

Maestría Universitaria en Túneles y Obras Subterráneas



ÁREA: A
MÓDULO: GEOLOGÍA

TECTÓNICA 1:
ESTADOS TENSIONALES EN EL TERRENO

Ponente: Ramón Capote.
UPM. Dpto. Geodinámica
Día: 17/01/07
Hora: 18:15 a 19:15

ESTADOS TENSIONALES EN EL TERRENO

Ramón Capote

Departamento de Geodinámica
Universidad Complutense

TENSIONES

- Efectos de las tensiones del terreno
- Origen, magnitud y distribución de los esfuerzos
- Métodos de medida de los esfuerzos
- Los campos de esfuerzos tectónicos actuales
- Las tensiones tectónicas en España

IMPORTANCIA DE LAS TENSIONES

- Daños asociados a la liberación de esfuerzos en terremotos
- Obras subterráneas
 - Túneles
 - Cavernas para almacenamiento de gas
 - Almacenamientos de residuos radiactivos
- Recuperación o explotación de petróleo
 - Estabilidad de los sondeos
 - Gestión eficiente de los reservorios o campos

Fuente de
esfuerzos

Topografía

Tensor esfuerzos
natural

Factores
modificadores

Tensor
esfuerzos final

Concentración
de esfuerzos

Orientación
Magnitud

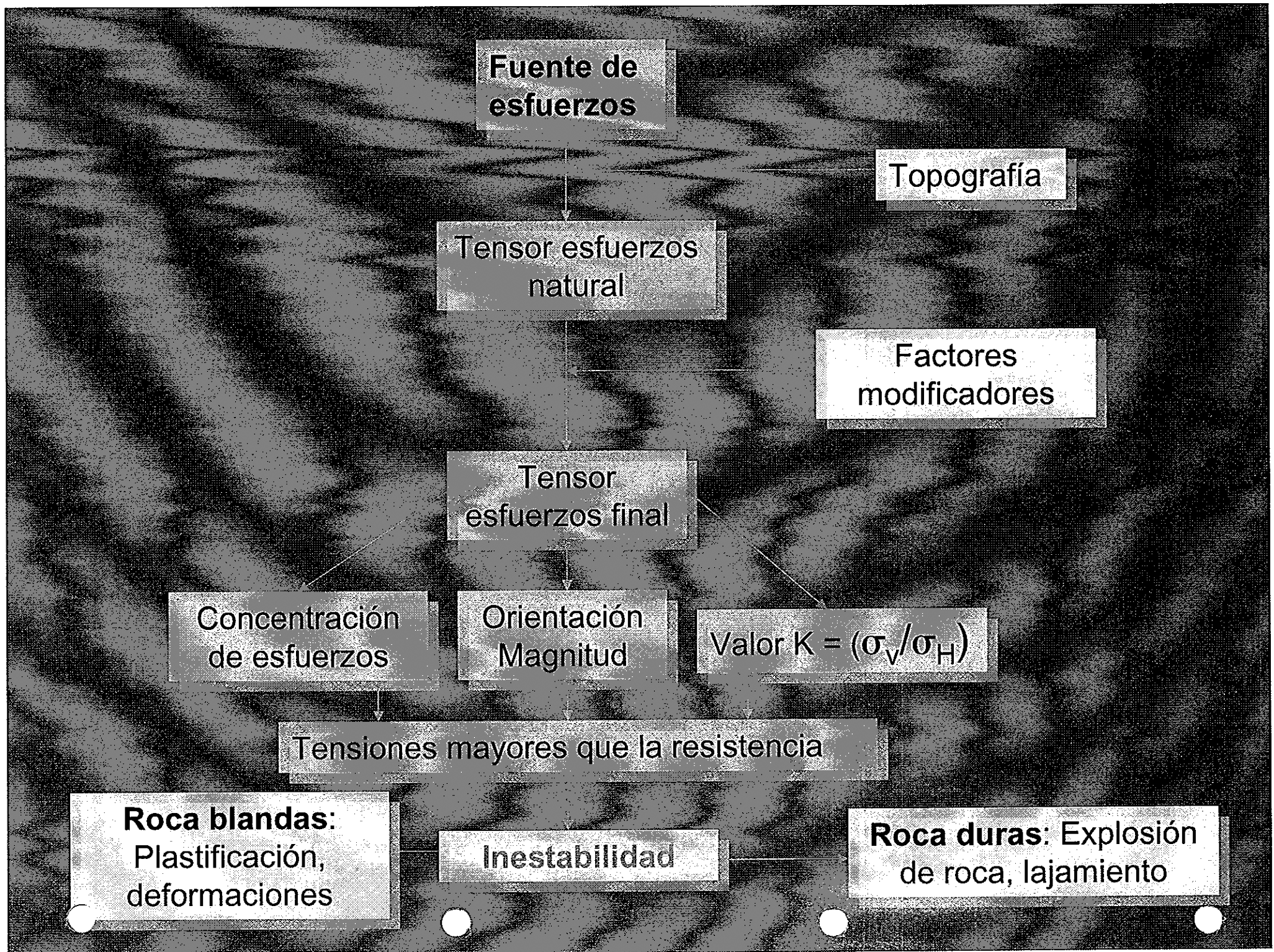
Valor $K = (\sigma_v / \sigma_H)$

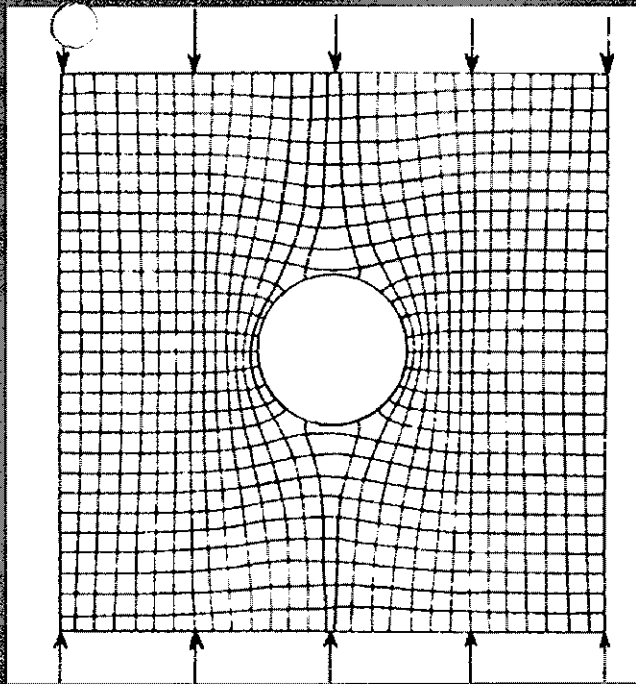
Tensiones mayores que la resistencia

Roca blandas:
Plastificación,
deformaciones

Inestabilidad

Roca duras: Explosión
de roca, lajamiento





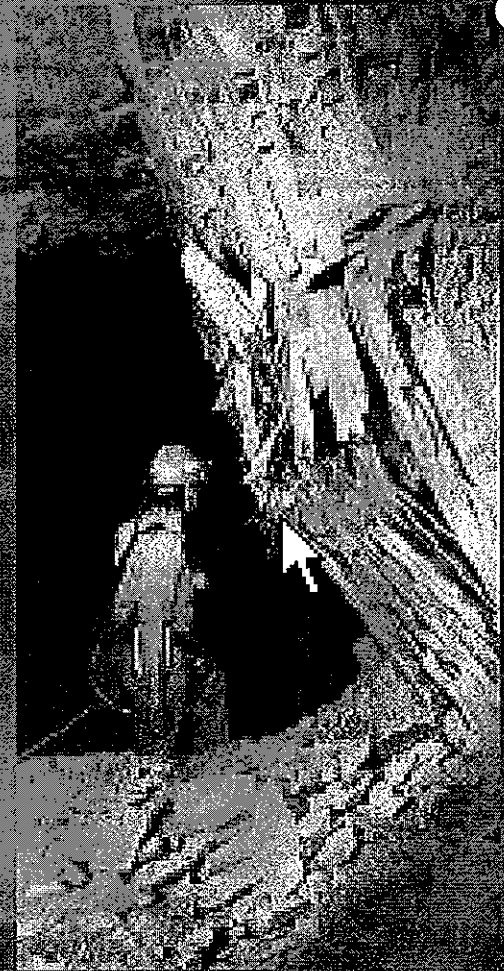
Modificación de
las tensiones
alrededor del
túnel

Riesgo de inestabilidad (Hoek
& Brown)

$\sigma_v/\sigma_{ci} = 0,1$ estable

$\sigma_v/\sigma_{ci} = 0,2-0,3$ lajamiento

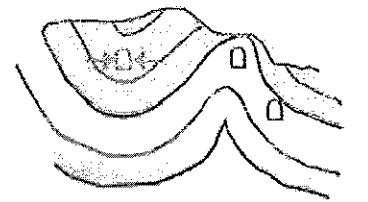
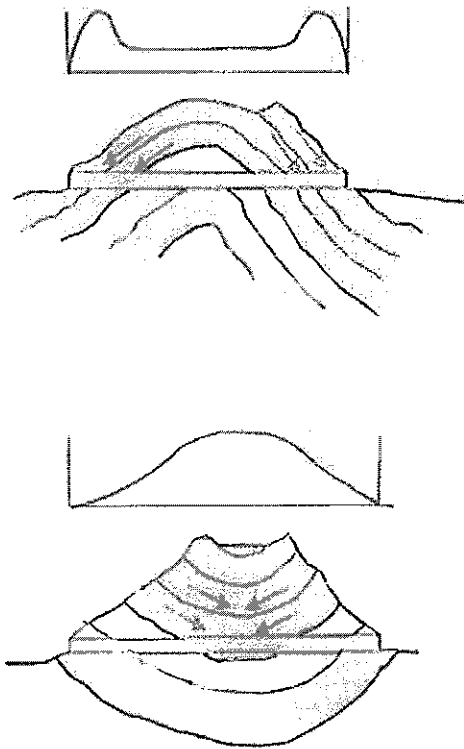
$\sigma_v/\sigma_{ci} > 0,5$ explosión roca



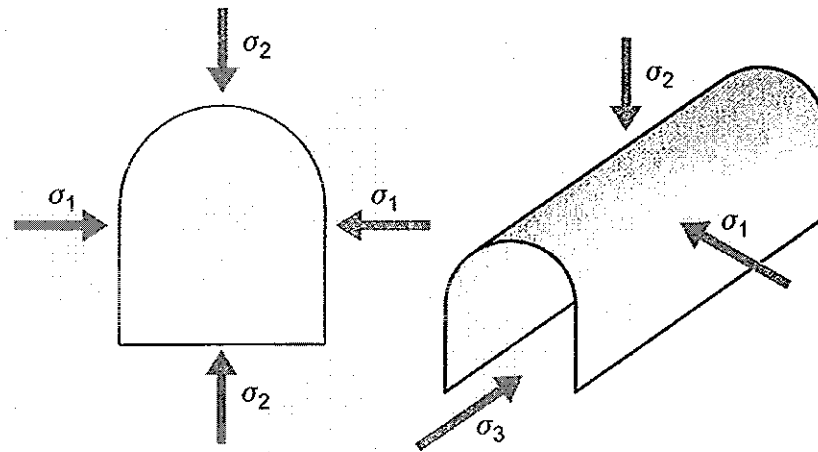
Problemas debidos a las tensiones:

Deformación , plastificación, explosión
de roca

TÚNELES

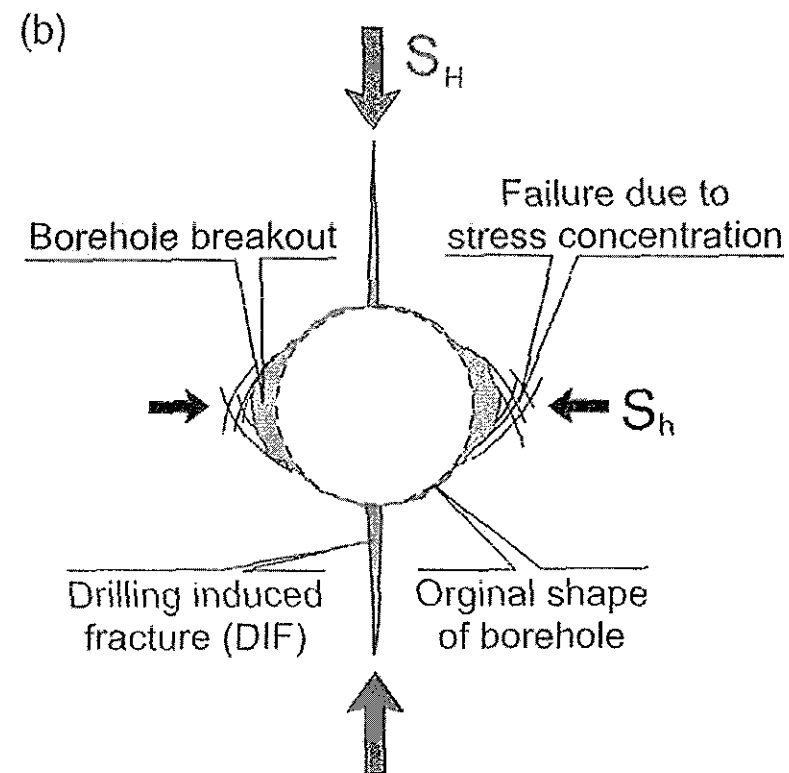
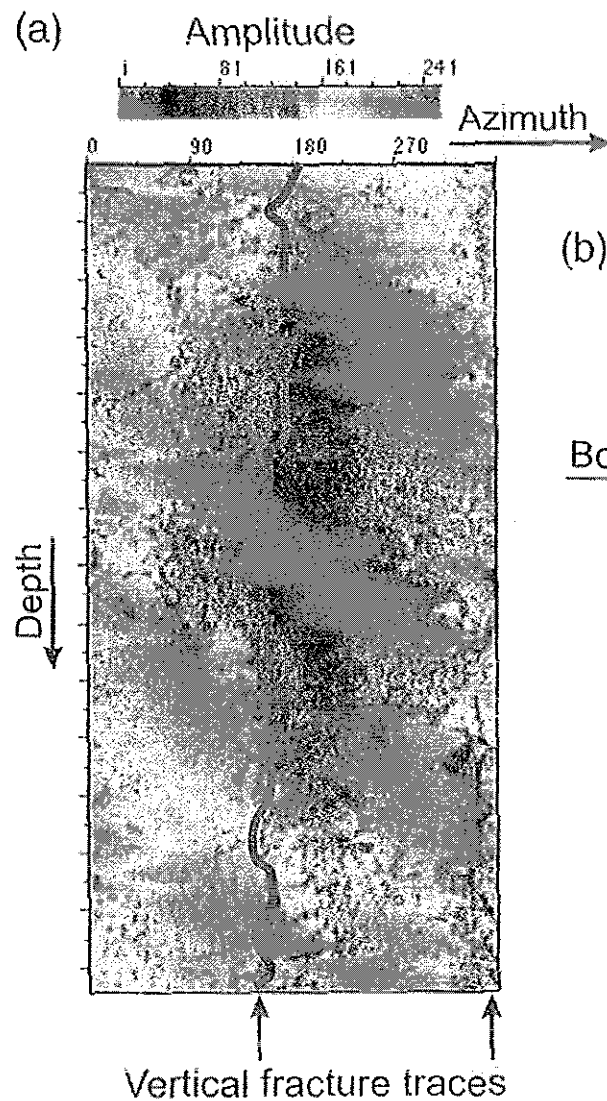


$$K = \sigma_H / \sigma_V$$



Concentraciones de esfuerzos por estructura: Esfuerzos estáticos gravitacionales

Orientación desfavorable de esfuerzos tectónicos: **Tectónica activa**

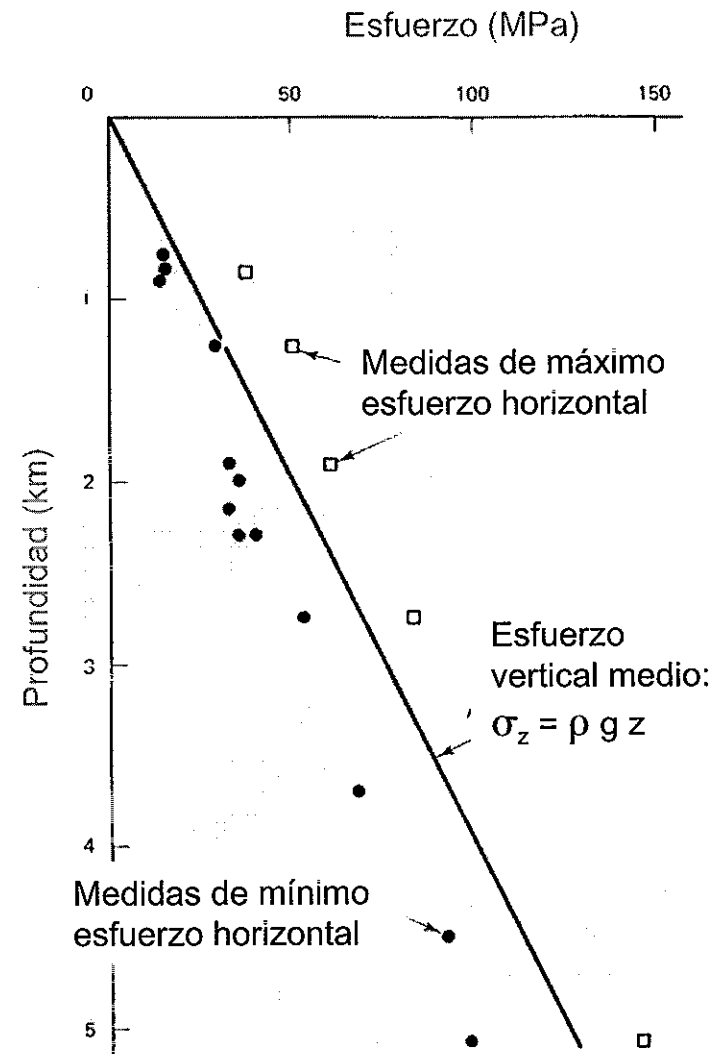
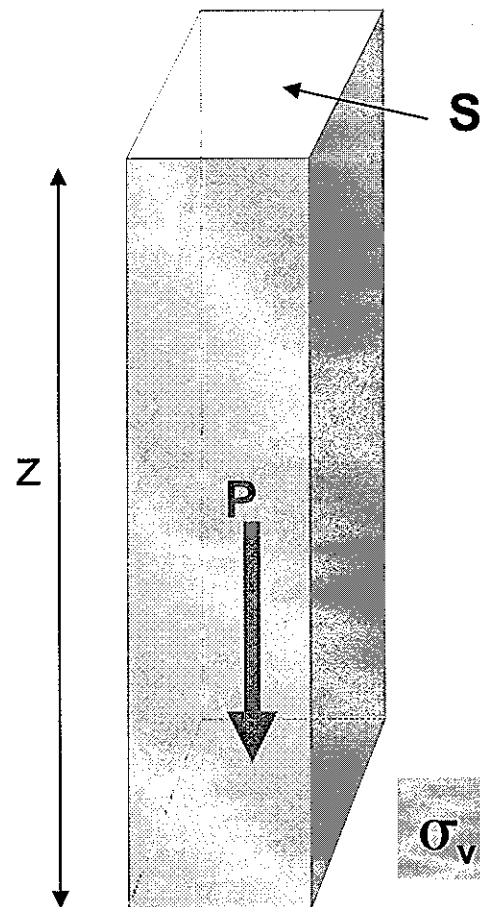


Rotura y estallido de roca en
sondeos de petróleo

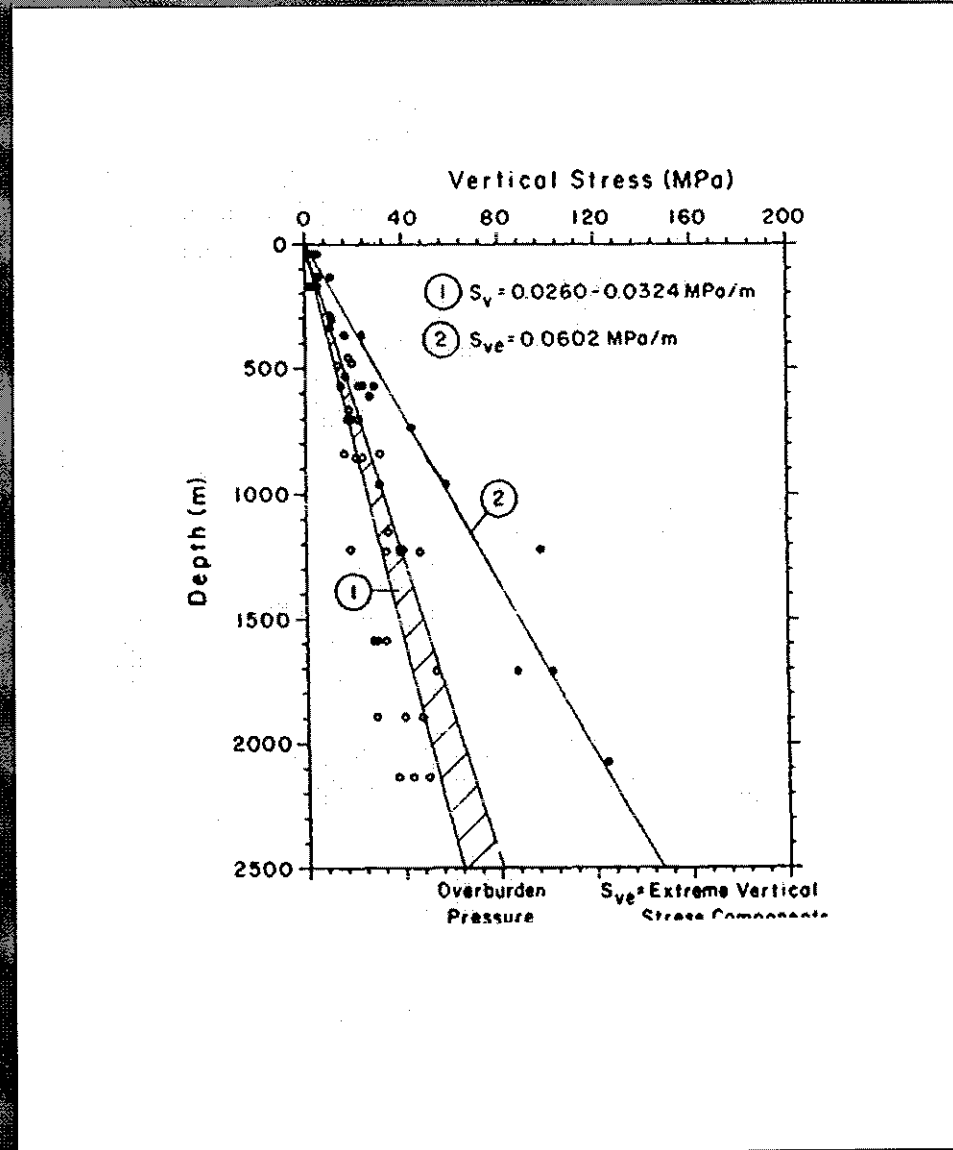
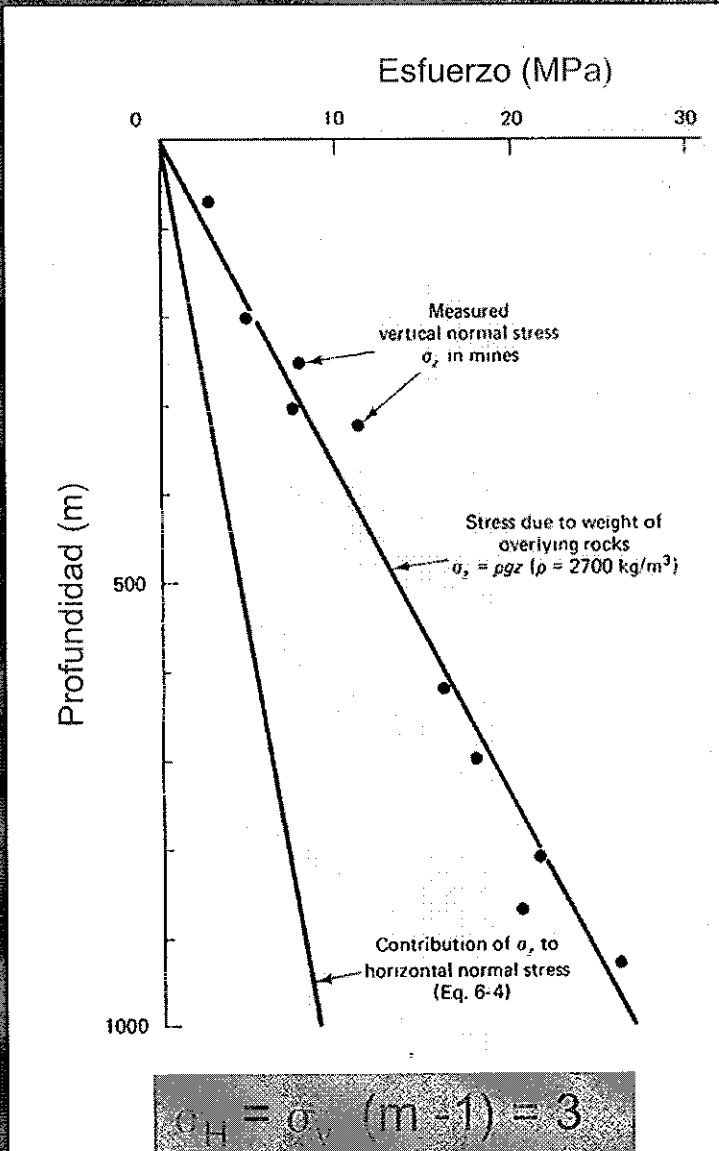
TIPOS DE ESFUERZOS

