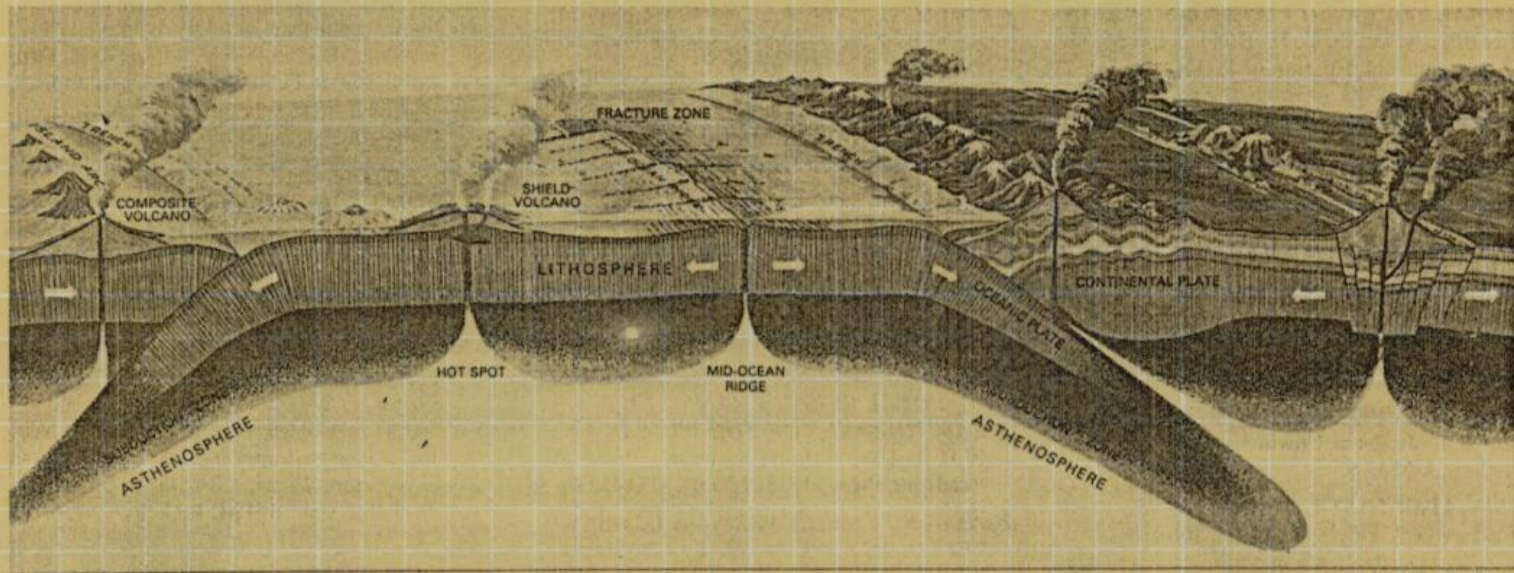


Sismicidad Y Tectónica

Modelo de Dinámica Global

This Dynamic Planet

A World Map of Volcanoes, Earthquakes, and Plate Tectonics

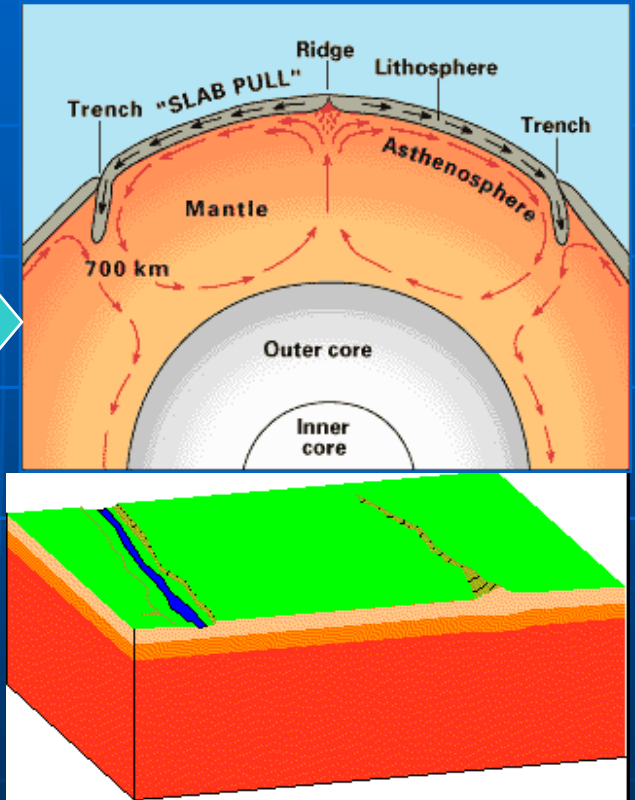
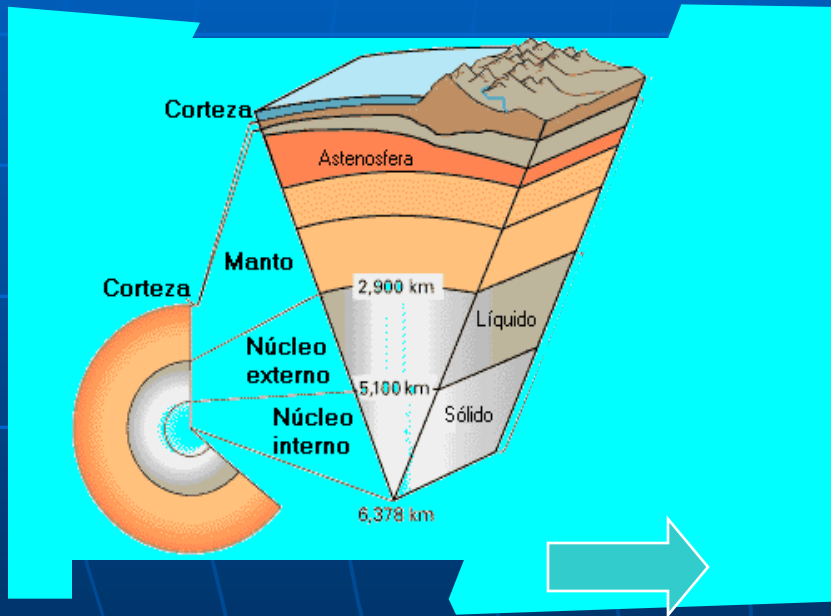


