcula los centros (C1X, C1Y, C2X y C2Y) y los radios de proyección (RC1 y RC2) desde los datos de campo (Dirección, Buzamiento, Cabeceo y sentido de movimiento). Posteriormente, para

AREA	FALLA NORMAL	FALLA INVERSA
(- +)	0	1
(- -)	1	0
(+ -)	0	1
(+ +)	1	0

Tabla 2.-Valores asignados a cada pixel para los cuatro tipos de áreas de la figura 12.

Table 2.-Assigned values to each pixel for the four different types of areas of fig. 12.

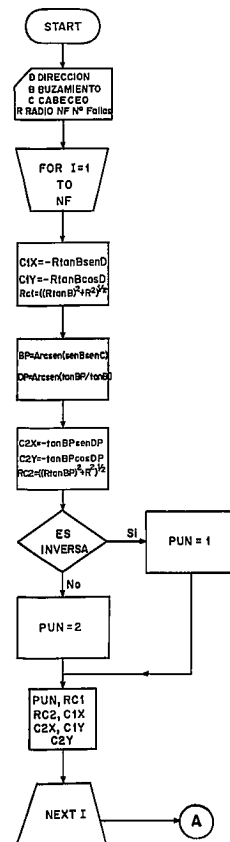


Fig. 13.1.-Organigrama de trabajo del programa DREC.

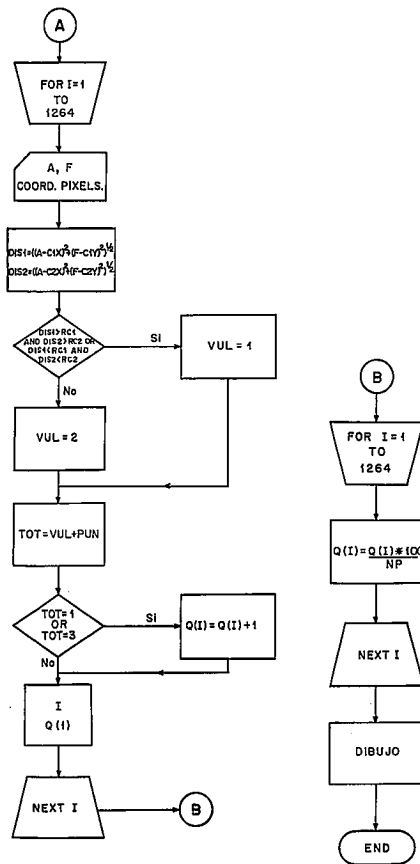


Fig. 13.2 y 13.3.-Organigram of DREC program.

cada falla y desde el pixel 1 al 1264, se calcula si las distancias entre los centros y cada pixel (DIS1 y DIS2) son mayores o no que los radios.

Dependiendo del carácter normal o inverso de la falla, a cada tipo de área se le asigna un "1" o un "0" (1, compresión, 0, extensión) según la tabla 2.

Dividiendo al final el valor asignado a cada pixel correspondiente al total de fallas analizadas entre el número total de fallas, se obtienen los porcentajes de compatibilidad en compresión, cuyo complemento lo es en extensión. Asignado una forma o un color diferente a cada intervalo de posibles valores de los pixels, se obtienen los diagramas de densidad.

El programa genera al final un fichero de dibujo (*.dib) y cuenta con menús de ayuda, por lo que su utilización resulta sencilla.

El programa es de libre difusión y será proporcionado previa petición a los autores.

BIBLIOGRAFIA

Angelier, J. y Mechler, P. (1977) Sur un méthode graphique de recherche des contraintes principales également utilisable en tectonique et en séismologie: la méthode des dièdres droits. *Bull. Soc. Géol. France*, 7: 1309-1318.

Capote, R., De Vicente, G. y González-Casado, J.M. (1990) Evolución de las deformaciones alpinas en el Sistema Central Español. *Geogaceta*, 7: 20-22.

Capote, R., De Vicente, G. y González-Casado, J.M. (1991) An application of the slip model of brittle deformation to focal mechanism analysis in three different plate tectonic situations. *Tectonophysics*, 191: 399-409.

Carey, E. (1979) Recherche des directions principales de contraintes associées au jeu d'une population de failles. *Rev. Geol. Dyn. Phys.*, 21 (1): 37-66.

De Vicente, G. (1988) *Análisis poblacional de fallas. El sector de enlace Sistema Central-Cordillera Ibérica*. Tesis Universidad Complutense. Madrid. 331 pp.

Etchecopar, A., Vasseur, G. y Daigneres, M. (1981) An inverse problem in microtectonic for the determination of stress tensors from faults striation analysis. *Jour. Struc. Geol.*, 3: 51-65.

Pegoraro, O. (1972) *Application de la microtectonique à un étude de neotectonique. Le golfe Maliaque (Grèce centrale)*. Thèse IIIème cycle. U.S.T.L. Montpellier: 41 pp.

Ram, A. y Yadav, L. (1984) Focal mechanism solutions of earthquakes and tectonics of the Hindukush region. *Tectonophysics*, 104: 85-97.

Reches, Z. (1983) Faulting of rocks in three-dimensional strain fields II. Theoretical analysis. *Tectonophysics*, 95: 133-156.

Simón Gómez, J.L. (1986) Analysis of a gradual change in stress regime (example from the eastern Iberian chaine, Spain). *Tectonophysics*, 124: 37-53.

Recibido el 27 de octubre de 1991
Aceptado el 23 de abril de 1992