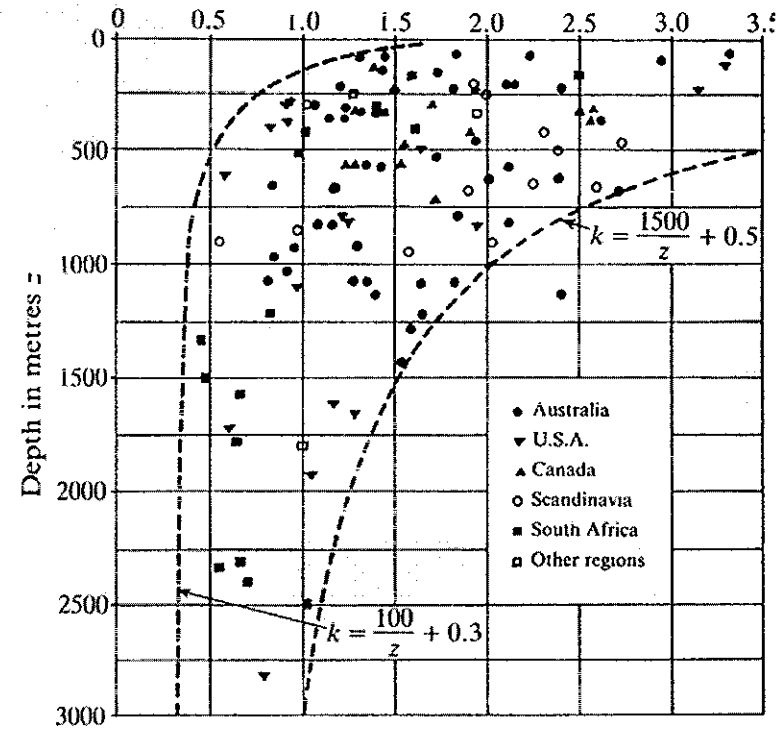
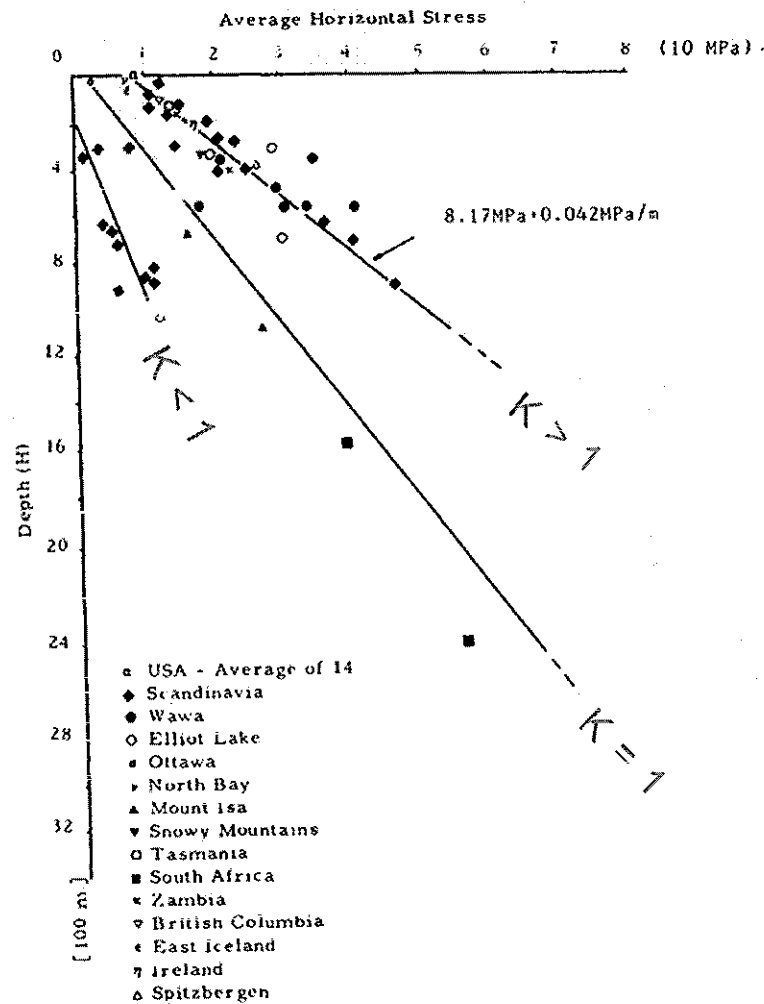


ESFUERZO GRAVITACIONAL

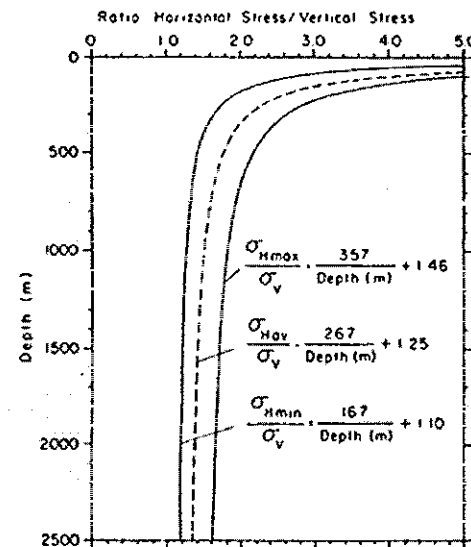


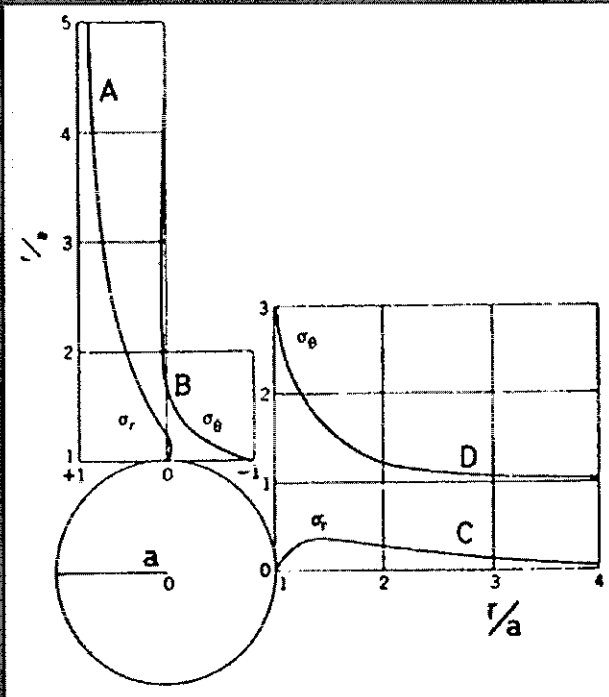
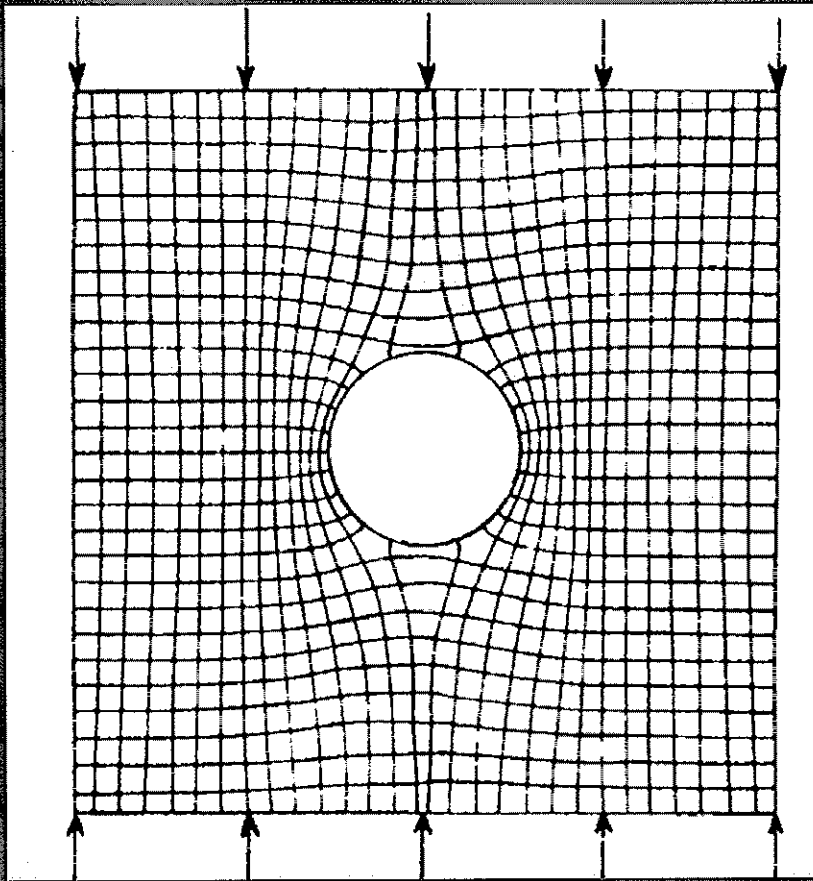
ESFUERZO GRAVITACIONAL HORIZONTAL



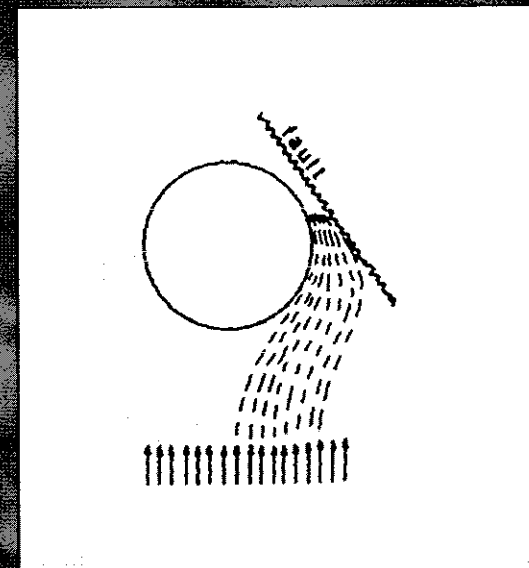


Hoek & Brown





Concentración de esfuerzos por presencia de fallas



ESFUERZO TÉRMICO

- Cambios de temperatura producen dilatación
- La deformación viene dado por:

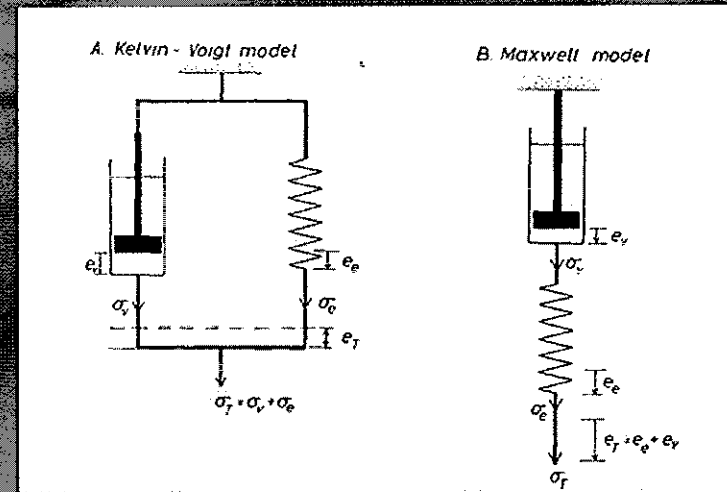
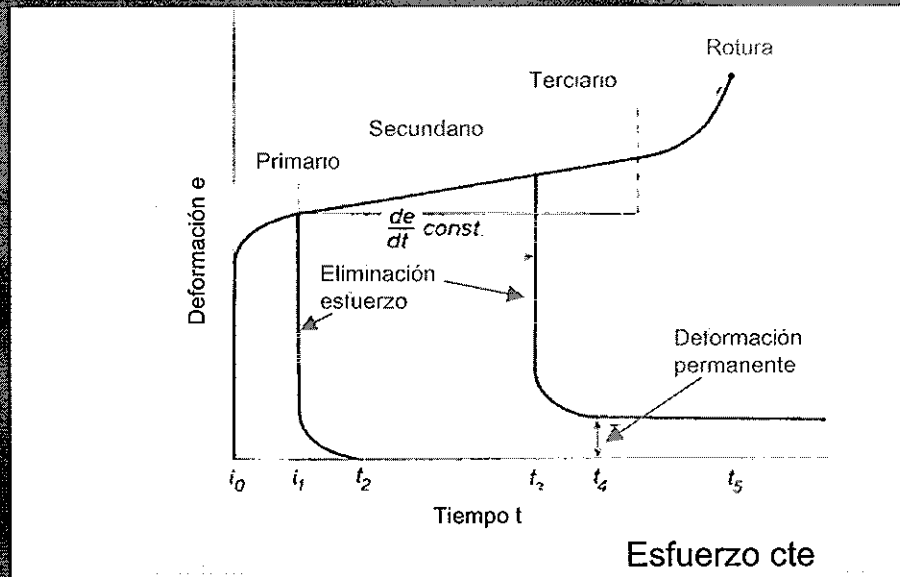
$$\epsilon_t = \alpha \Delta T$$

- El esfuerzo es:

$$\sigma_t = \alpha E \Delta T / (1 - \nu)$$

- Para $\Delta T = 100^\circ\text{C}$; $\alpha = 10^{-6} \text{ MPa}$; $\nu = 0,25$ el esfuerzo térmico alcanza – 13 MPa
- Hay cambio térmico por levantamiento y erosión y por hundimiento bajo sedimentos
- Esfuerzo térmico y disyunción columnar

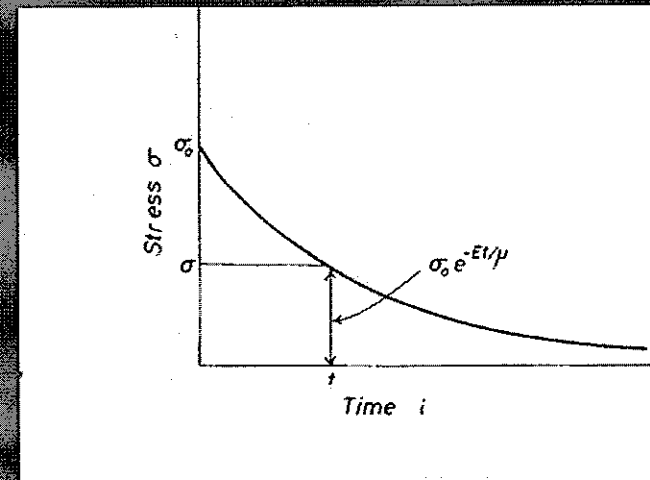
TENSIONES RESIDUALES



$$\sigma = \sigma_0 \exp - Et/\mu$$

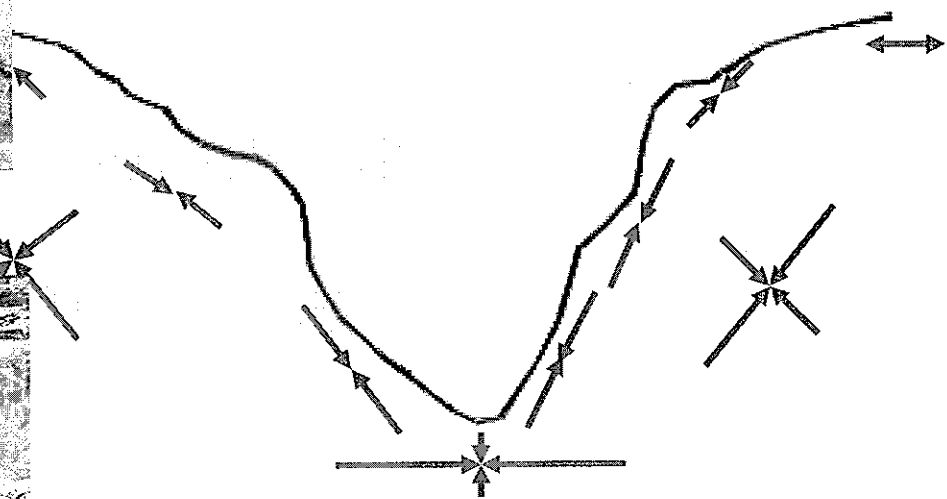
Para $\mu = 2,2 \times 10^{22}$ poises tiempo relajación 100.000 – 10.000.000 años

Para $\mu = 2,2 \times 10^{26}$ poises es 50.000.000 años





Zona de montañas y valles

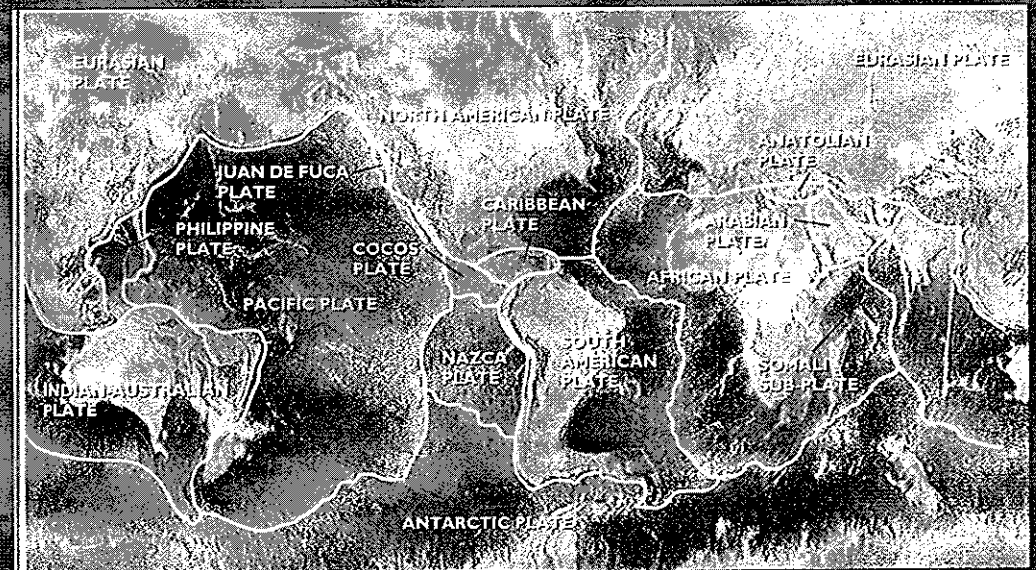


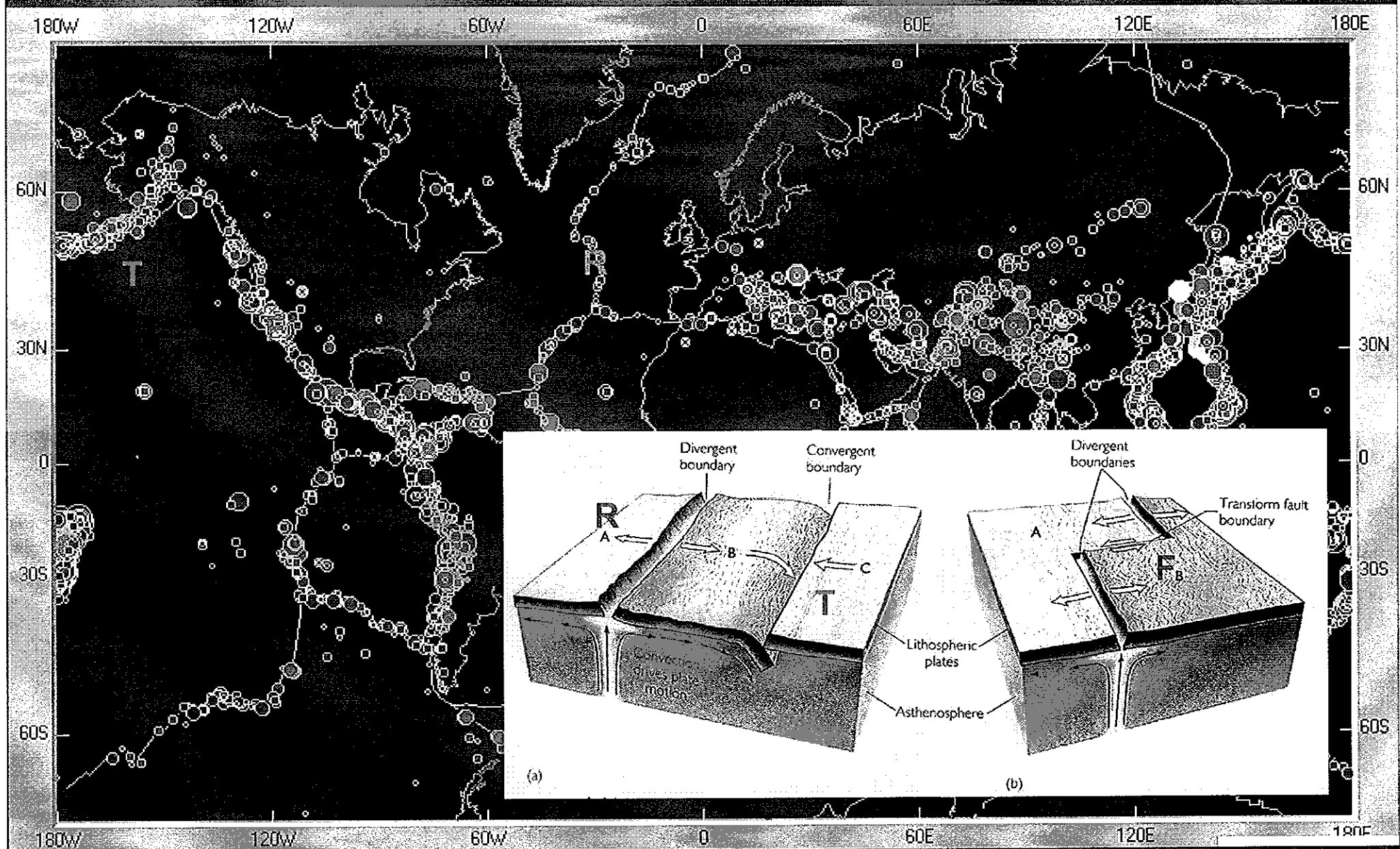
TENSIONES TECTÓNICAS

- Campos de esfuerzos globales de Primer orden
 - Están relacionados con la Tectónica de Placas
- Campos de esfuerzo de Segundo orden
 - Relacionados con efectos locales
 - Esfuerzo flexural
 - Contraste lateral de densidades
 - Contraste lateral de resistencias
 - Actividad de fallas
 - Cuerpos ígneos subvolcánicos