Schematic cross section illustrating plate tectonics processes

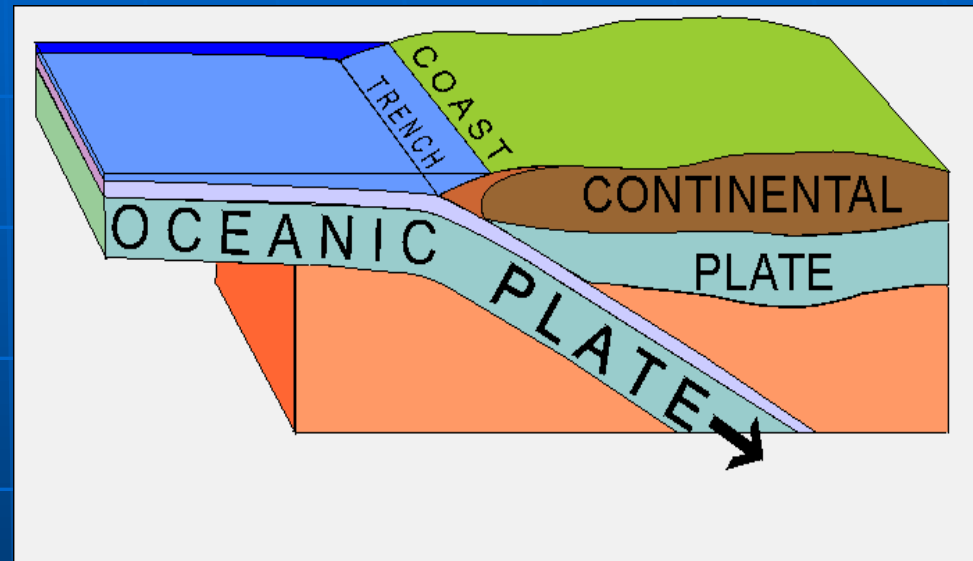
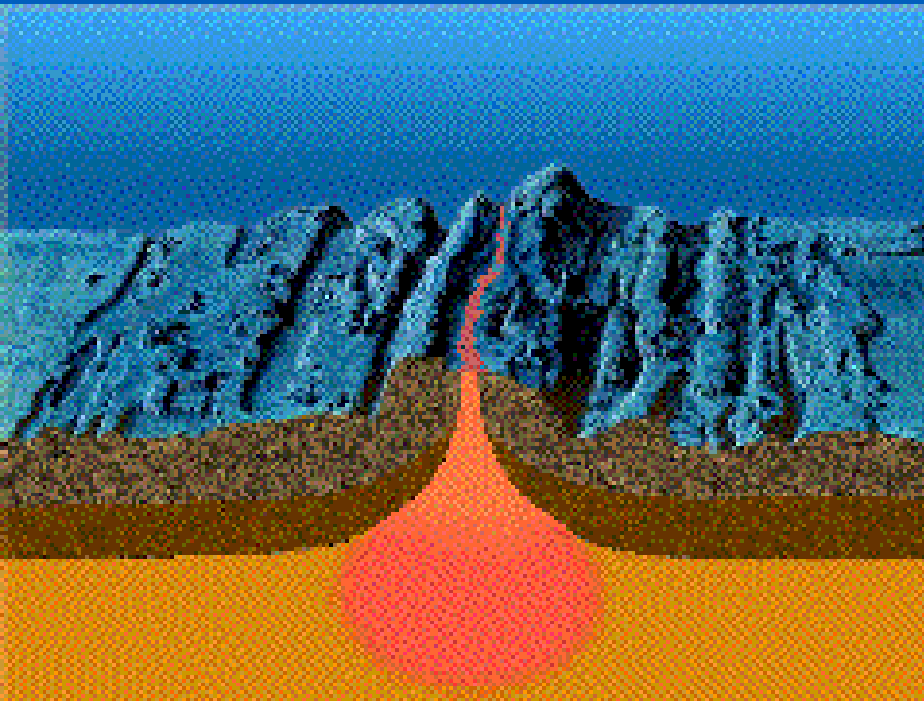
Art work by James Calhoun

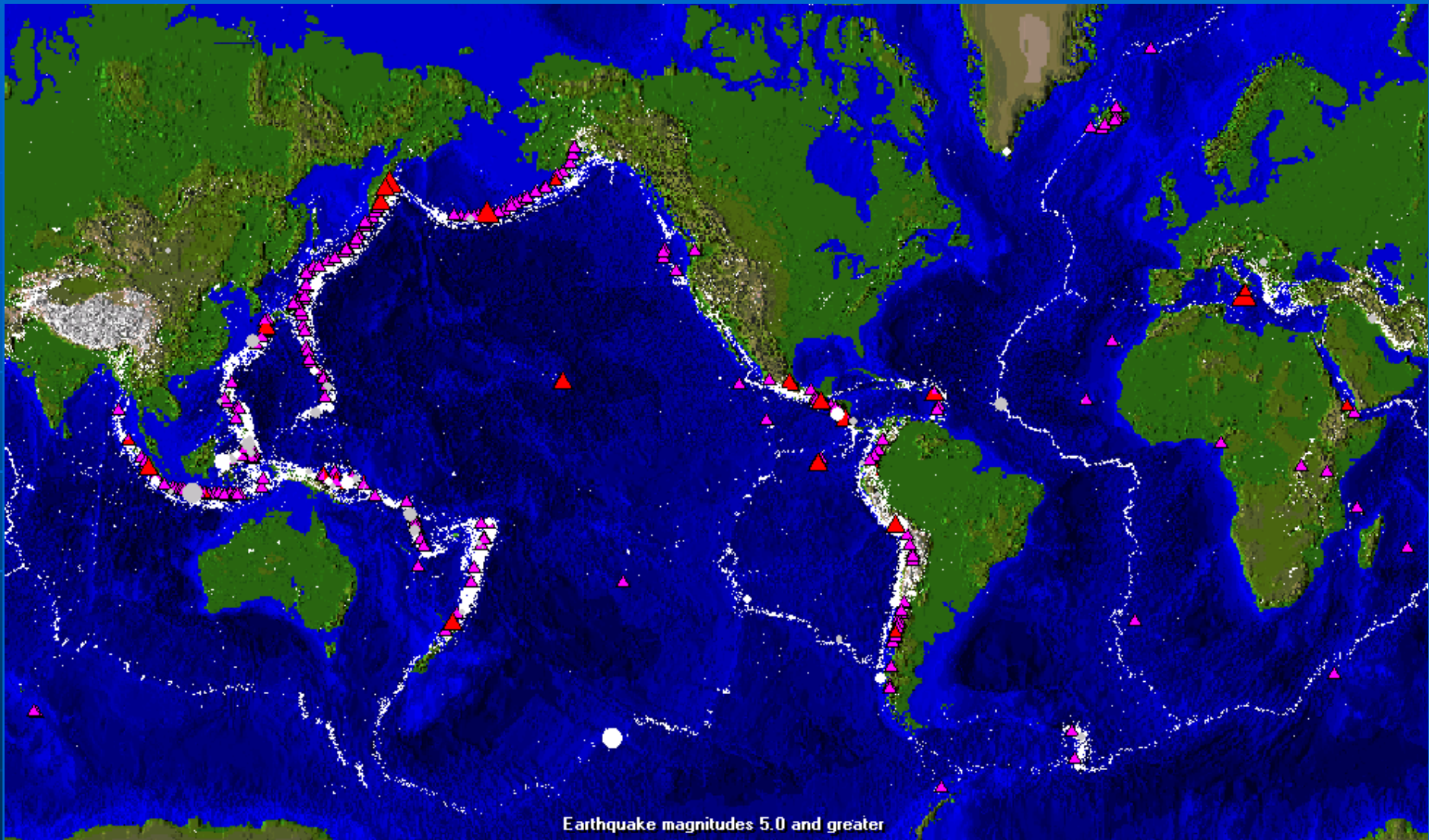
Compiled by Tom Simkin, Smithsonian Institution; R.I. Tilling, J.N. Taggart, W.J. Jones, and Henry Spall, U.S. Geological

Pero ¿cuál es la razón de la deriva?: La estructura de la tierra. Los materiales fríos de la superficie se desplazan encima de materiales más calientes del manto terrestre.