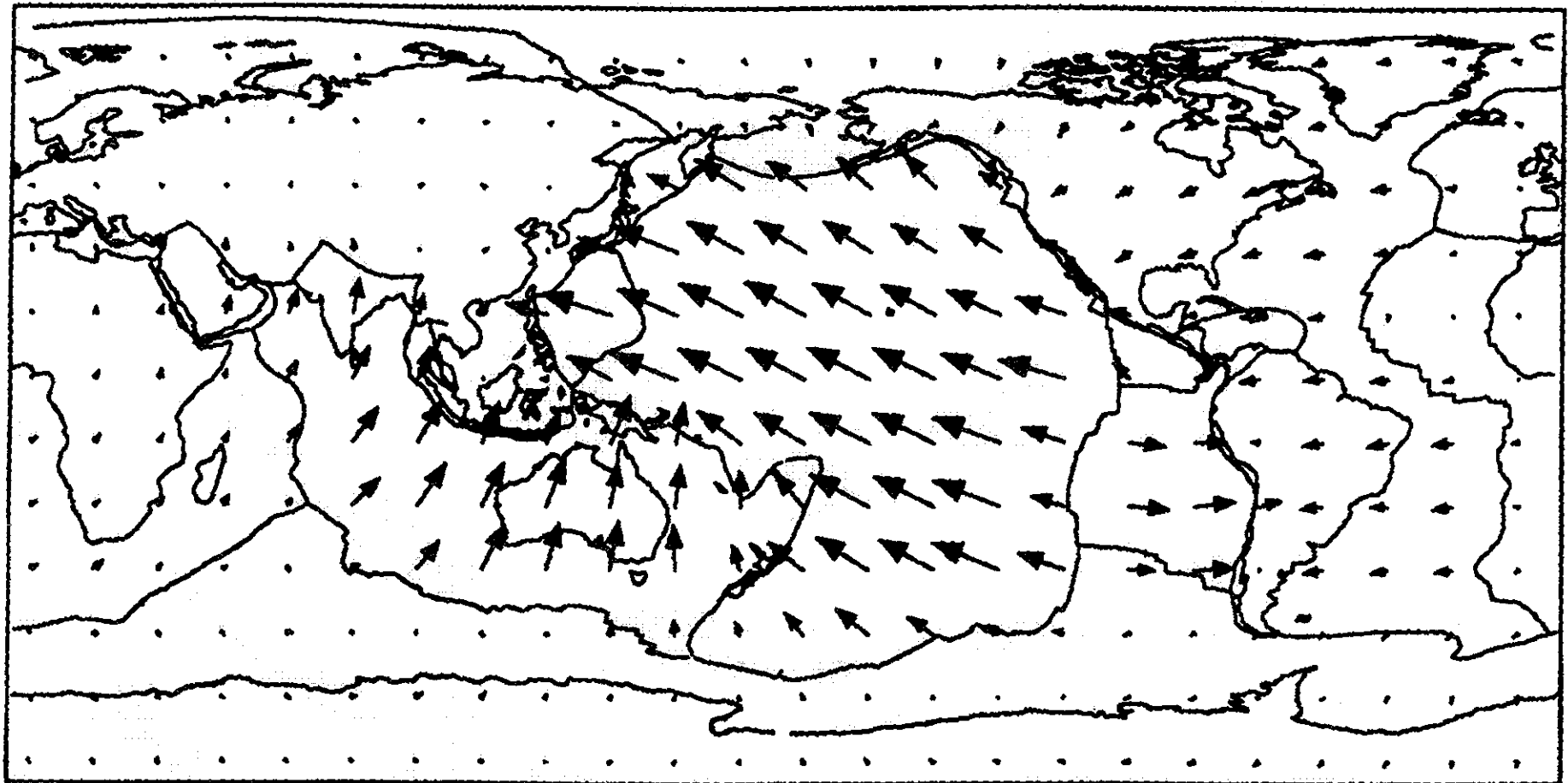
LOS CAMPOS DE ESFUERZOS TECTÓNICOS REGIONALES

- Esfuerzos, actividad tectónica y sismicidad
- Zonas activas o bordes de placas
 - Bordes divergentes
 - Bordes convergentes
 - Bordes transformantes
- Zonas intraplaca



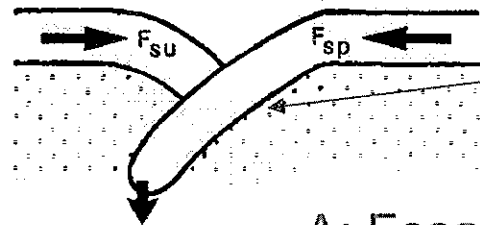


DIRECCIÓN Y VELOCIDAD DEL DESPLAZAMIENTO DE LAS PLACAS



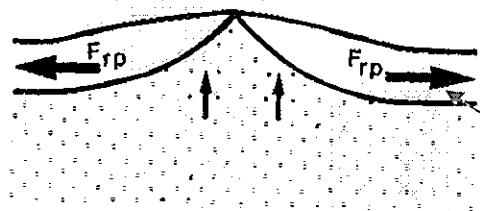
Scale 10cm/yr →

Campos primer orden

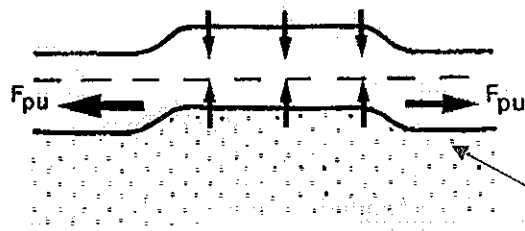


A: Fosa

B: Dorsal



Campos segundo orden



C: Levantamiento de mesetas

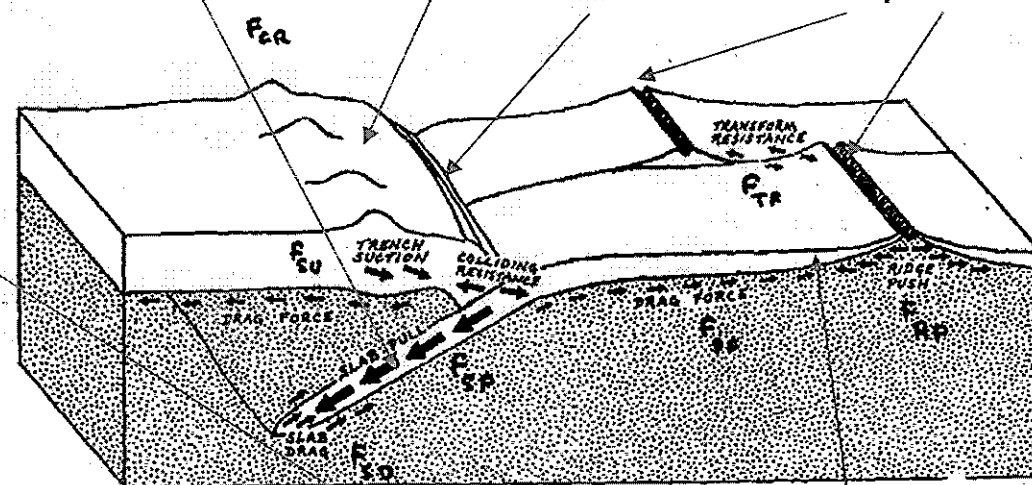
Esfuerzo de primer orden: Fuerzas motoras de la Tectónica de Placas

Tracción de placa
descendente
(subducción)

Succión de fosa

Colisión

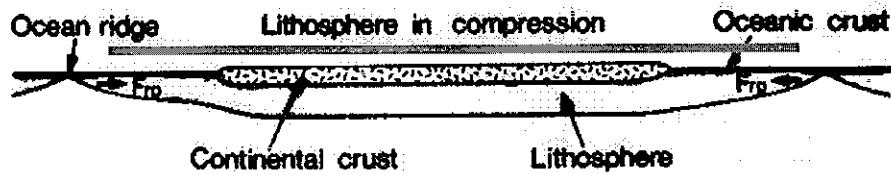
Separación



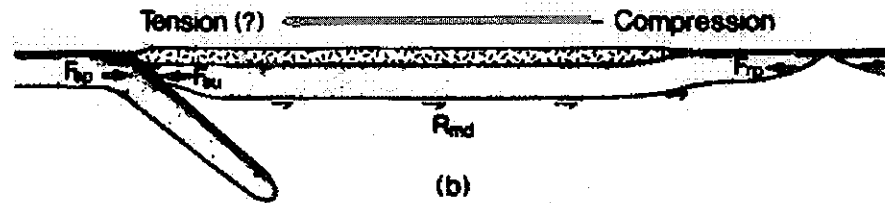
Levantamiento de mesetas

Empuje de dorsal

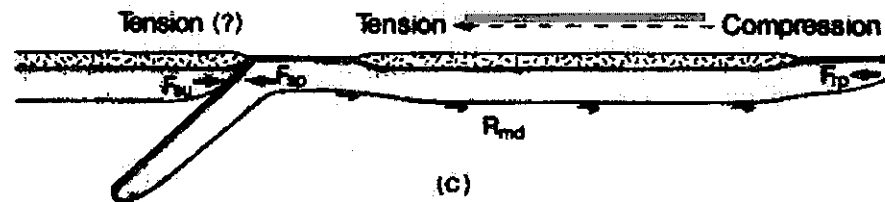
Algunas situaciones de placas y los esfuerzos intraplaca resultantes



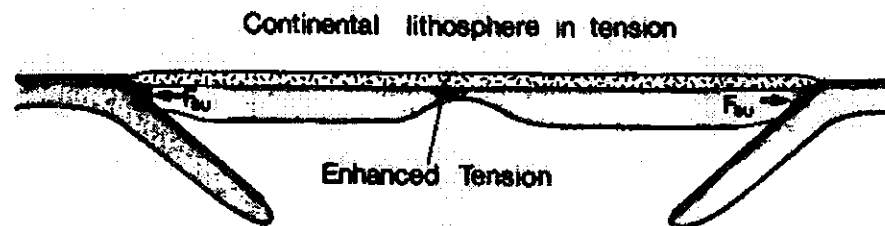
(a)



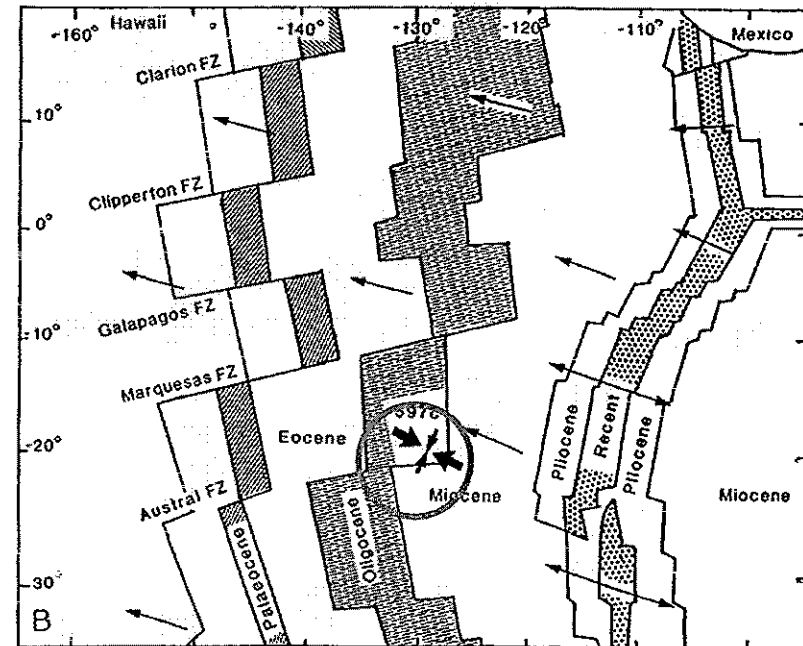
(b)



(c)

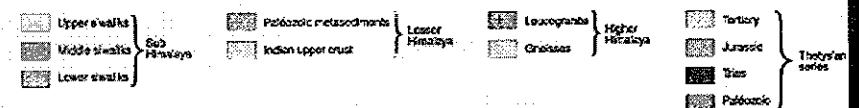
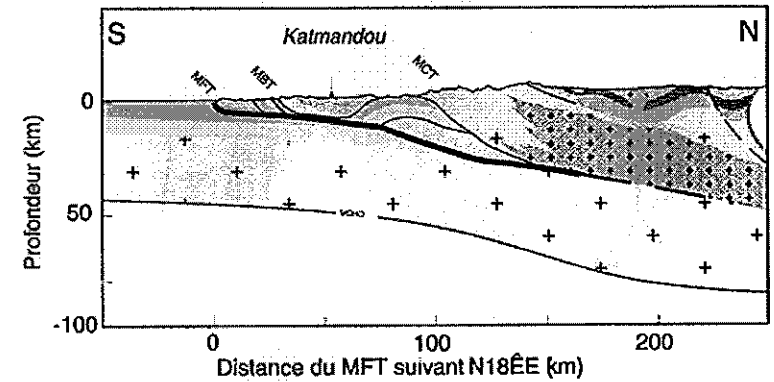
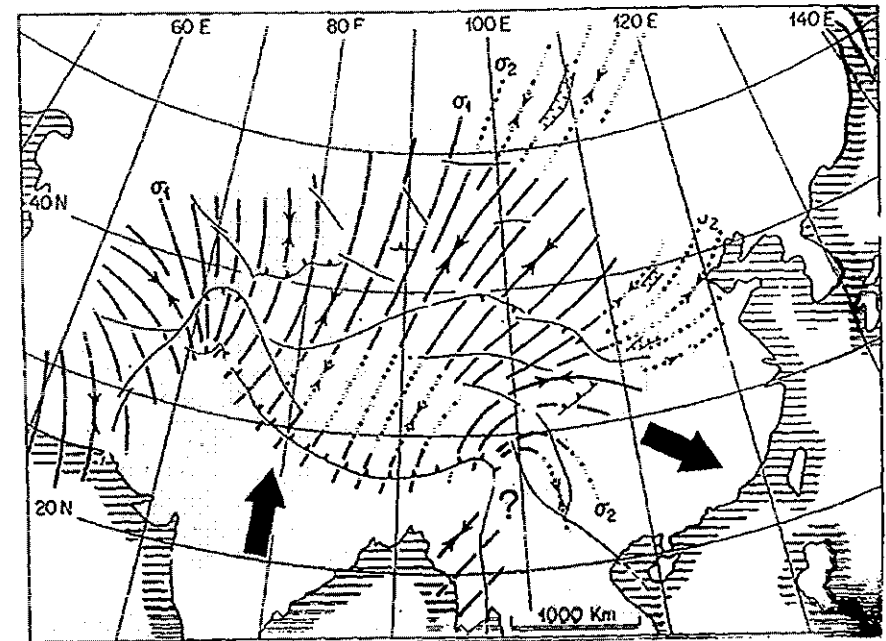
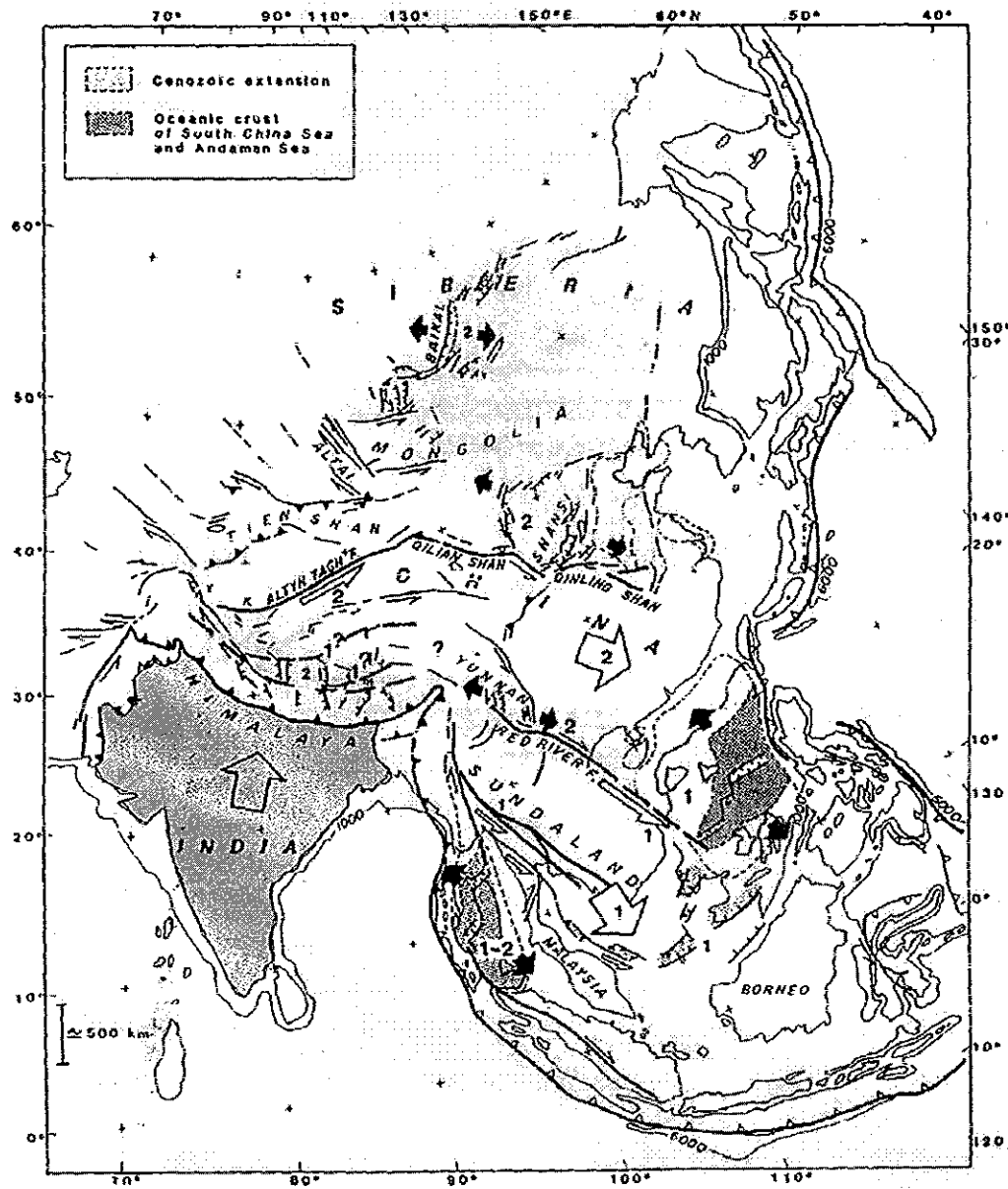


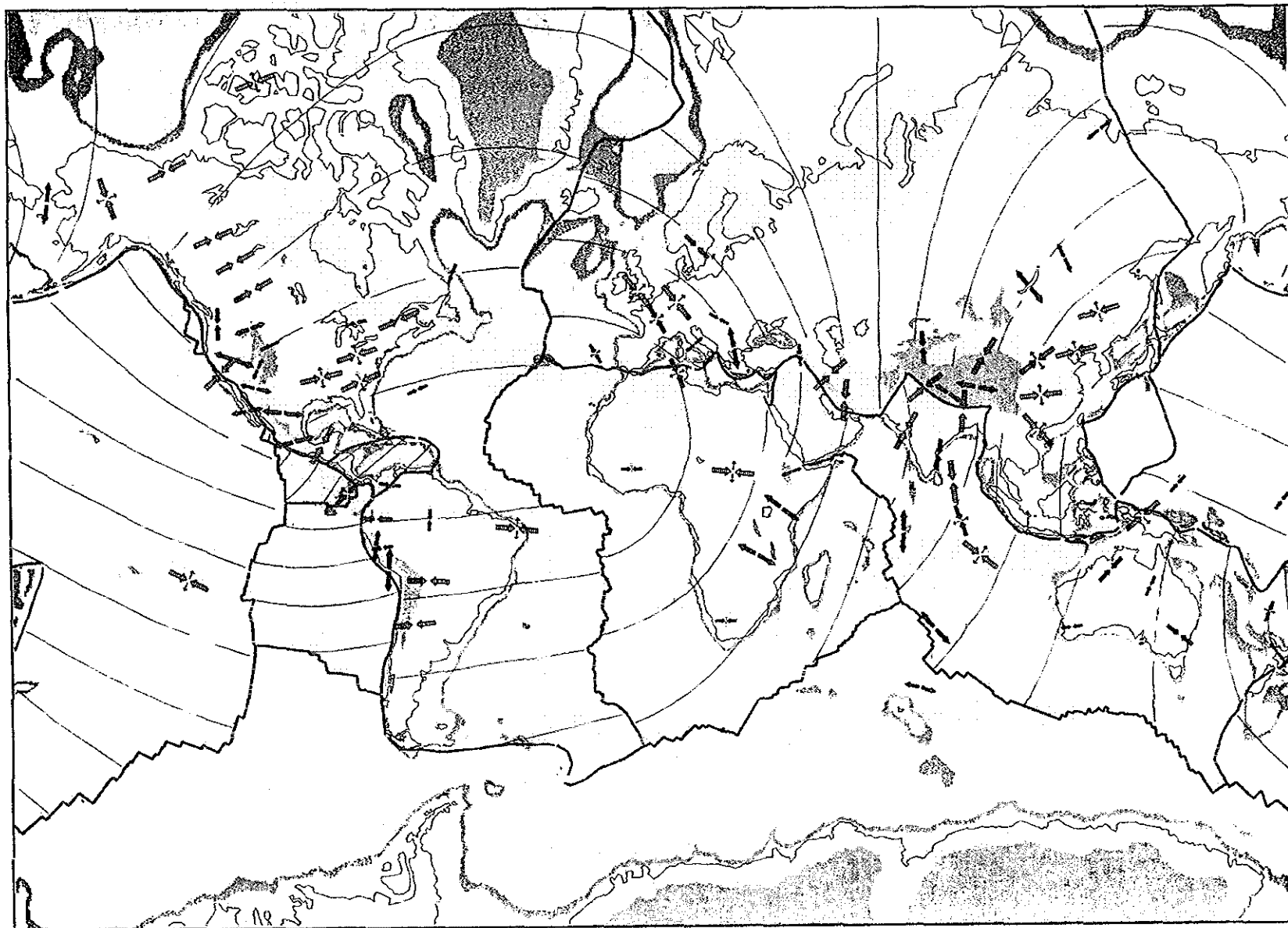
(d)