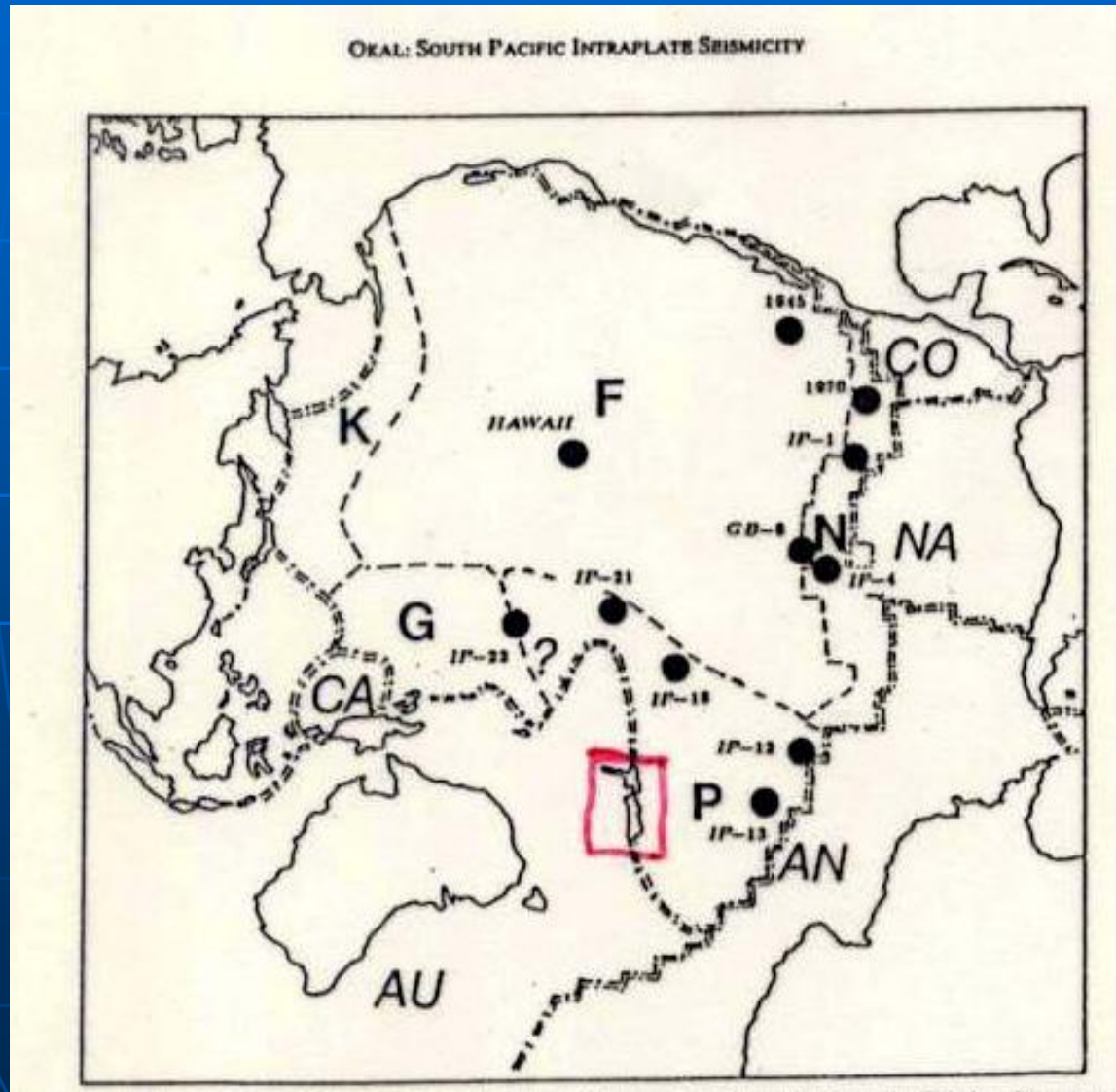
La deriva de los continentes crea corteza en unas zonas y la destruye en otras.



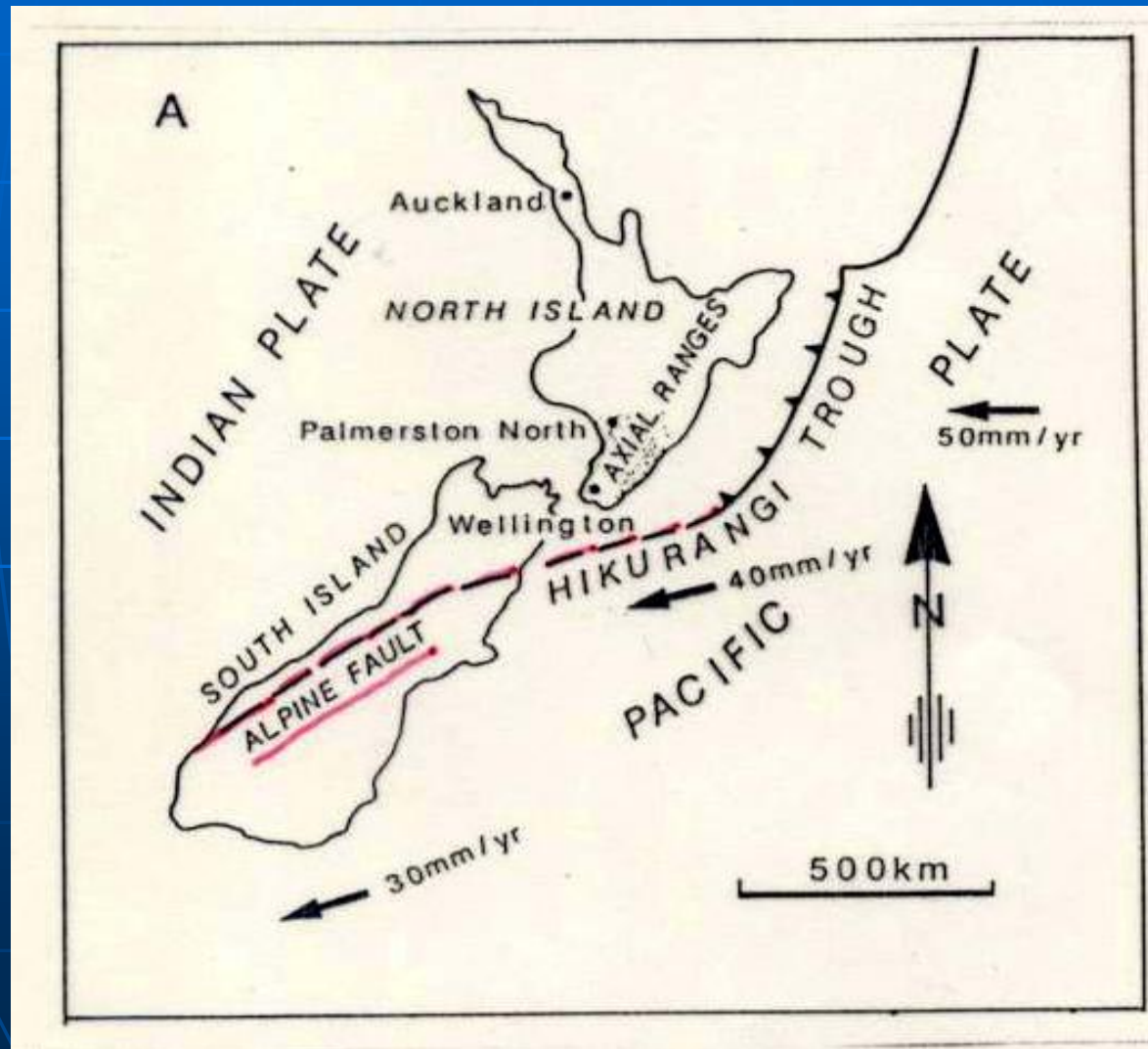


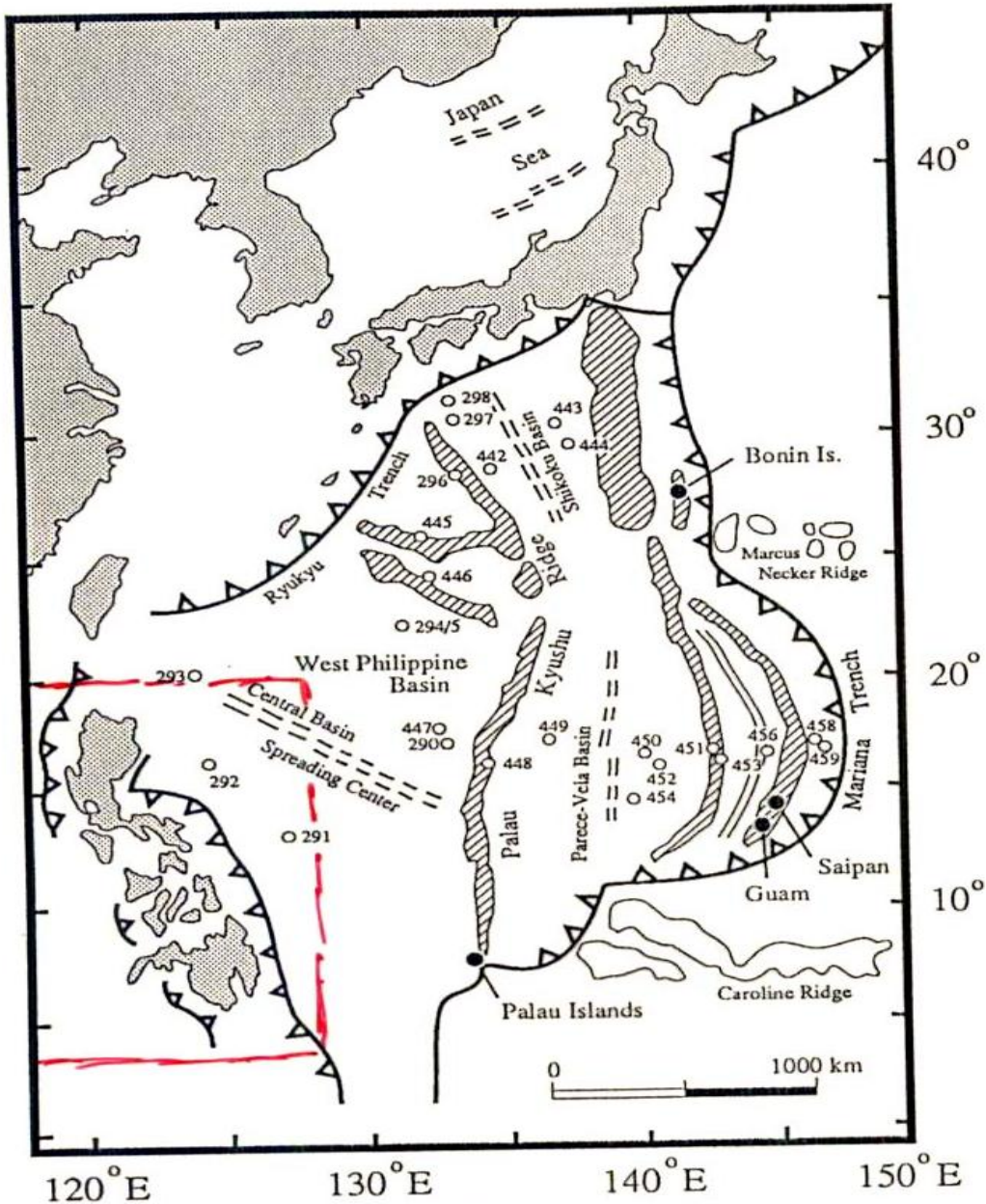
Earthquake magnitudes 5.0 and greater

Grieta Midoceánica del Pacífico y frentes de Subducción

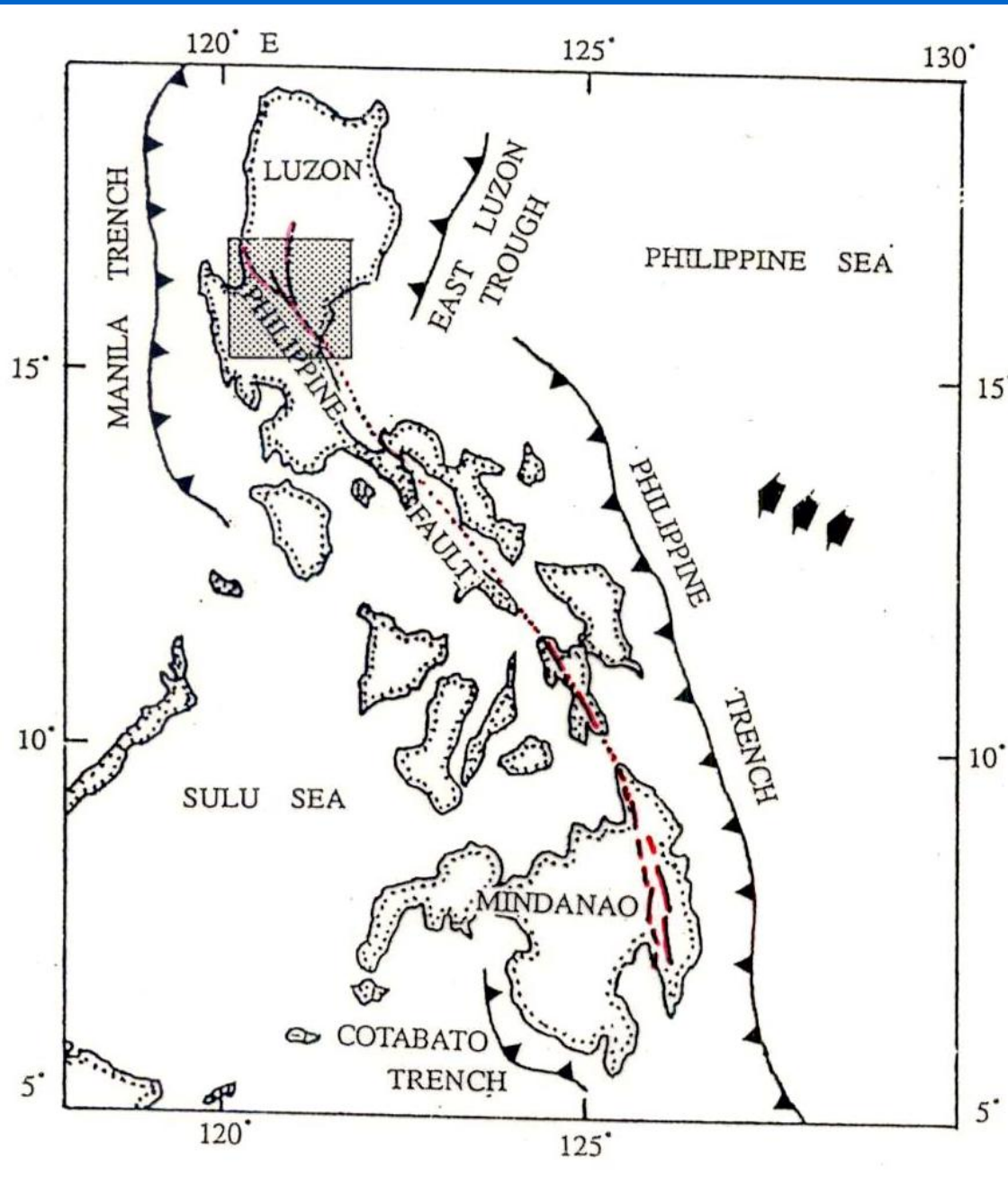


Grieta Midoceánica y la Falla Alpina