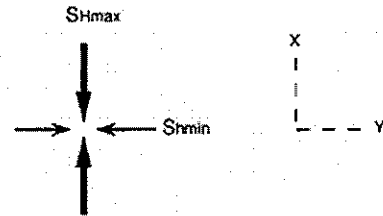
Eje de la dorsal

ZONAS INTRACONTINENTALES ACTIVAS

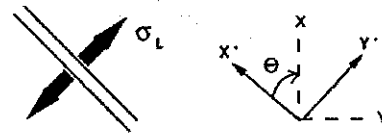




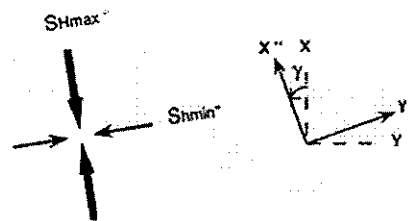
Desviación local del esfuerzo regional



Regional



Local



Resultante

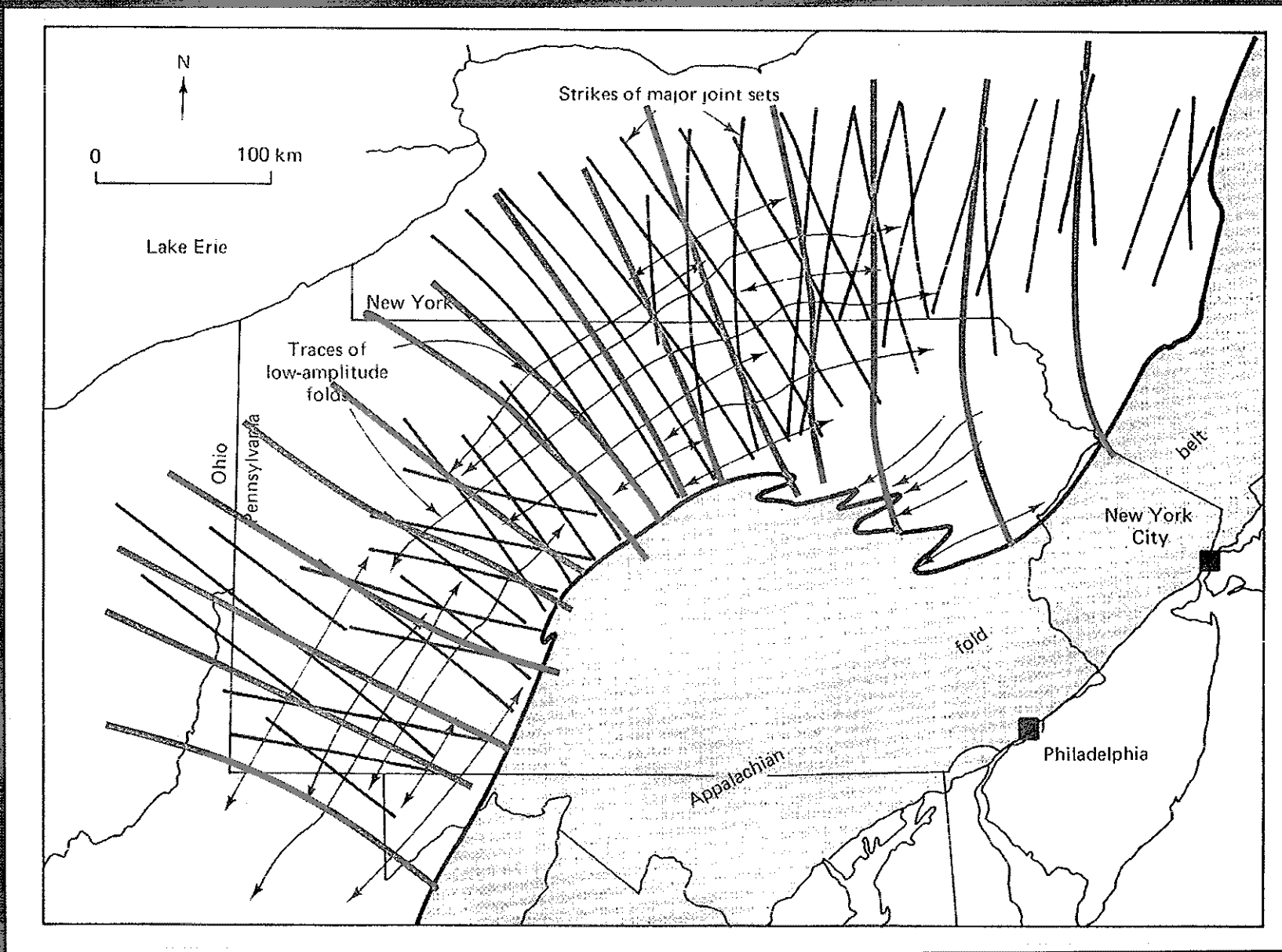
Esfuerzo resultante (Zoback, 1992)

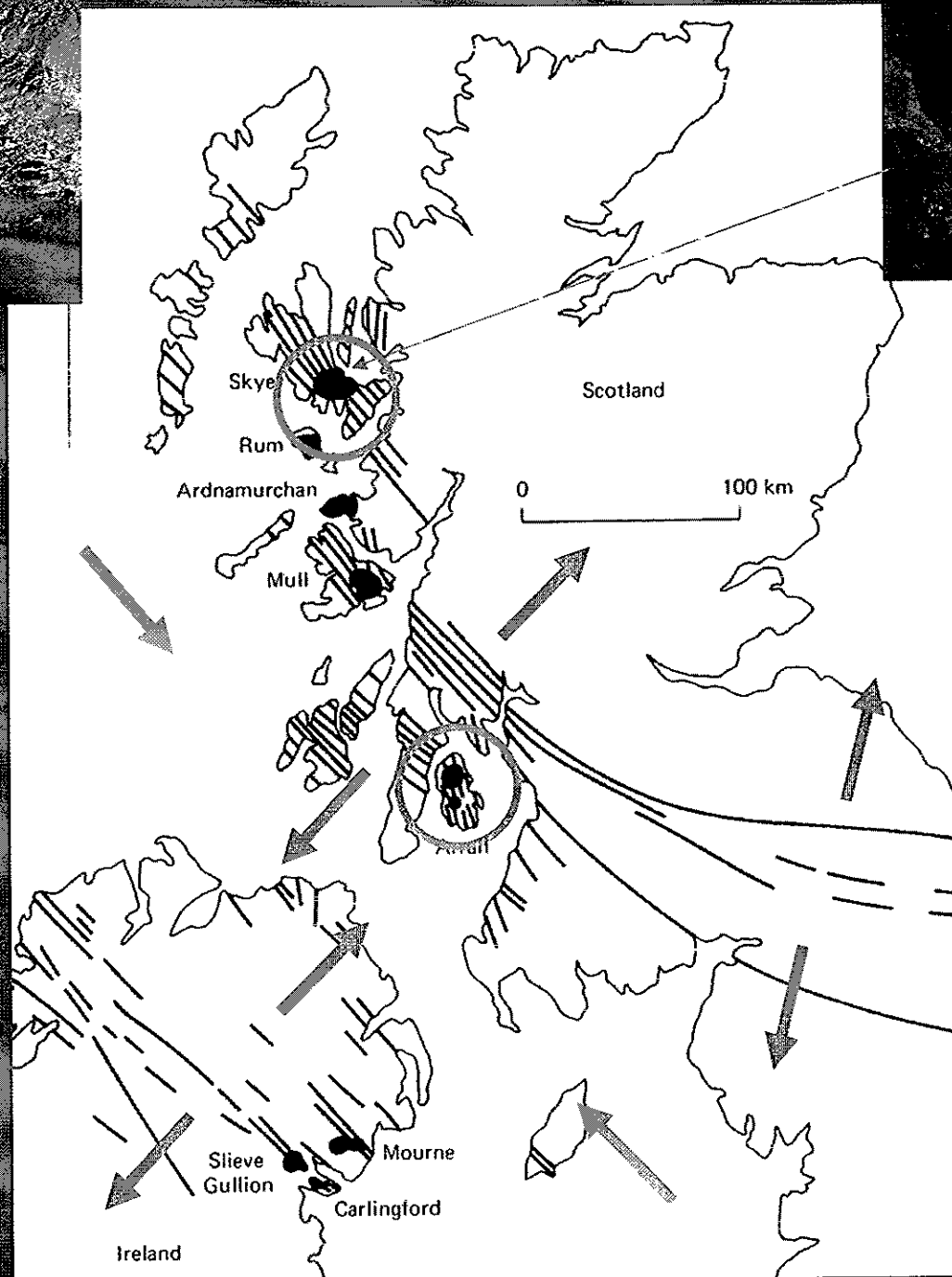
$$\tau_{xy} = \frac{1}{2} \sigma_L \sin 2\theta$$

$$\sigma_x = S_{Hmax} + \frac{1}{2} \sigma_L (1 - \cos 2\theta)$$

$$\sigma_y = S_{hmin} + \frac{1}{2} \sigma_L (1 + \cos 2\theta)$$

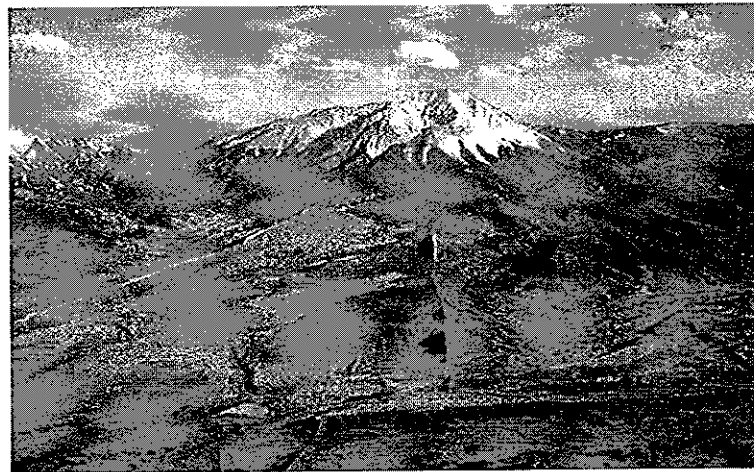
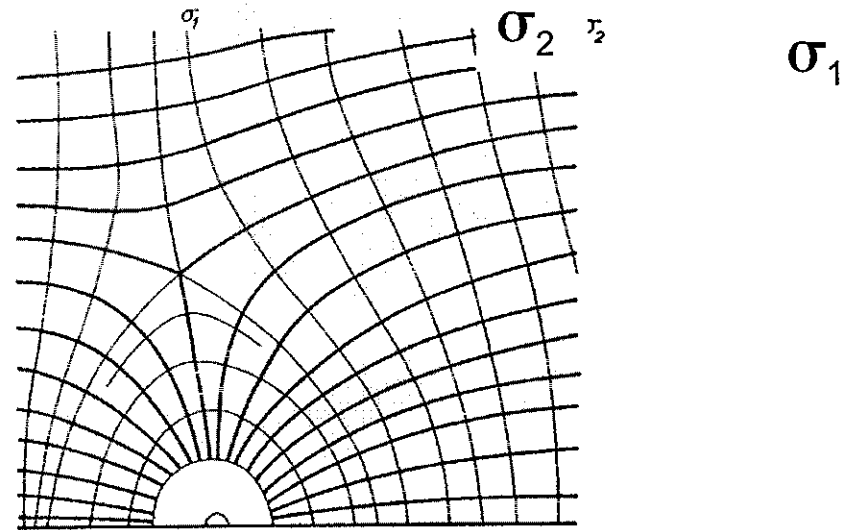
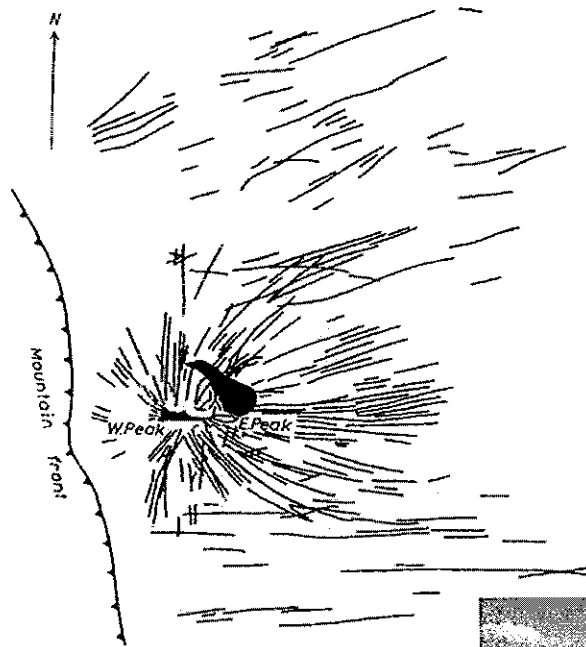
$$\gamma = \frac{1}{2} \arctan \frac{\sin 2\theta}{(S_{Hmax} - S_{hmin}) / \sigma_L - \cos 2\theta}$$

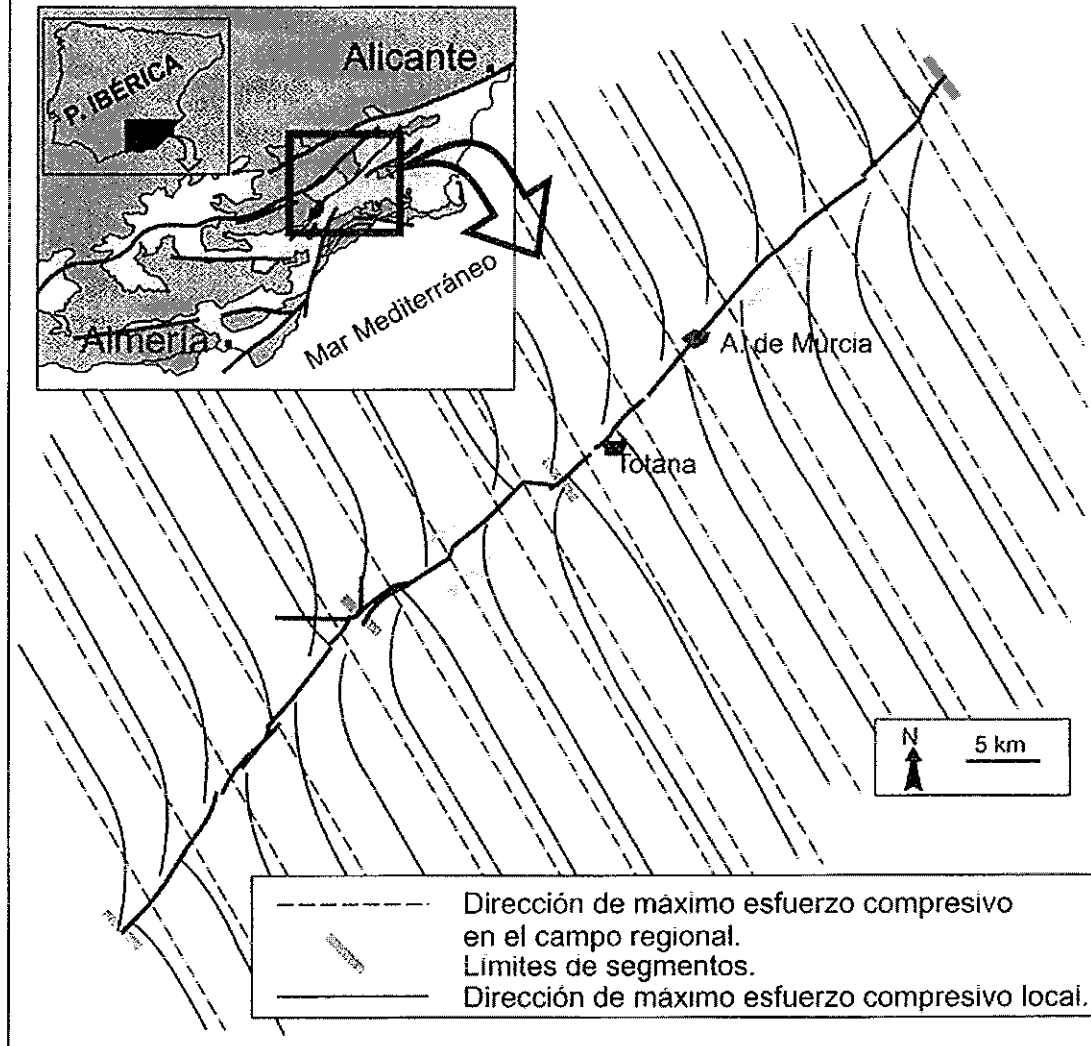
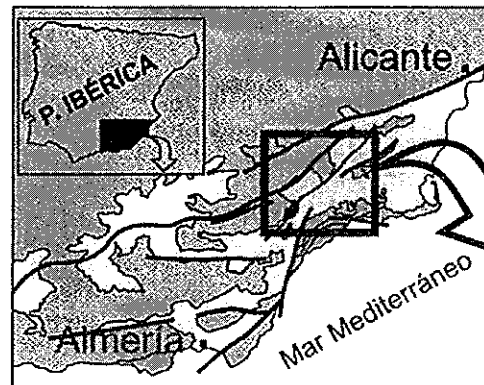




Campo de esfuerzos en Spanish Peak

Diques radiales y trayectorias de esfuerzos





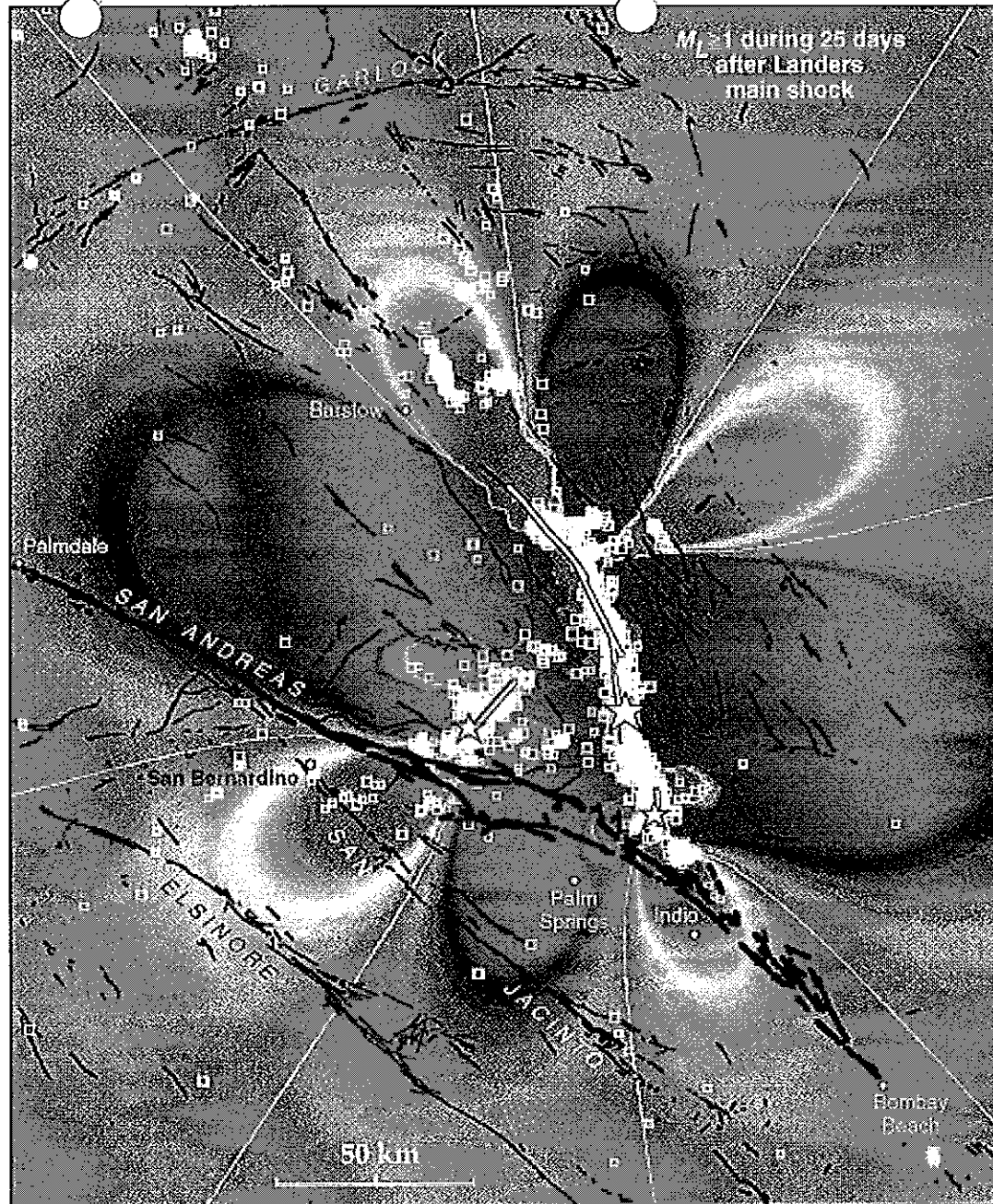
**Tensiones regionales
desviadas por fallas
activas**

FUENTES DE ESFUERZO TECTÓNICO (Park, 1988)

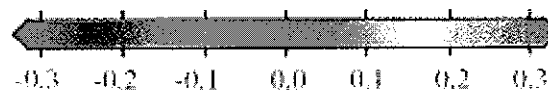
Mecanismo	Renovable- no renovable	Compresión- Extensión	Nivel de esfuerzo	Sujeto a amplificación	Significativo en Tectónica
Tracción de subducción	Renovable	Extensión	0-50 MPa (variable)	Si	Si
Succión de fosa	Renovable	Extensión	0-30 MPa (variable)	Si	Si
Empuje de dorsal	Renovable	Compresión	20-30 MPa	Si	Si
Arrastre de manto	Renovable	Ambos	1-50 MPa	Si	Posiblemente no
Carga de la litosfera	Renovable	Ambos (+ extensión)	35 MPa (2 km elev.)	No	Localmente quizás
Carga de litosfera (Compensada)	Renovable	Ambos (+ extensión)	50 MPa (2 km elev.)	Si	Localmente si
Flexión litosférica	No-renovable	Ambos	Hasta 500 MPa	No	No (?)
Flexión por subducción	No-renovable	Ambos	Hasta 1000 MPa	No	No (?)
Efectos térmicos	No-renovable	Ambos	Hasta 500 MPa	No	No (?)
Efecto de membrana	No-renovable	Ambos	Hasta 100 MPa	No	No (?)

CAMBIO DEL CAMPO DE ESFUERZOS POR TERREMOTOS

- Los terremotos disipan esfuerzo en unas zonas y cargan otras: cambian el esfuerzo de Coulomb
- El cambio del esfuerzo de Coulomb promueve la aparición de nuevos terremotos (triggering) en las zonas cargadas
- En las zonas descargadas se retrasa el final del ciclo sísmico
- En España se han observado con frecuencia terremotos dobles por triggering



Coulomb Stress Change caused by the Landers, Big Bear, and Joshua Tree Earthquakes (bars)



TRIGGERING

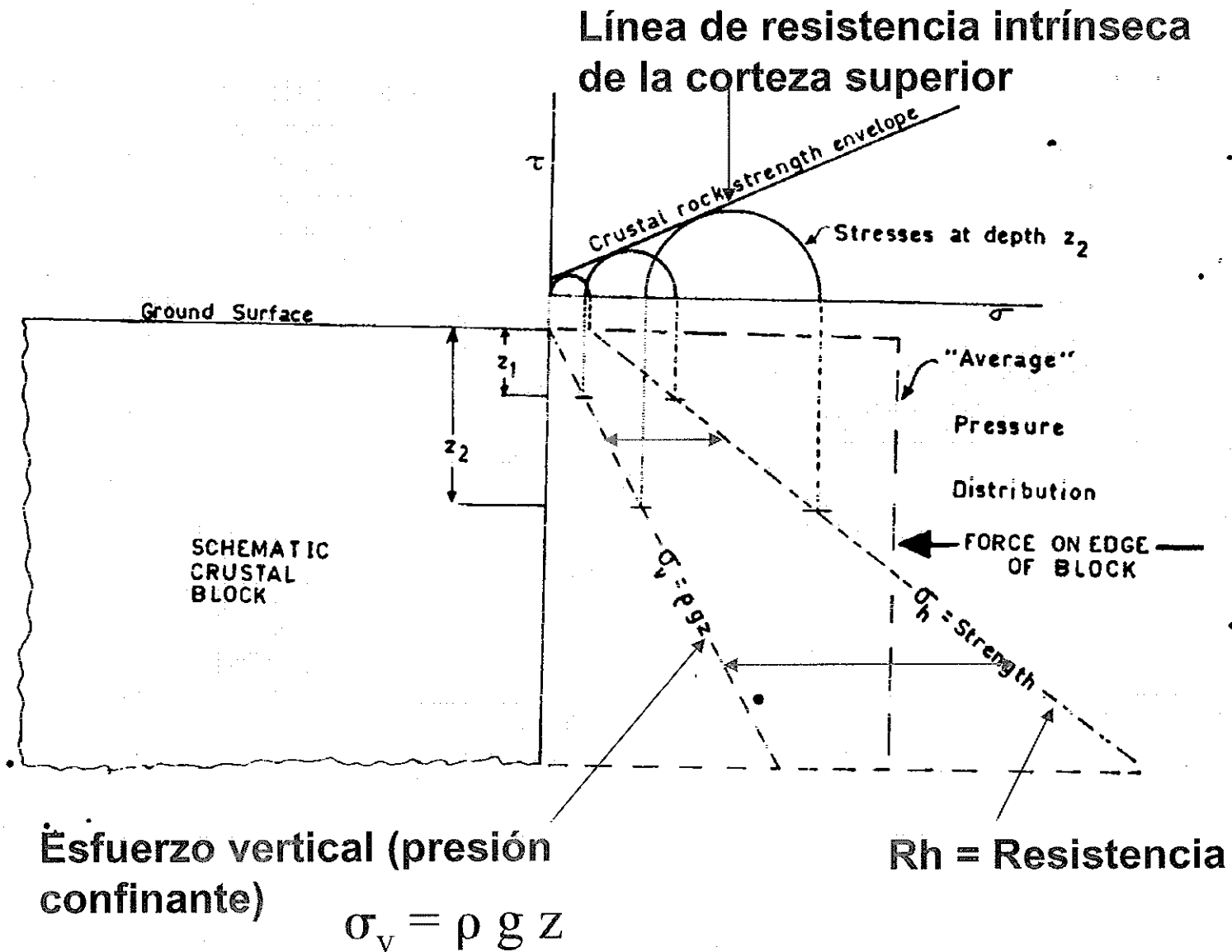
El cambio de esfuerzos en la corteza producido por un evento sísmico hace variar la probabilidad de ocurrencia de futuros terremotos

El triggering en el terremoto de Landers fue el primero que se observó

EL VALOR DEL ESFUERZO TECTÓNICO

- La resistencia de la corteza limita el valor del esfuerzo tectónico
- El cálculo numérico restringe el rango de valores
- Las medidas instrumentales proporcionan datos hasta profundidades moderadas

Resistencia de la corteza superior



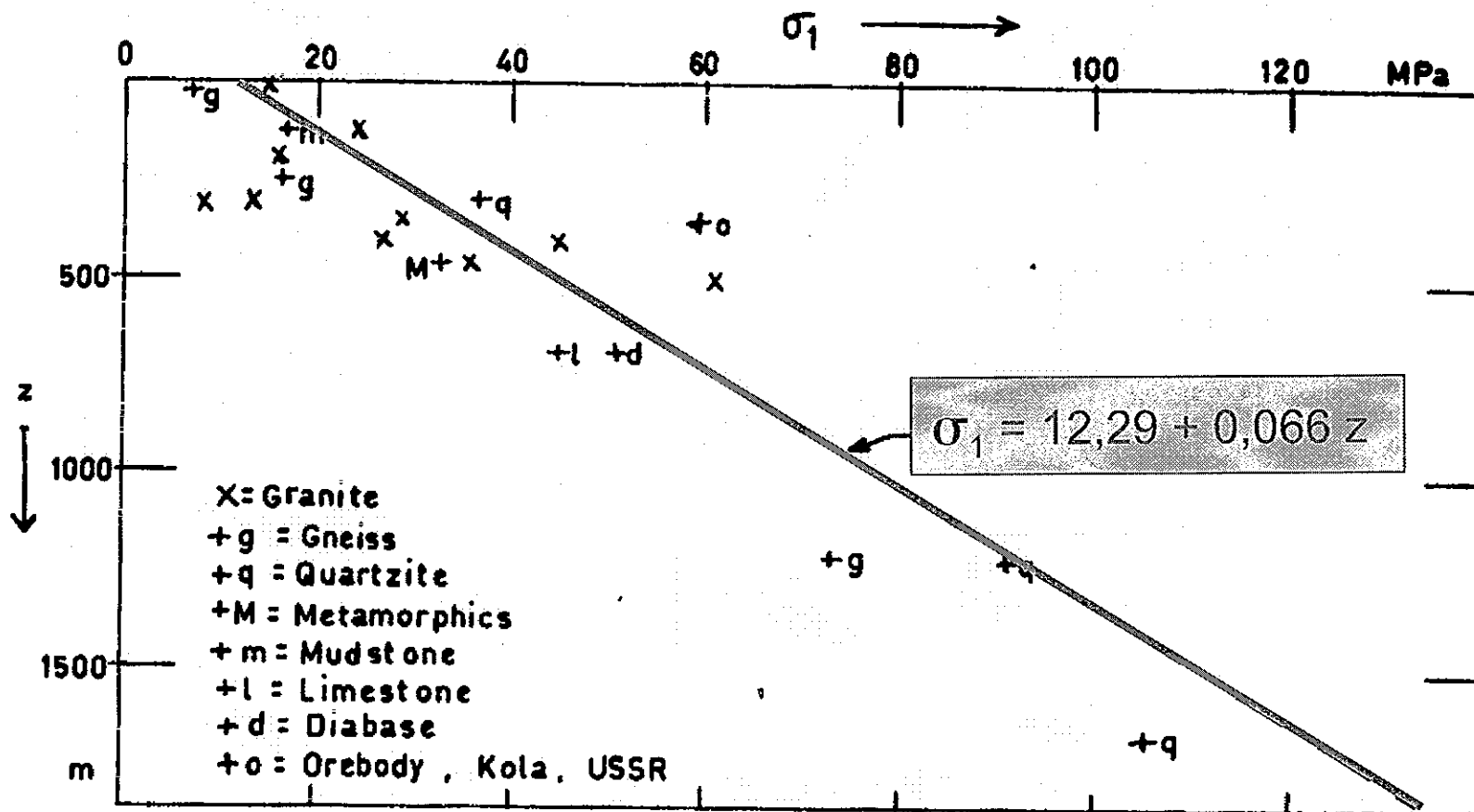
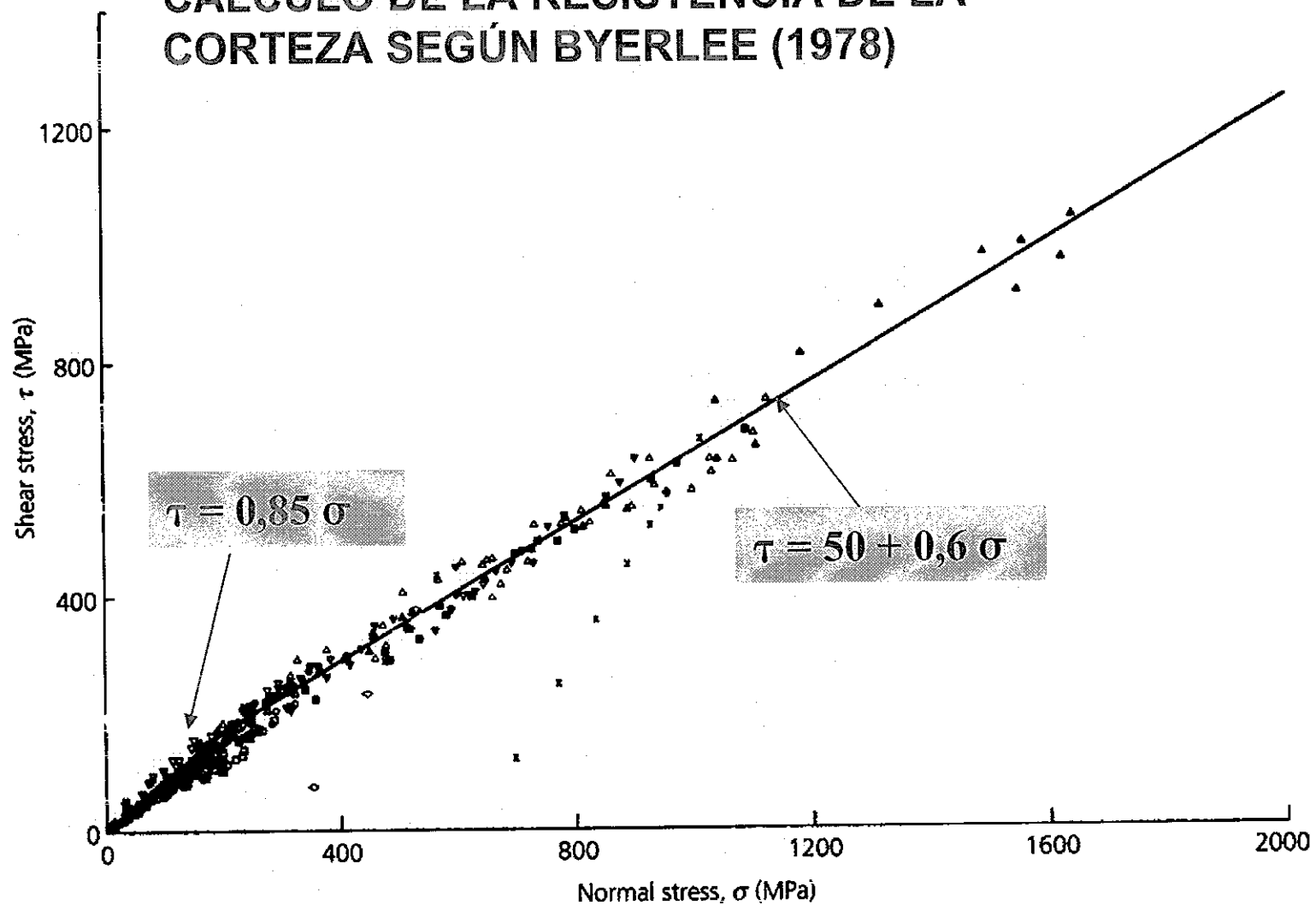


Figure 1

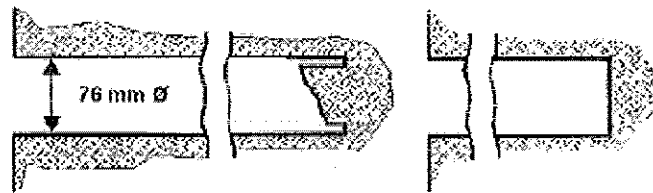
Resistencia de la corteza a partir de medidas de tensiones "in situ" en minas (BAMFORD, 1976)

CALCULO DE LA RESISTENCIA DE LA CORTEZA SEGÚN BYERLEE (1978)

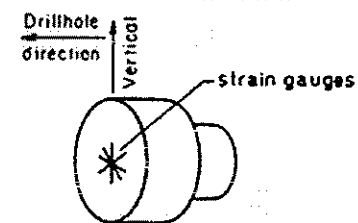
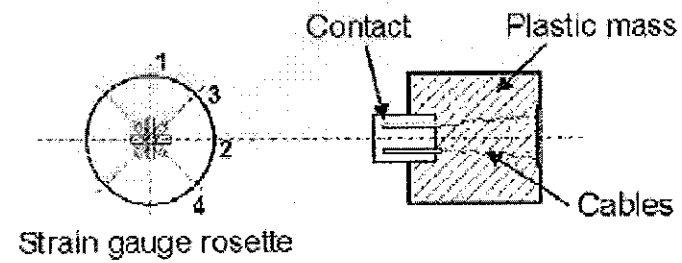
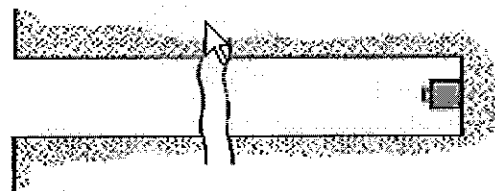
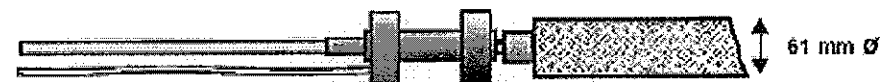
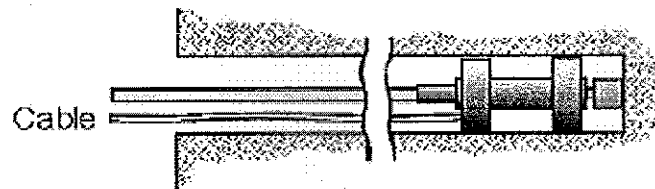
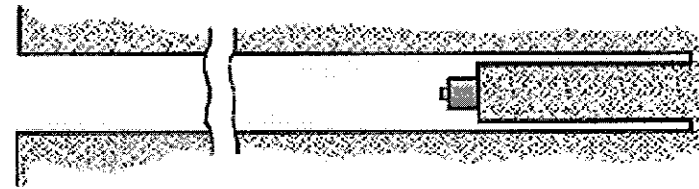


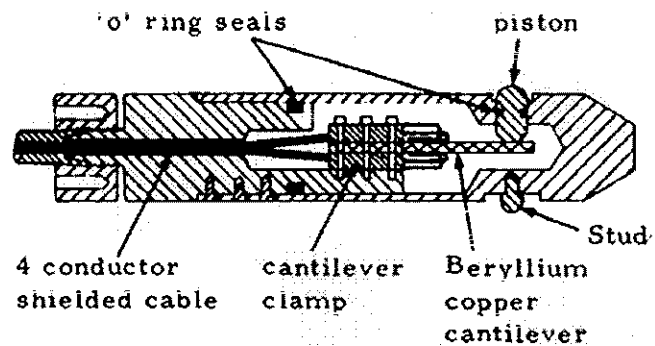
LOS MÉTODOS DE MEDIDA

- Medidas instrumentales in situ
 - Overcoring
 - Fractura hidráulica
 - Doorstopper
 - Flat jack (Gato plano)
- Mecanismos focales de los terremotos (geofísico-geológicos)
 - Los ejes PT
 - Los métodos de análisis
- Métodos geológicos
 - Estructuras de presión-disolución
 - Análisis poblacional de fallas