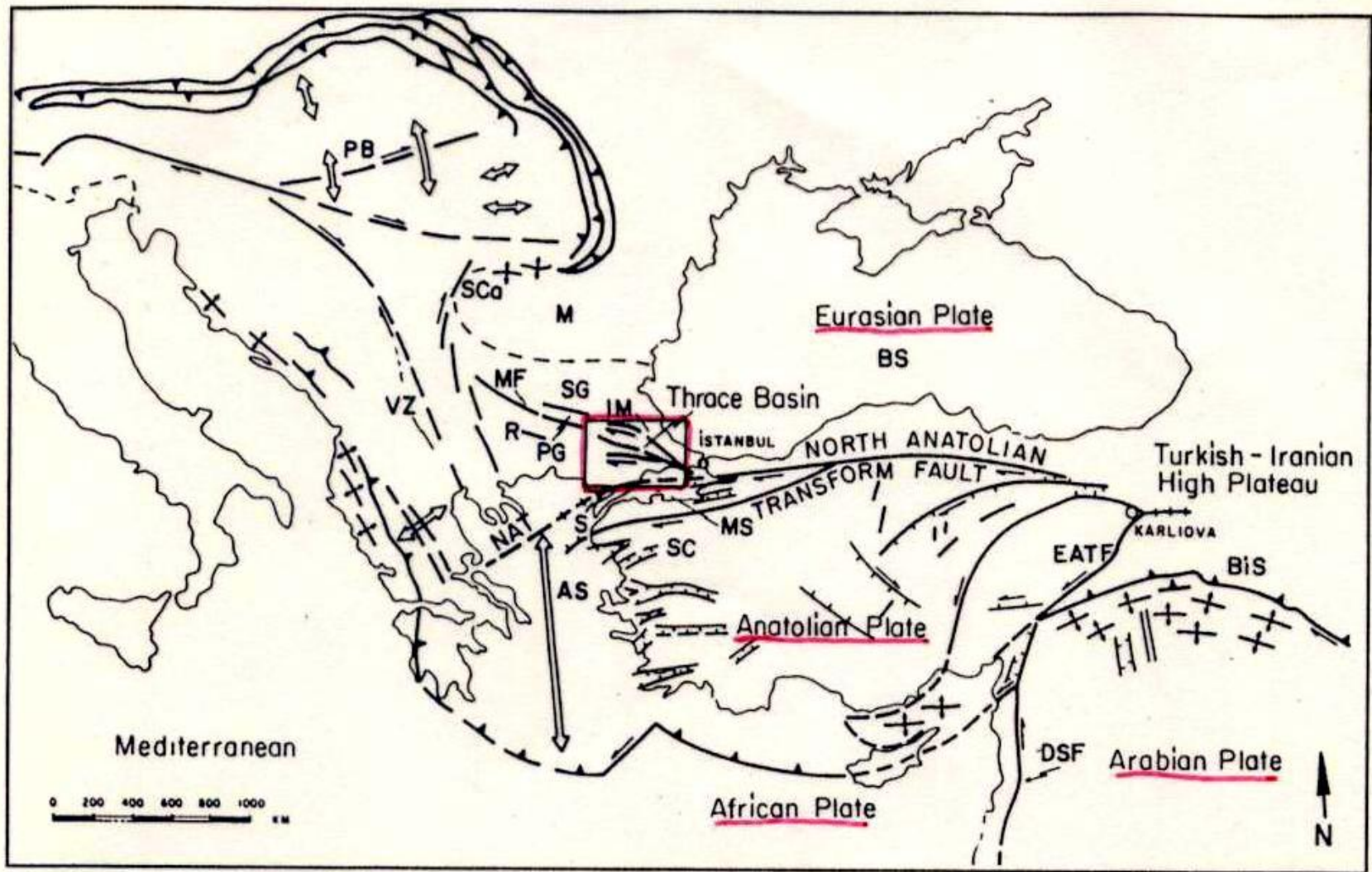




Frente de Subducción en Filipinas y Japón



Frente de Subducción y Falla Activa Filipinas



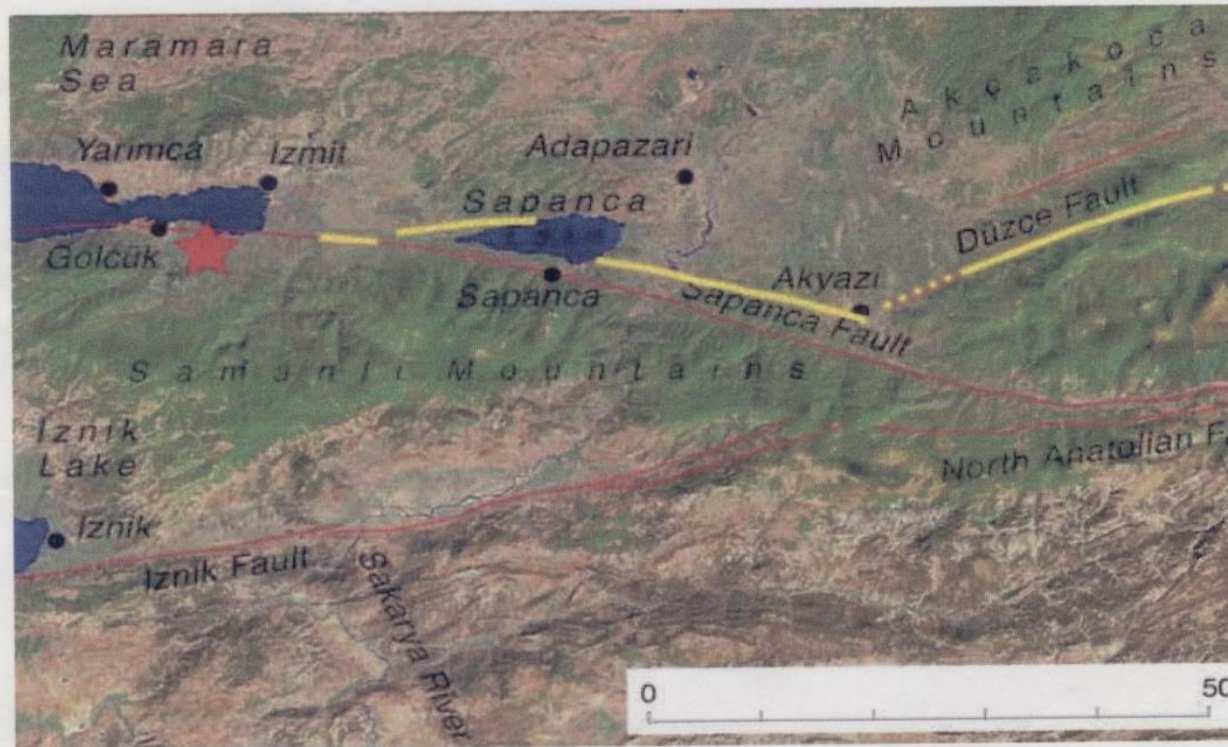
Falla Anatolia Norte - Turquía