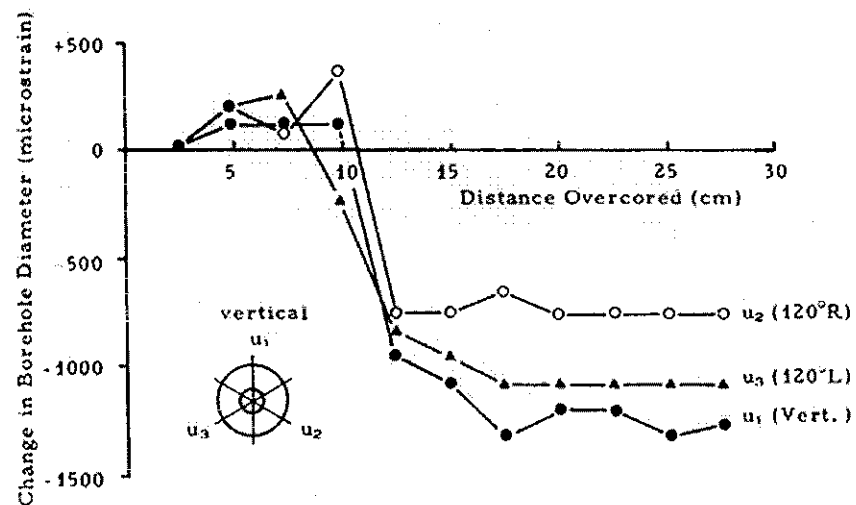


Doorstopper

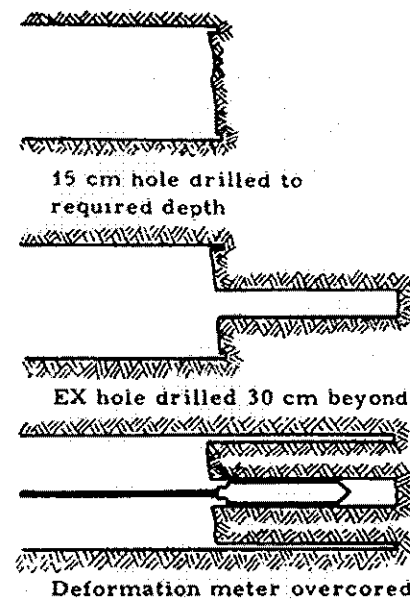




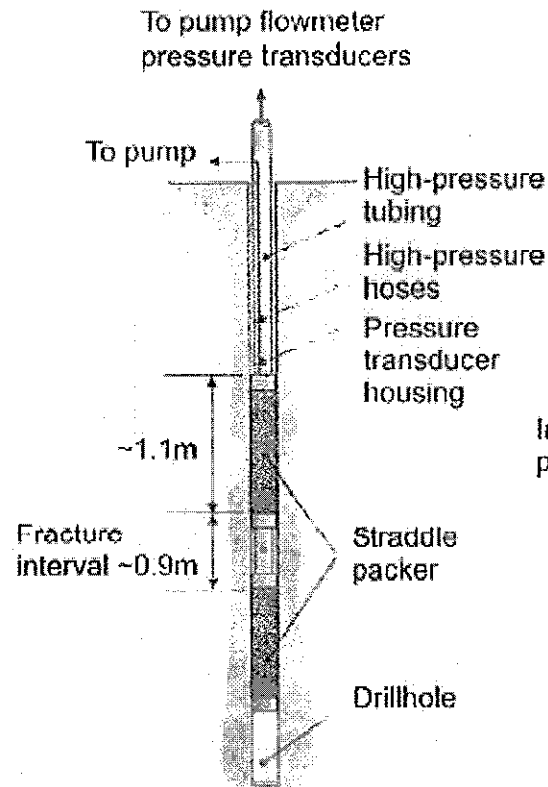
Sonda de medida USBM



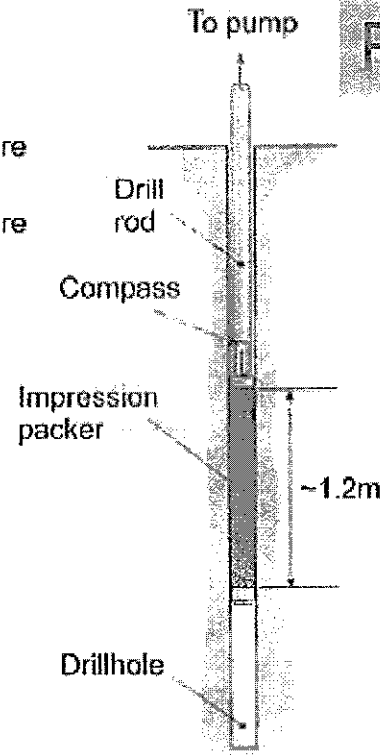
Overcoring



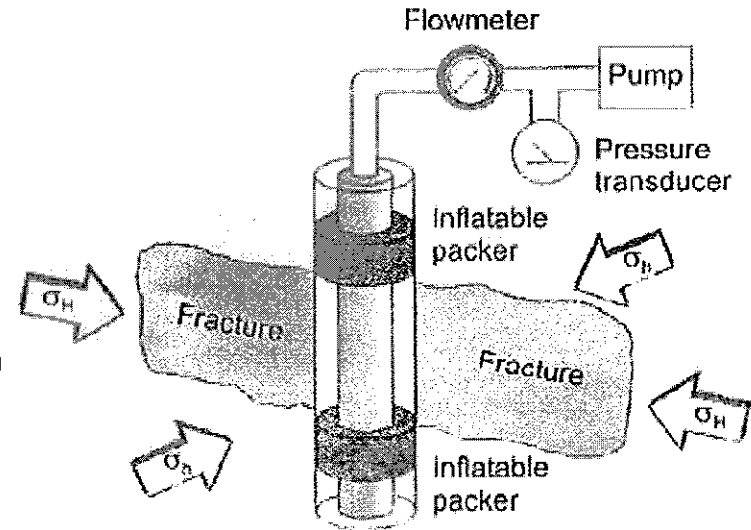
Fracturación hidráulica



Straddle packer arrangement

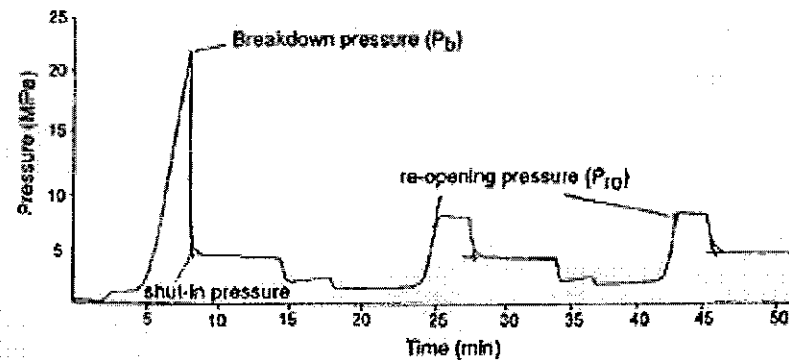


Impression packer



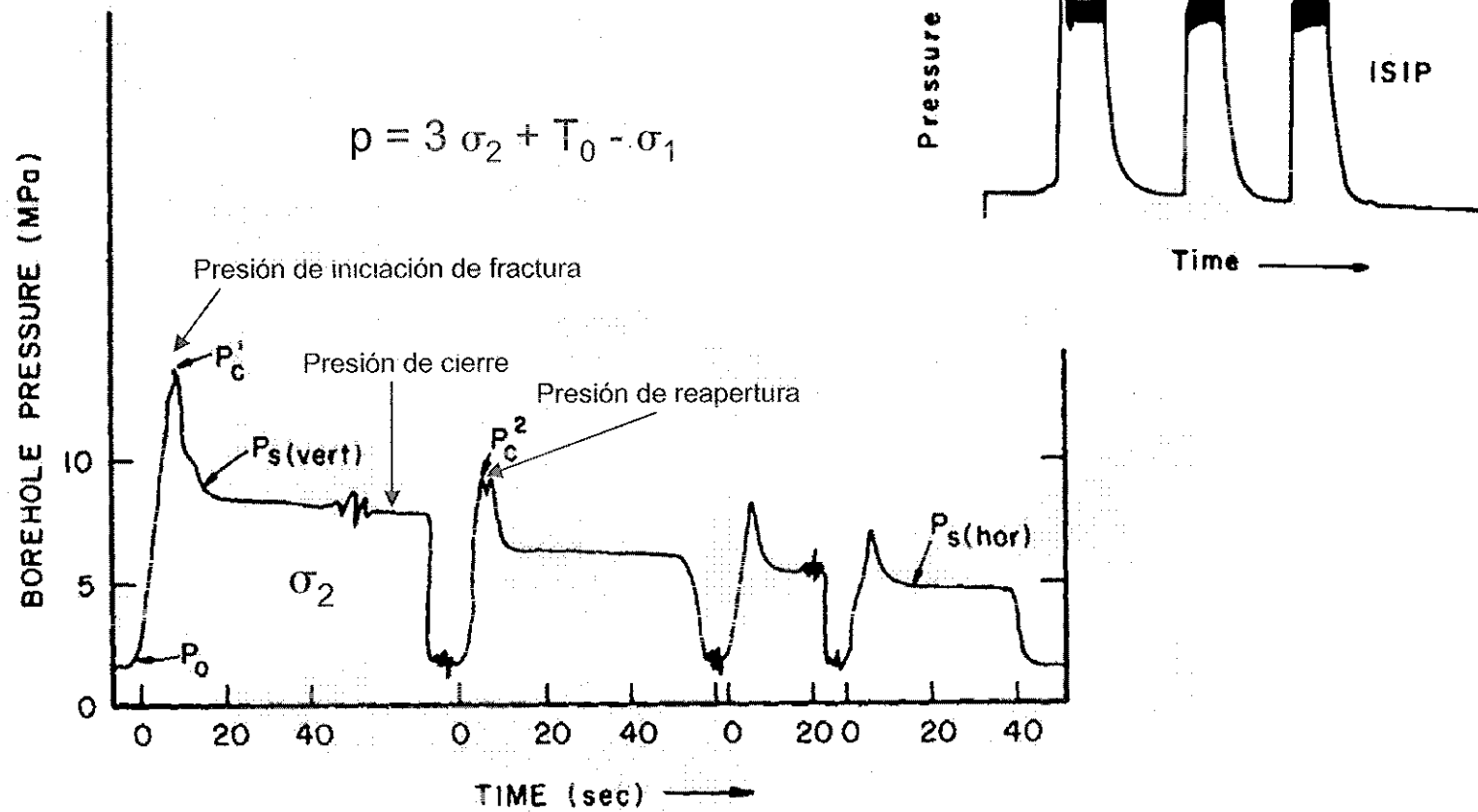
Fracture initiation

Hydraulic fracturing principles



Time / fluid pressure recording

Registro presión - tiempo

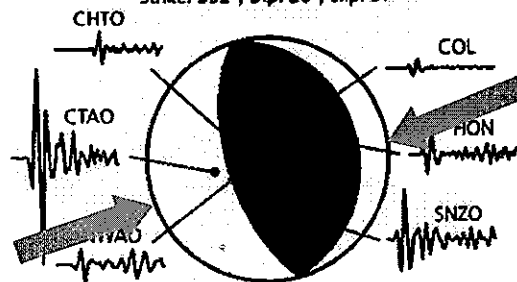


σ_1 y σ_2 en la horizontal

UTILIZACIÓN DE MECANISMOS FOCALES DE TERREMOTOS

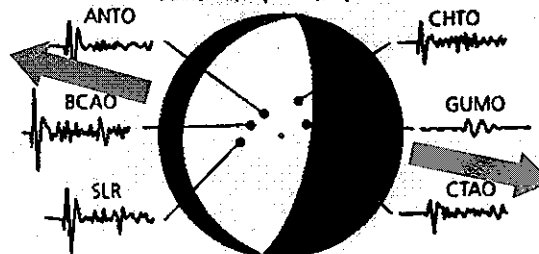
- Describe el movimiento en el foco del terremoto
- Si el terremoto lo produce una falla describe el funcionamiento de la falla (tipo de falla, orientación del deslizamiento)
- En dos cuadrantes las ondas sísmicas P tienen una primera llegada compresiva (+) y en los otros dos es distensiva (-)
- Se representa en una proyección estereográfica (semiesfera inferior) con dos cuadrantes en negro (+) y dos en blanco (-)
- Hay dos métodos:
 - A partir de las polaridades de primeras llegadas de ondas P
 - Cálculo automático del tensor por ajuste del sismograma

Thrust faulting, Vanuatu Islands, July 3, 1985
 Location: 17.2°S, 167.8°E. Depth: 30 km
 Strike: 352°, Dip: 26°, Slip: 97°



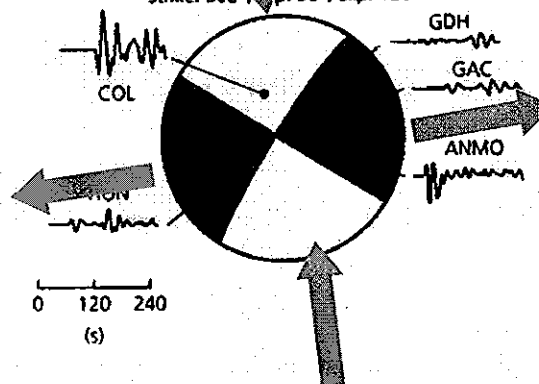
Falla inversa

Normal faulting, mid-Indian rise, May 16, 1985
 Location: 29.1°S, 77.7°E. Depth: 10 km
 Strike: 8°, Dip: 70°, Slip: 270°

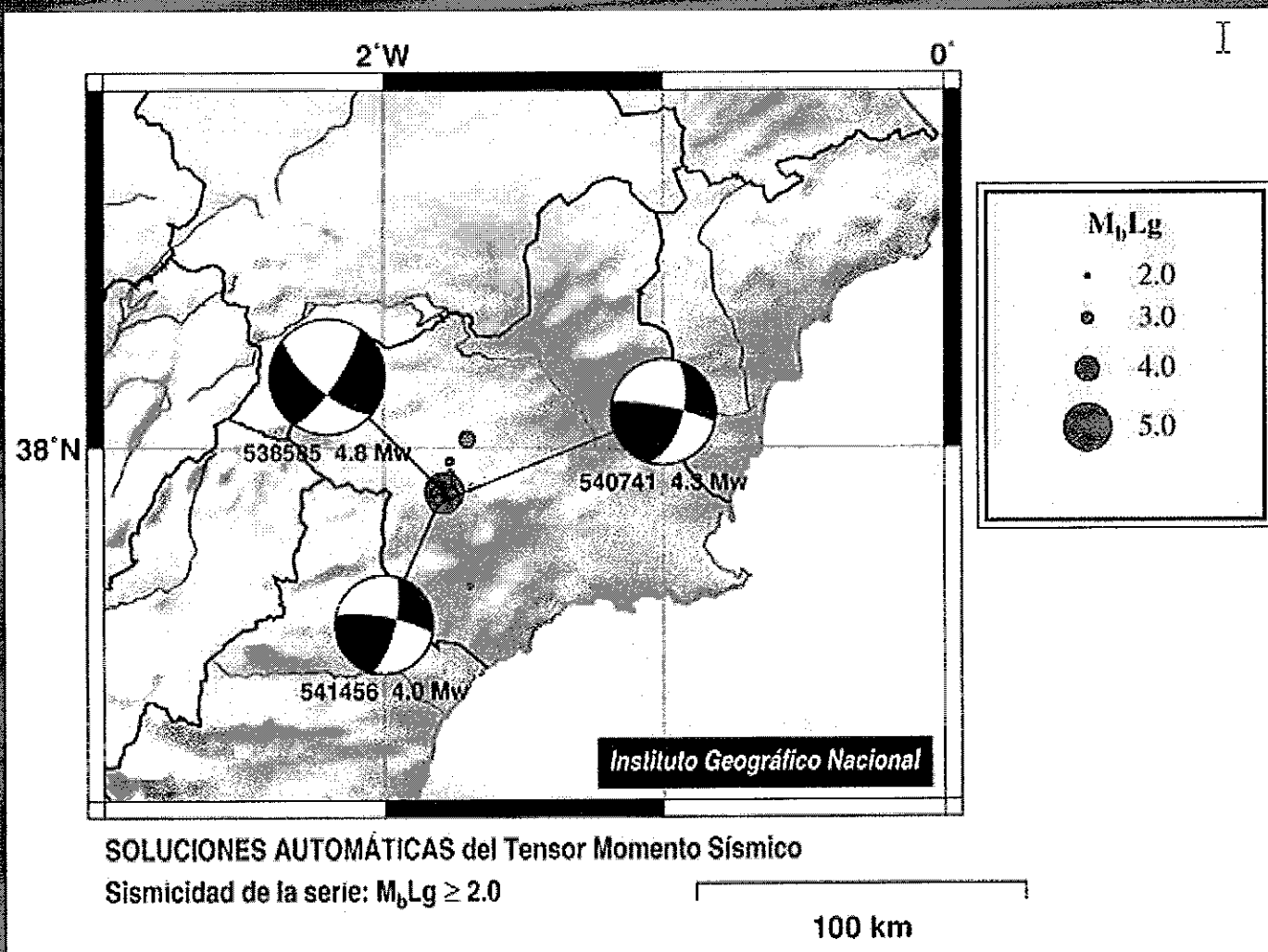


Falla normal

Strike-slip faulting, west of Oregon, March 13, 1985
 Location: 43.5°N, 127.6°W. Depth: 10 km
 Strike: 302°, Dip: 90°, Slip: 186°



Falla en dirección,
 transcurrente o de
 desgarre



MÉTODOS GEOLÓGICOS

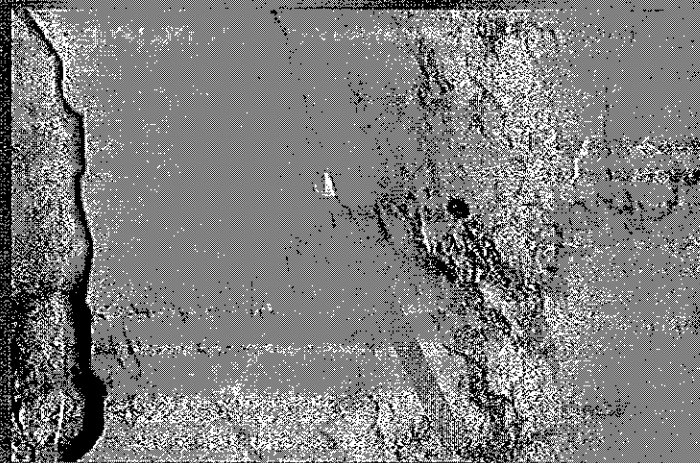
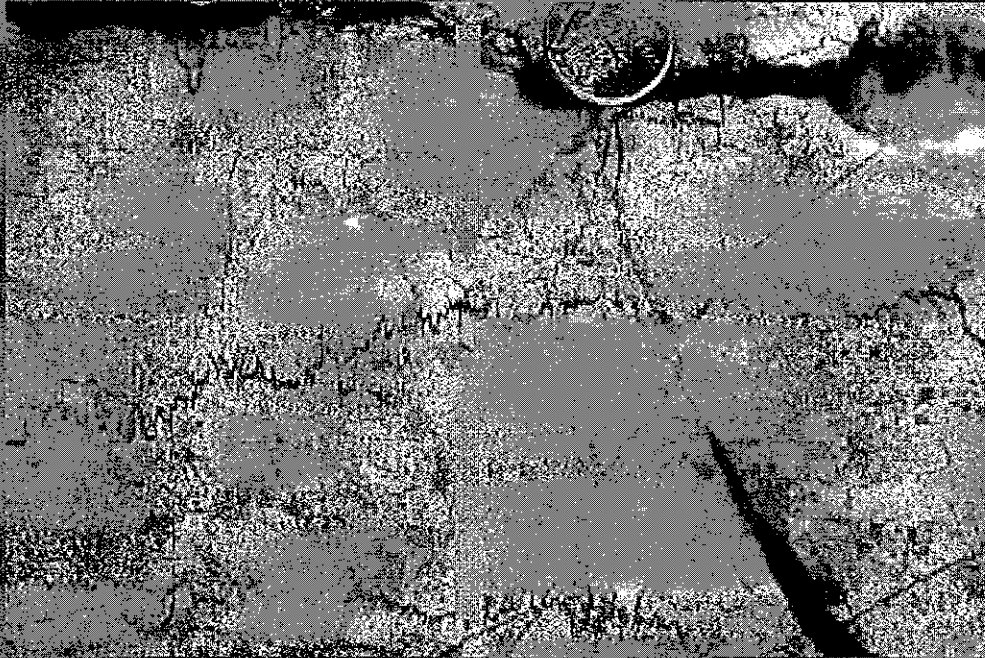
- **ESTRUCTURAS UTILIZADAS**

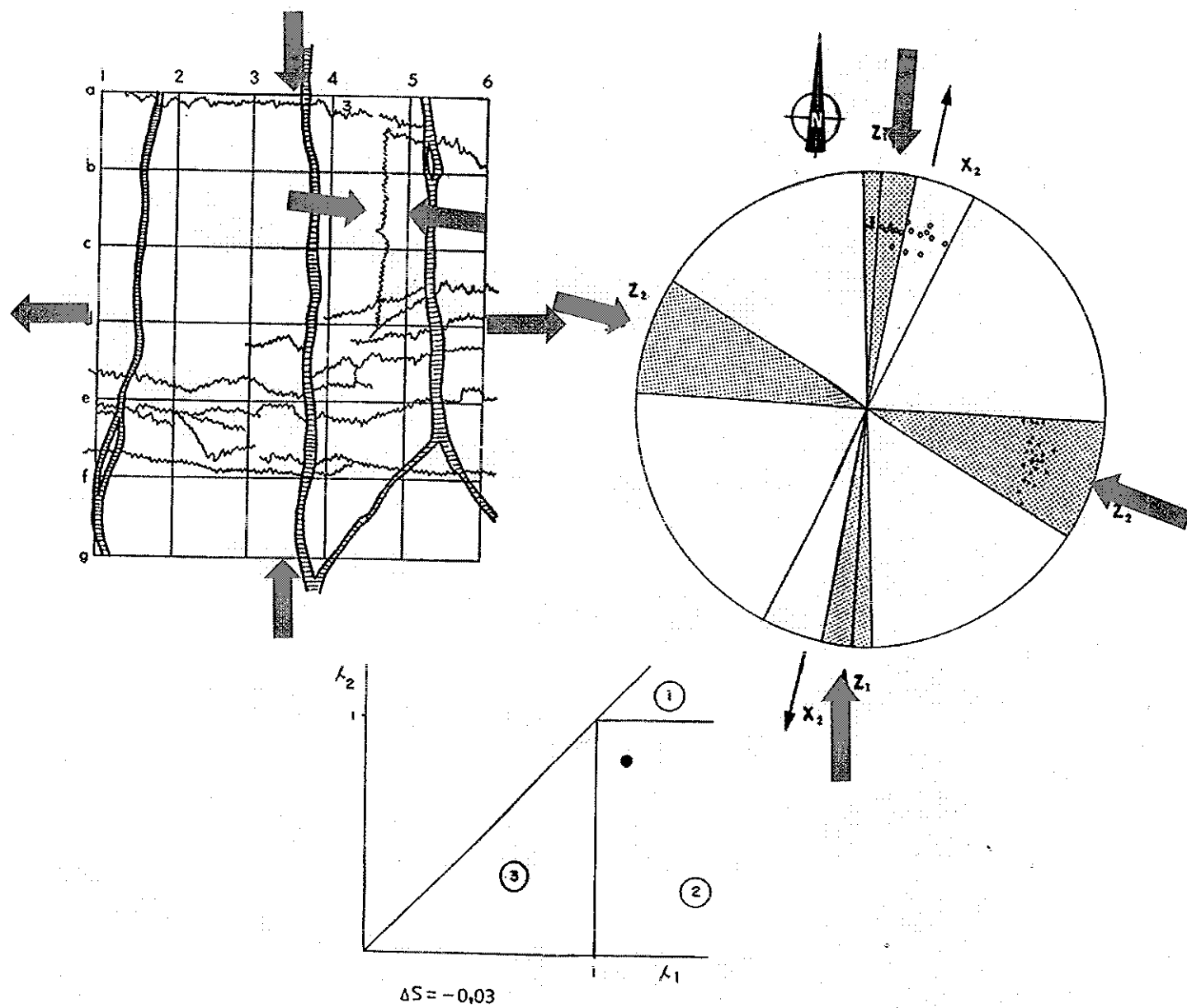
- Fallas (Análisis poblacional)
- Planos nodales de esfera focal
- Juntas estilolíticas

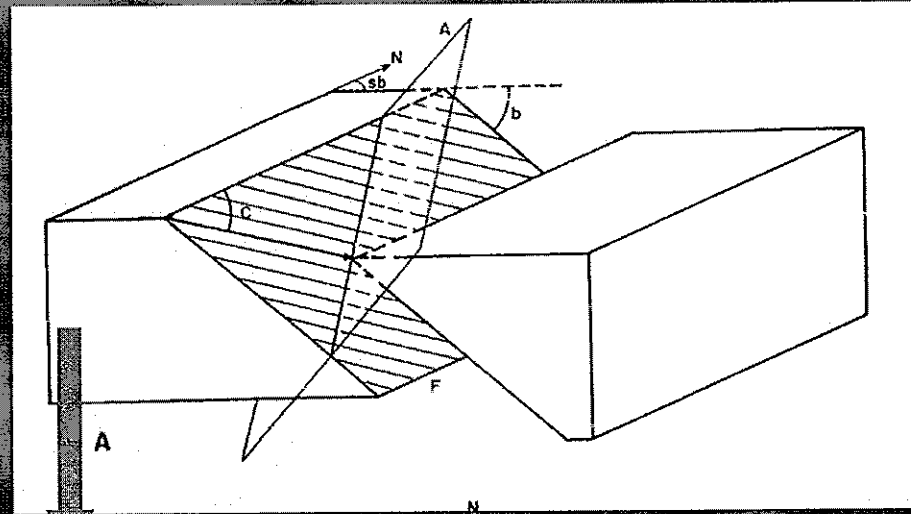
- **MÉTODOS**

- Métodos basados en la Ecuación de Bott
- Métodos del deslizamiento de Reches
- Método de los diedros rectos

JUNTAS ESTILOLÍTICAS







- 1) Dirección y buzamiento de la falla
- 2) Cabeceo de la estría
- 3) Sentido de deslizamiento

ECUACIÓN DE BOTT

$$\operatorname{tg} \theta = n/lm (m^2 - (1 - n^2) R)$$

θ = cabeceo de la estría

l, m, n = cosenos directores del plano de falla

R = Índice de forma del elipsoide de esfuerzos

$$(\sigma_z - \sigma_x) / (\sigma_y - \sigma_x)$$

σ_x, σ_y esfuerzos horizontales

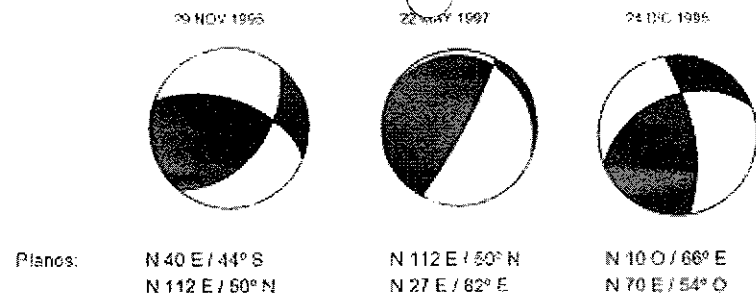
σ_z = esfuerzo vertical

TIPOS DE MÉTODOS

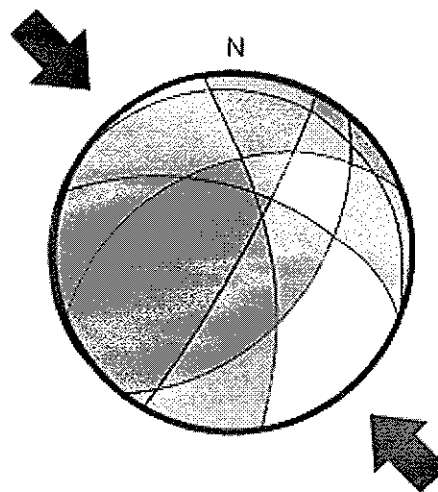
- Diedros rectos
- Métodos de inversión de esfuerzos (ecuación de Bott)
- Métodos del deslizamiento

MÉTODOS DE INVERSIÓN DE ESFUERZOS

- a) Se calculan múltiples tensores teóricos
- b) Se seleccionan los que mejor ajustan a las fallas y estrías observadas
- c) El ajuste se hace minimizando ángulo estría real-estría teórica
 - 1) Método del mejor ajuste
 - Con dirección de estría
 - Con sentido del deslizamiento
 - 2) Método del Grid search

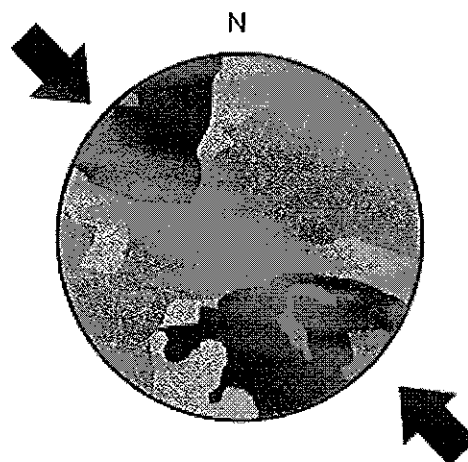


□ Compresión
 ■ Distensión



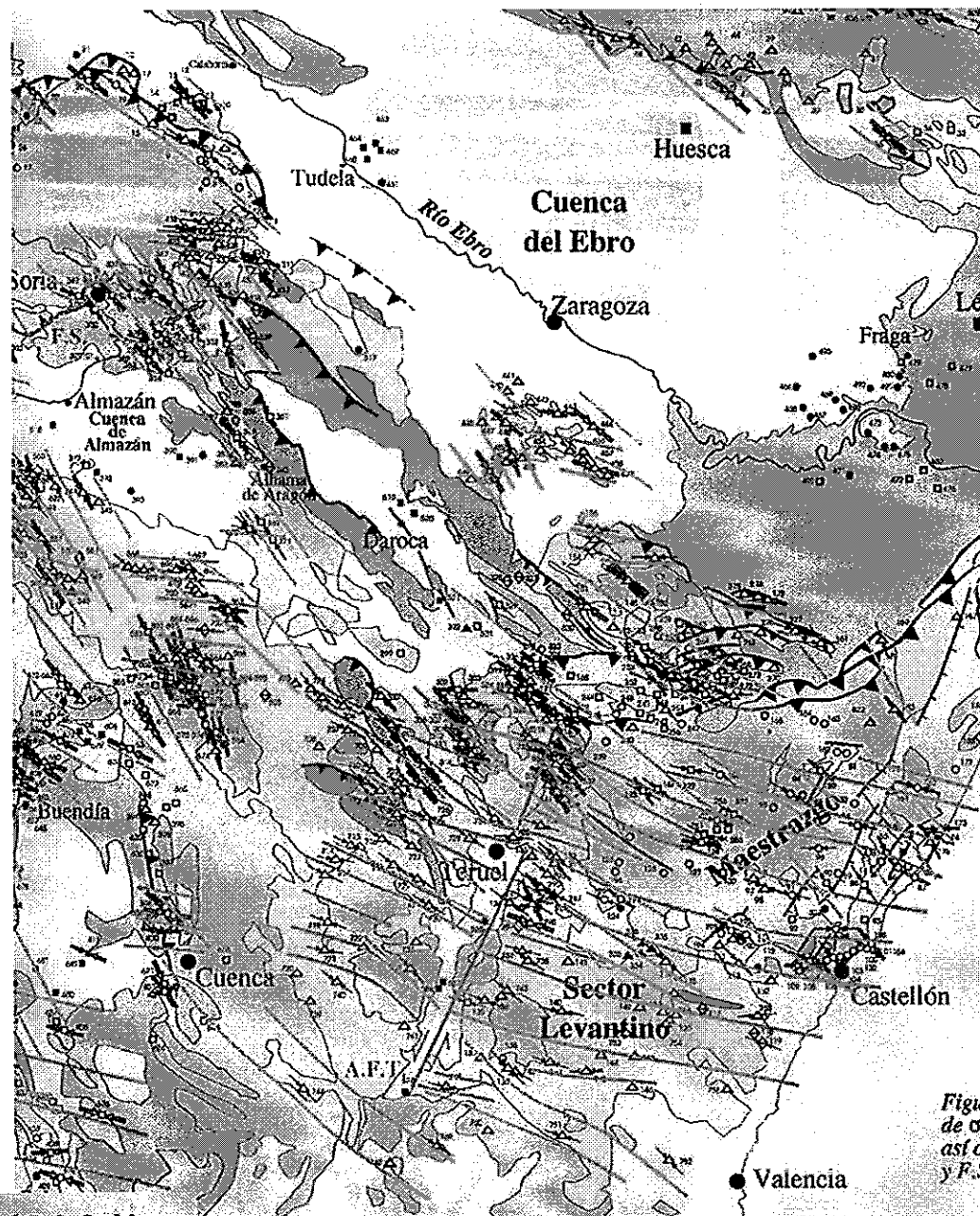
100%
 +80%
 +60%
 +40%
 +20%
 0%
 -20%
 -40%
 -60%
 -80%
 -100%

Compresión
 Extensión



MÉTODO DE LOS DIEDROS RECTOS

- Se trata la falla como un mecanismo focal
- Se superponen los cuadrantes de todas las fallas
- Se obtienen los ejes P y T comunes a todas las fallas



*Figur
de 61
ast co
y P.S.*

Liesa (2001)

MAPA DE ESFUERZOS DEL MUNDO

- Iniciado por M.L. Zoback, continuado por Heidelberg Academy of Sciences and Humanities (Karlsruhe University)
- Mapa y base de datos de esfuerzos tectónicos actuales de la corteza terrestre en todo el mundo
- Utilizado por instituciones en las áreas de:
 - Modelización de cuencas sedimentarias (petróleo)
 - Modelización tectónica
 - Gestión de campos de petrolíferos
 - Estabilidad en minas, túneles y sondeos
 - Tendencia de movimientos en fallas activas
 - Evaluación del riesgo sísmico

MAPA DE ESFUERZOS DEL MUNDO

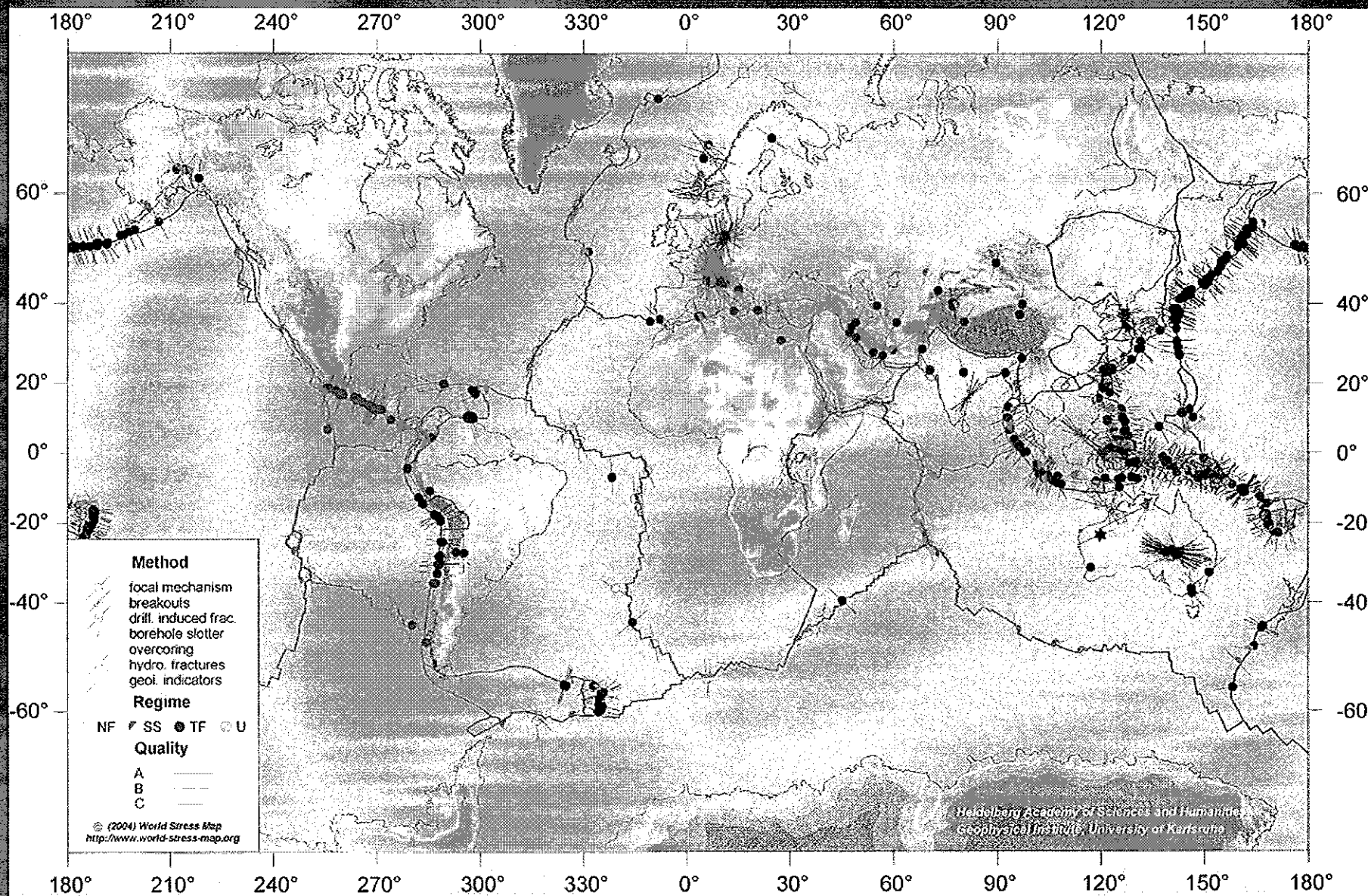
- Base de datos global de esfuerzo tectónico actual
 - Ranking de calidad según estándares internacionales
 - Asignación de régimen tectónico estandarizado
- Tipos de fuentes de datos
 - Mecanismos focales de terremotos
 - Estallido de roca y fracturas inducidas en sondeos
 - Medidas in situ: overcoring, fracturación hidráulica, slotter en sondeo)
 - Datos geológicos recientes (análisis poblacional de fallas, análisis de alineaciones de volcanes)

RANKING DE CALIDAD

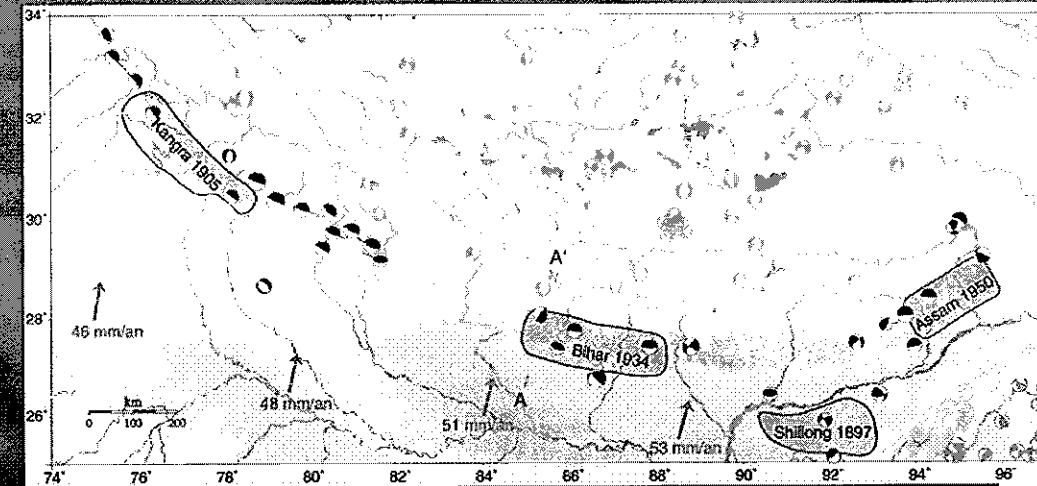
- Mecanismo focal
 - A: Media de ejes P o inversión de cuatro o más soluciones simples en proximidad geográfica (uno al menos $M \geq 4.0$, otro $M \geq 3.0$)
 - B: Bien acotada solución simple o media de dos ($M \geq 4.5$), o media de dos soluciones ($M \geq 3.5$)
 - C: Solución de evento simple mediante primer movimiento ($M \geq 2.5$) o media de varios compuestos ($M > 2.0$)
 - D: Solución compuesta, único evento pobremente restringido o solución simple para $M < 2.5$
 - E: Grandes eventos históricos sin cálculo de mecanismo focal, evento con ejes P, T, B inclinados de 25 a 40°, evento con P y T inclinados 40-50°

RANKING DE CALIDAD

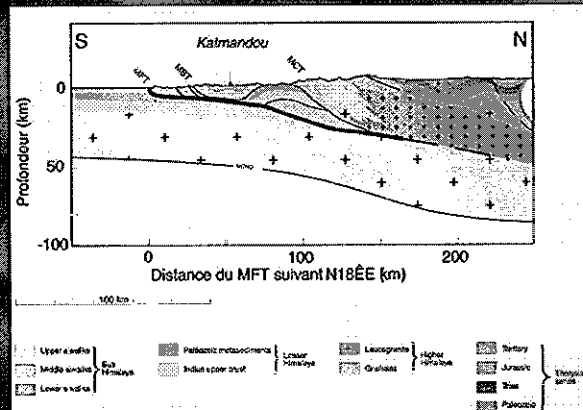
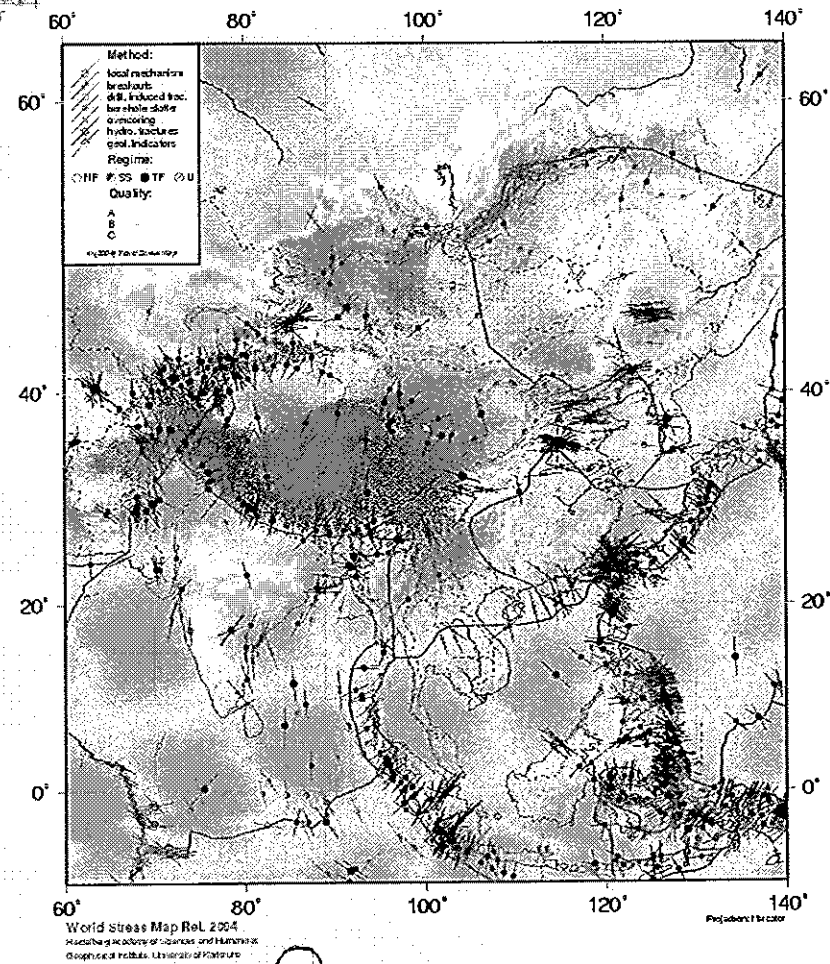
- Deslizamiento en falla
 - A: Inversión de datos de estría por ajuste de tensor de esfuerzo para fallas cuaternarias
 - B: Dirección deslizamiento sobre falla basada en múltiples observaciones, σ_1 a 30° de la falla
 - C: Orientación de la falla y sentido primario de deslizamiento conocidos, no vector deslizamiento
 - D: desplazamiento en testigos, popups en canteras, saltos en fallas postglaciares
 - E: No compilada



Mecanismos focales de falla inversa

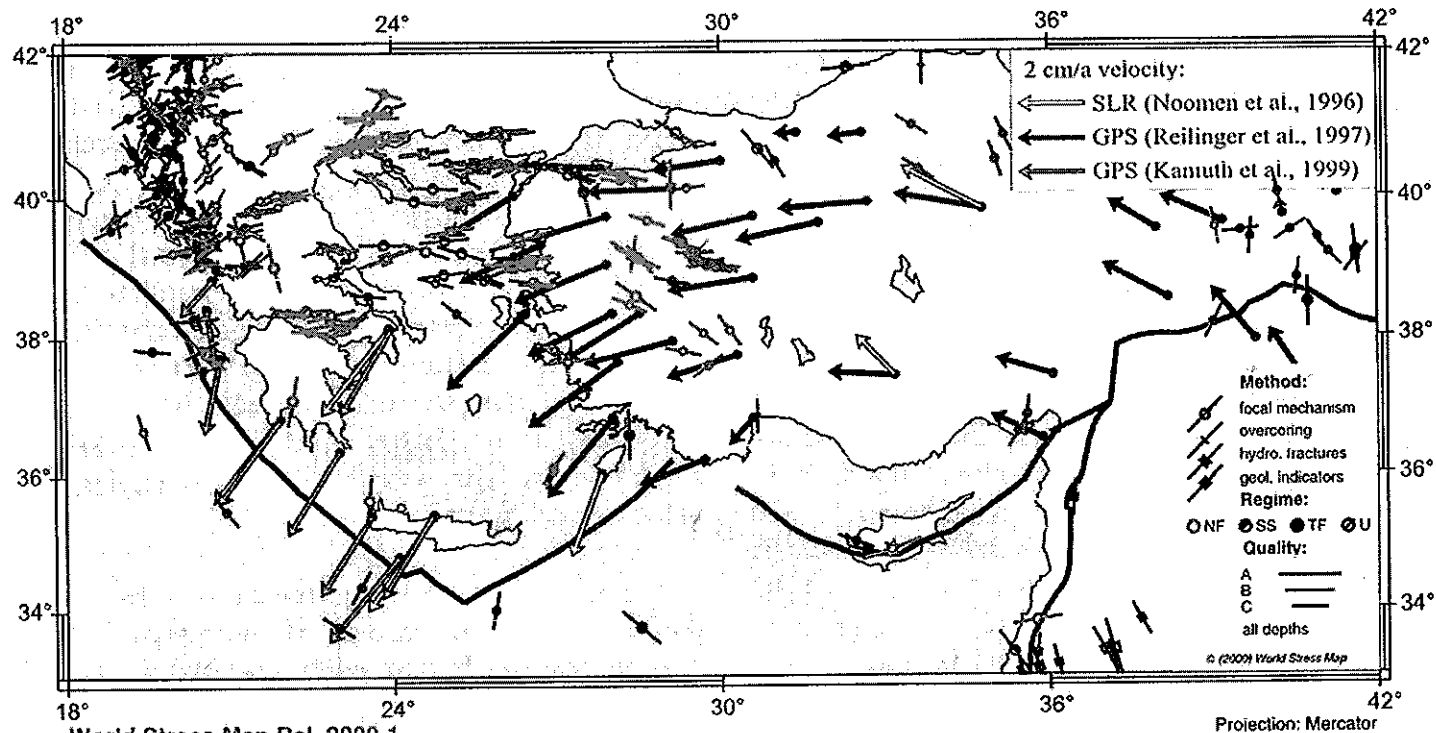
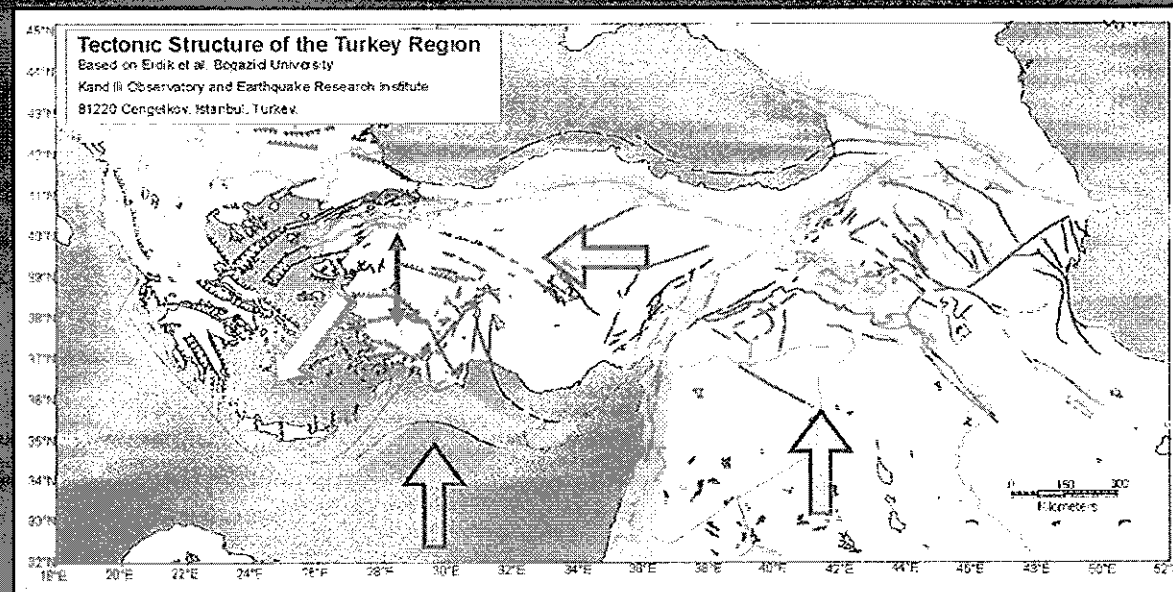


Mapa de esfuerzos tectónicos



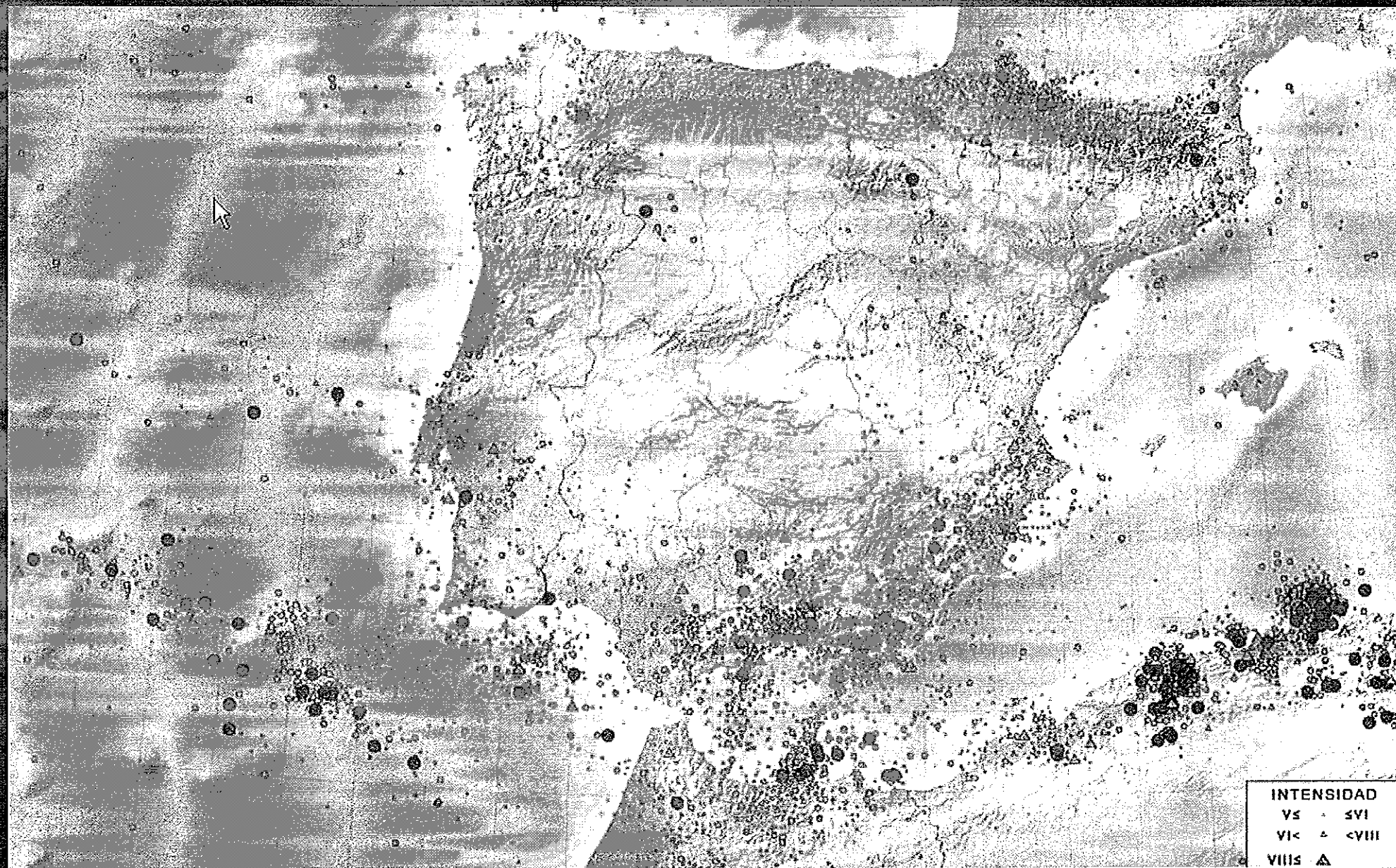
Estructura compresiva de láminas de cabalgamiento

ESFUERZO Y TECTÓNICA DE PLACAS EN TURQUÍA



TENSIONES TECTÓNICAS EN ESPAÑA

- Los paleoesfuerzos alpinos
 - Métodos geológicos
 - Campos de esfuerzos alpinos: Superposición
- Paleoesfuerzos recientes y actuales
 - La situación de Tectónica de Placas
 - Transmisión de esfuerzos
 - Medidas instrumentales: Pocas
 - Los mecanismos focales: El proyecto SIGMA
 - Mapa global de esfuerzos (WSM)
- Un ejemplo: El caso del túnel del Guadarrama

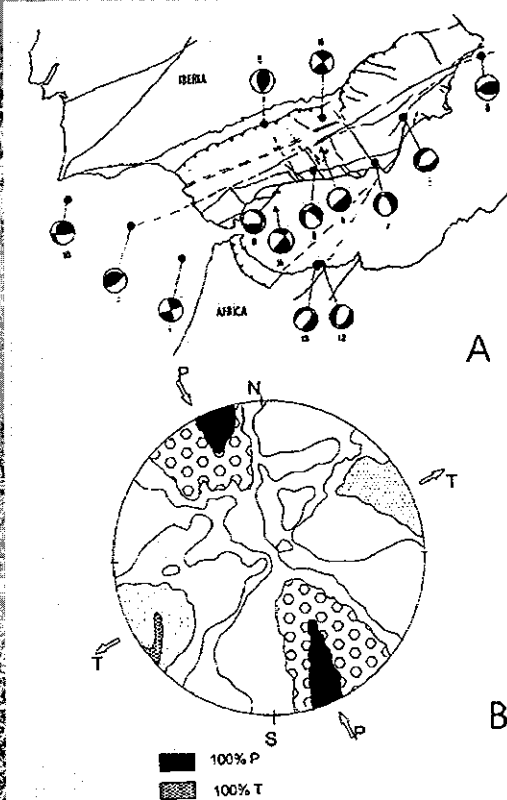
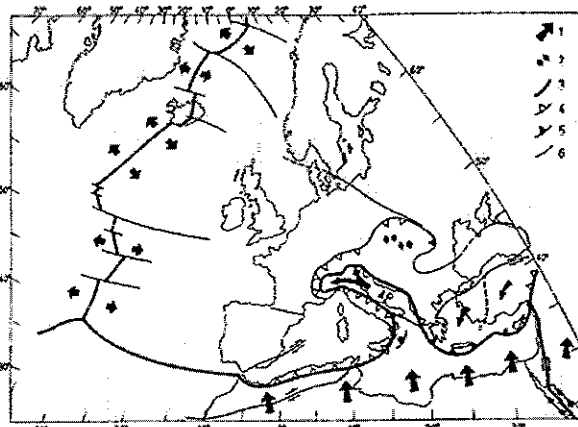


PLACA EUROASIÁTICA

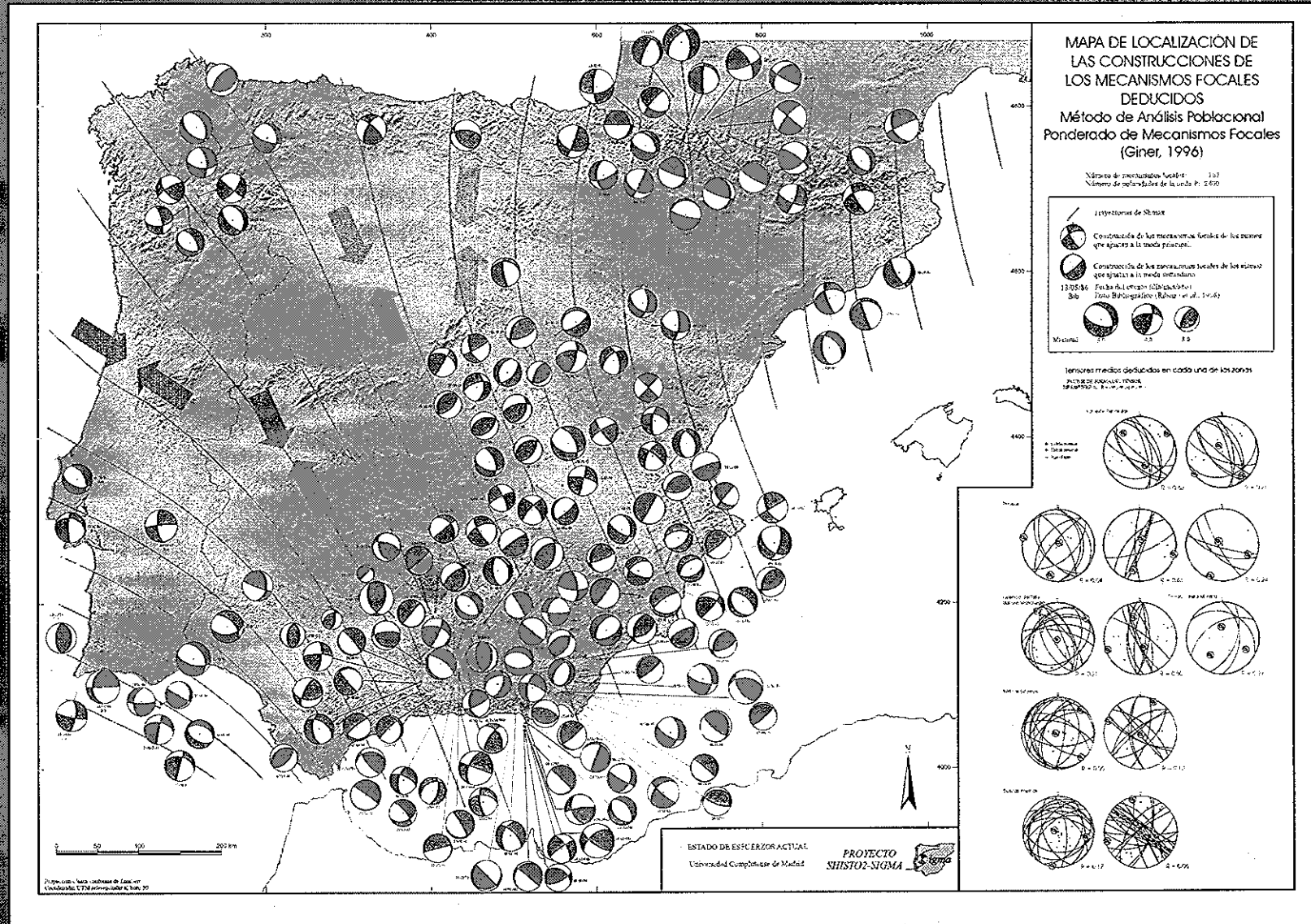
PLACA AFRICANA

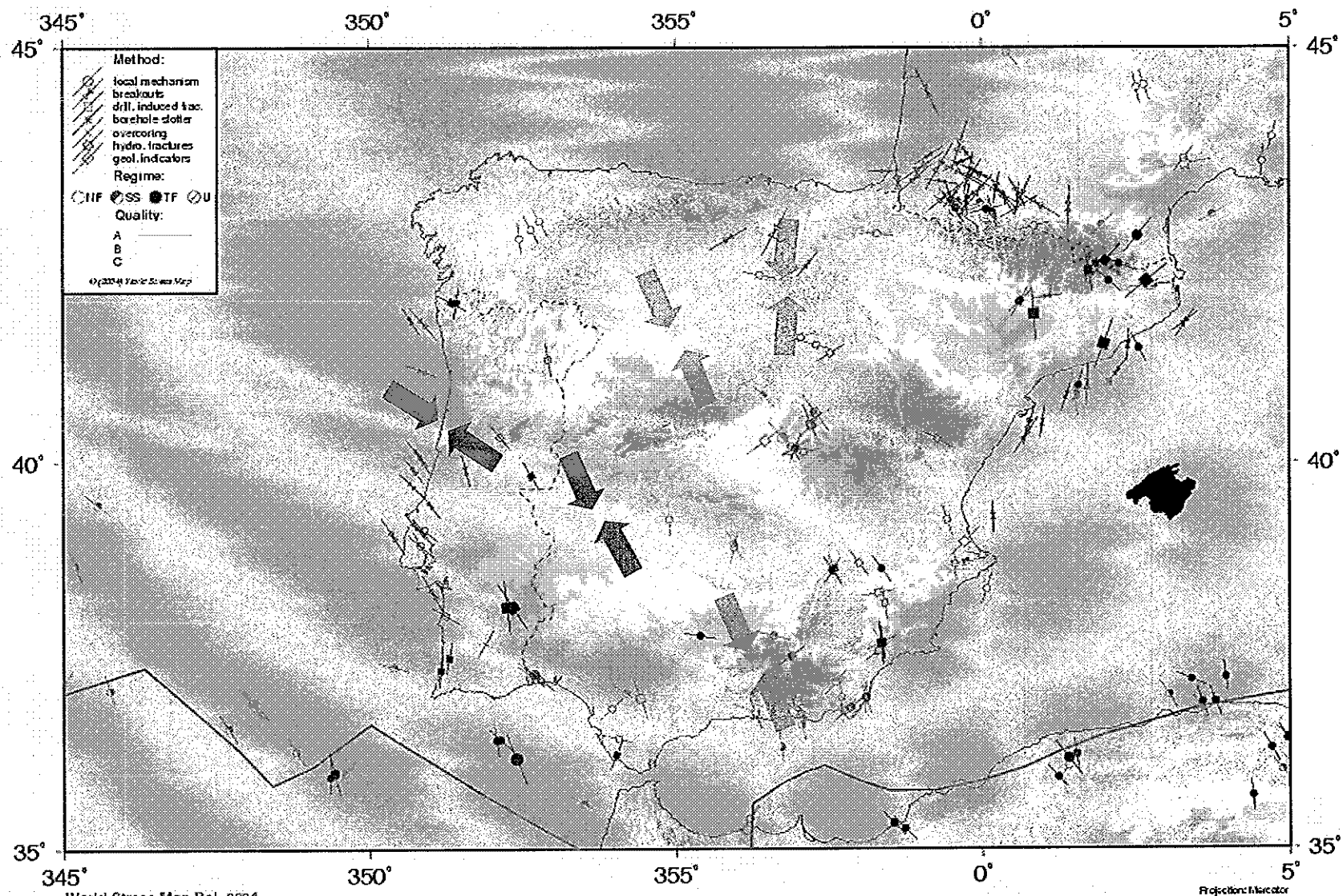
9 mm/año

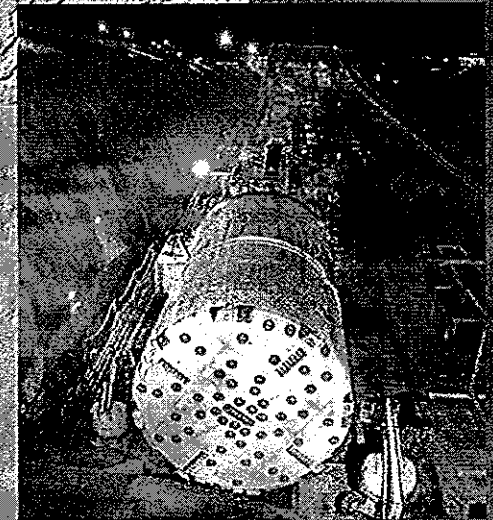
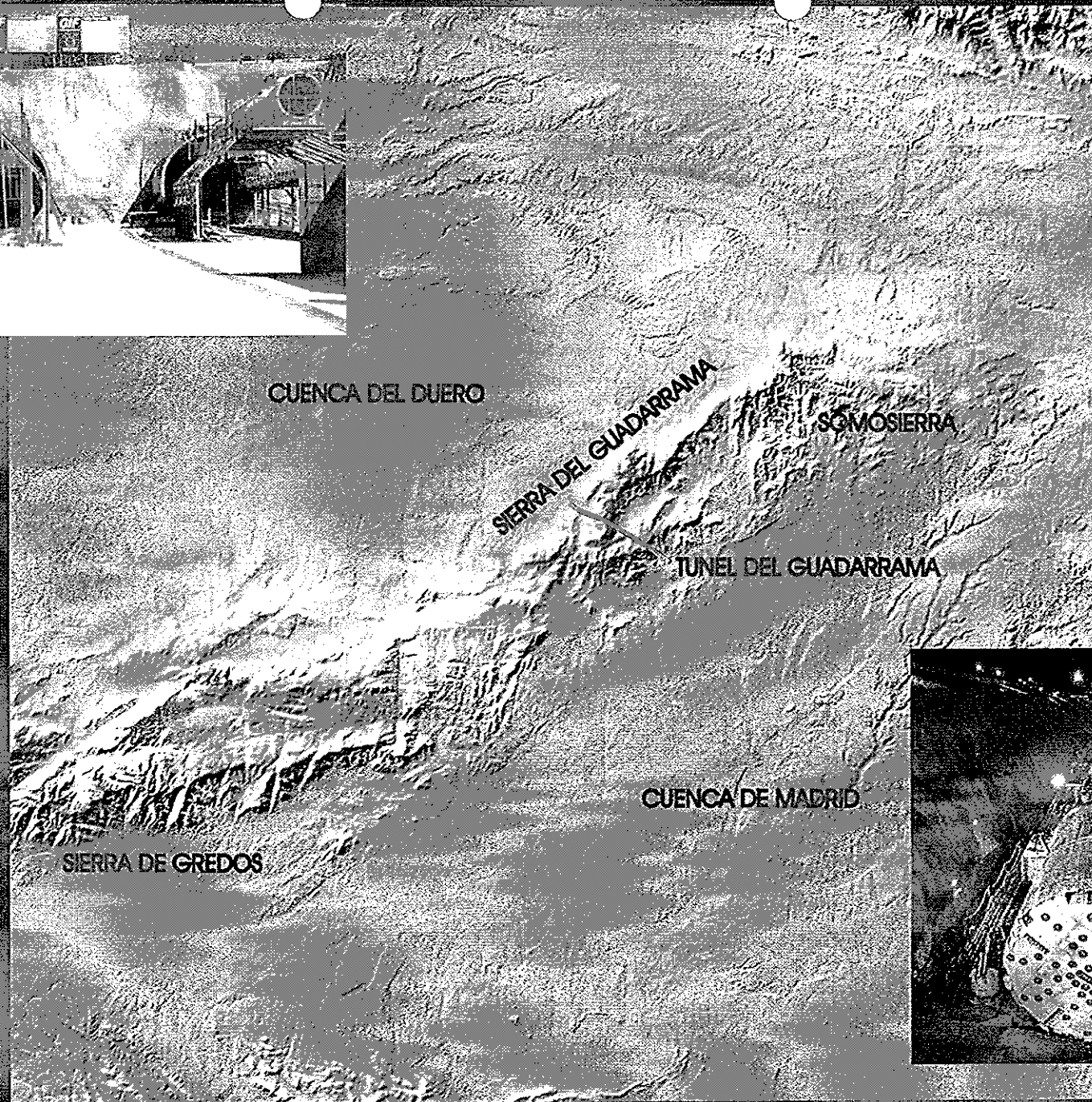
INTENSIDAD
VS - ≤VI
VI< - <VIII
VIII ≤ - Δ



CAMPOS DE ESFUERZOS REGIONALES (Proyecto SIGMA)



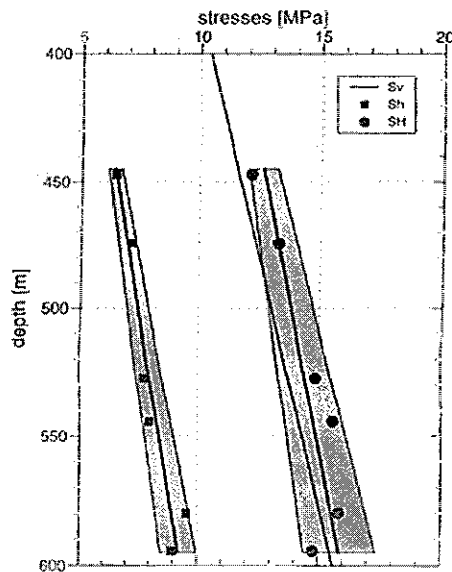
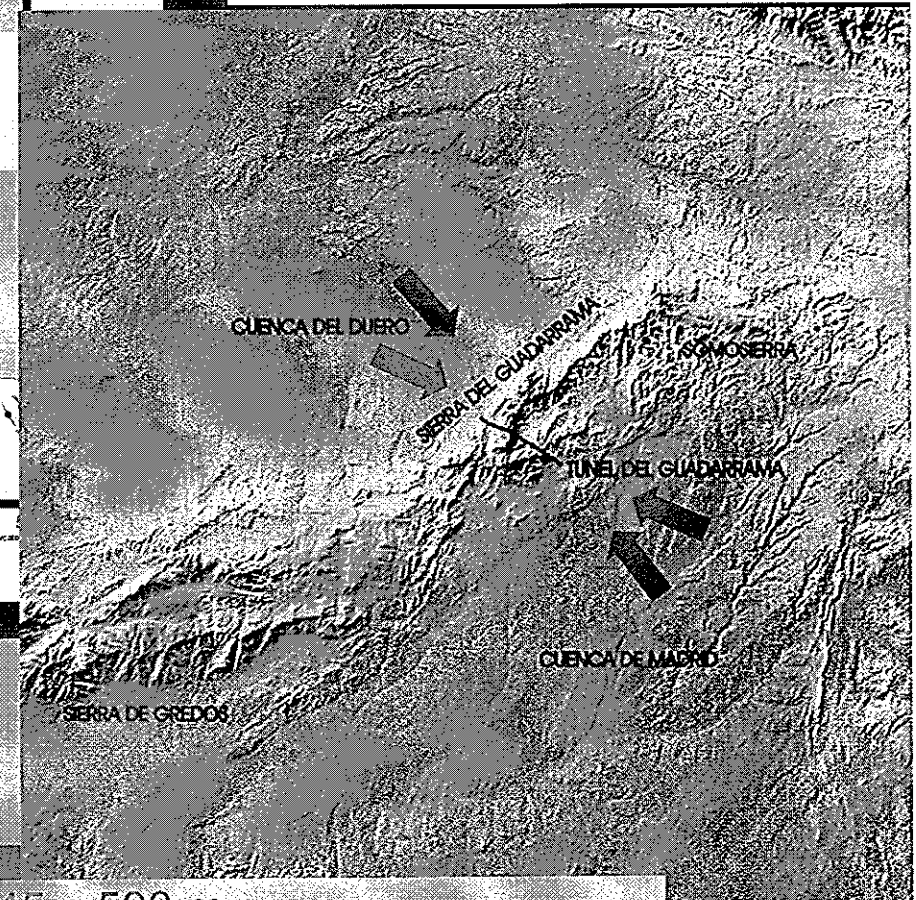
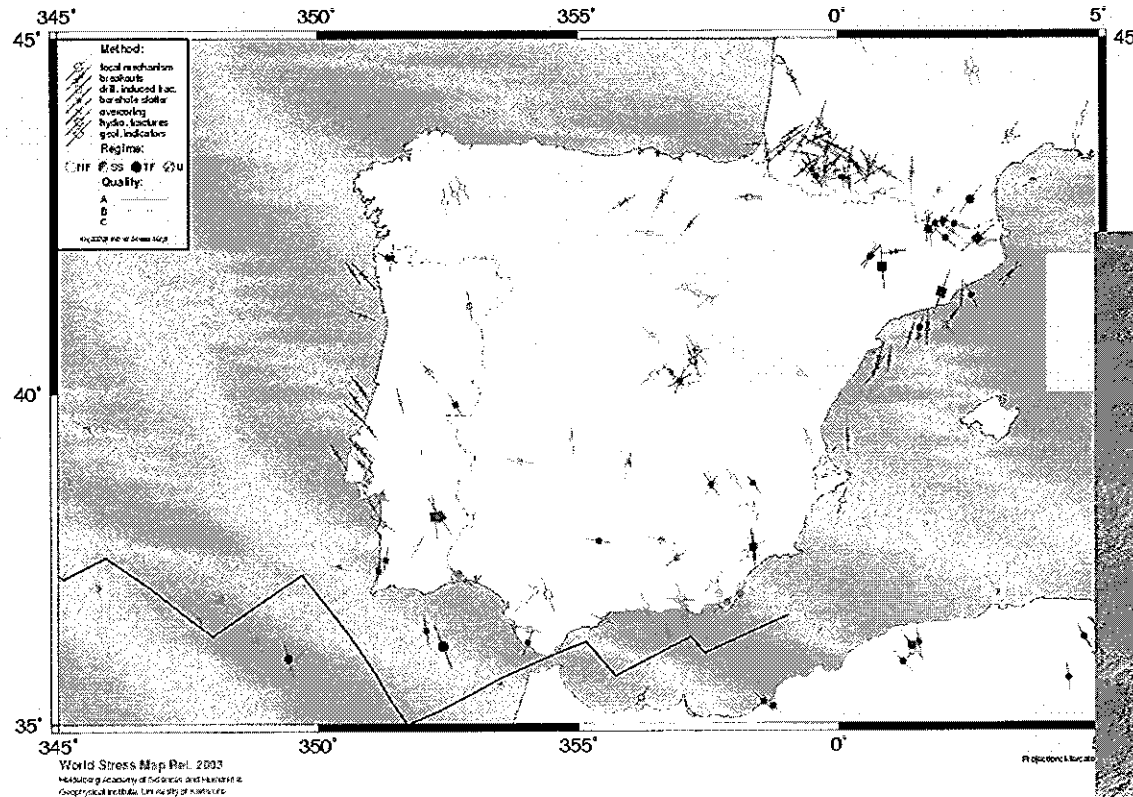




Hidrofracturación Guadarrama

Orientación

N127-142



Sondeo SE-36

Sondeos ST-2A y ST-10

Z 65 a 520

S_H : 103° a 114°

S_H : $N133^\circ \pm 8^\circ$ (NW-SE) z: 445 a 590 m

$S_h(\text{MPa}) = (6,45 \pm 0,3) + (0,0185 \pm 0,0030) \cdot (z-445)$

$S_H(\text{MPa}) = (12,63 \pm 0,59) + (0,0215 \pm 0,0060) \cdot (z-445)$

$S_v(\text{MPa}) = 0,026 \cdot z$

COMENTARIOS FINALES

- El estado tensional es un factor significativo
- Puede superarse resistencia roca y dar inestabilidad
- Hay esfuerzos gravitacionales, térmicos, residuales y tectónicos
- La orientación de los esfuerzos tectónicos se relaciona con la del movimiento relativo de las placas
- Hay modificaciones locales del campo regional
- Los campos de esfuerzos tectónicos no son estáticos, cambian con el tiempo
- Hay métodos de medida directa (instrumentales) y métodos geológicos y geofísicos