U.S. Geological Survey 1999 Scientific Expedition to Turkey

Field Investigations of the 1999 Izmit Earthquake

USGS Fault Rupture Observations

This is a map of fault rupture observed by the USGS team in Turkey. The red lines are previously mapped faults, the red star is the epicenter of the M7.4 Izmit earthquake, and the yellow lines are the areas where the USGS team has mapped new surface breaks.



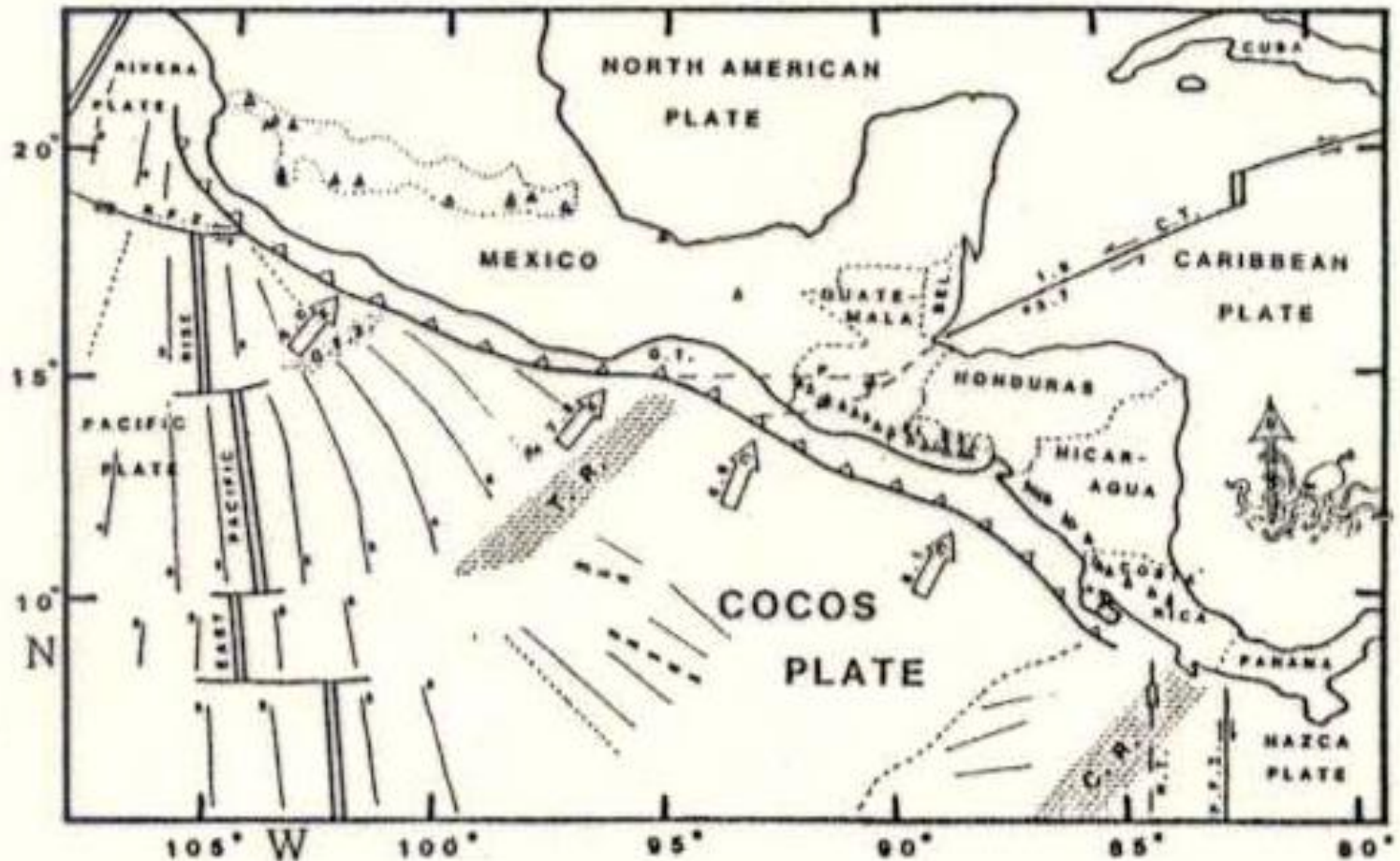
<http://quake.usgs.gov/study/turkey/rupturemap.html>

26/08/99

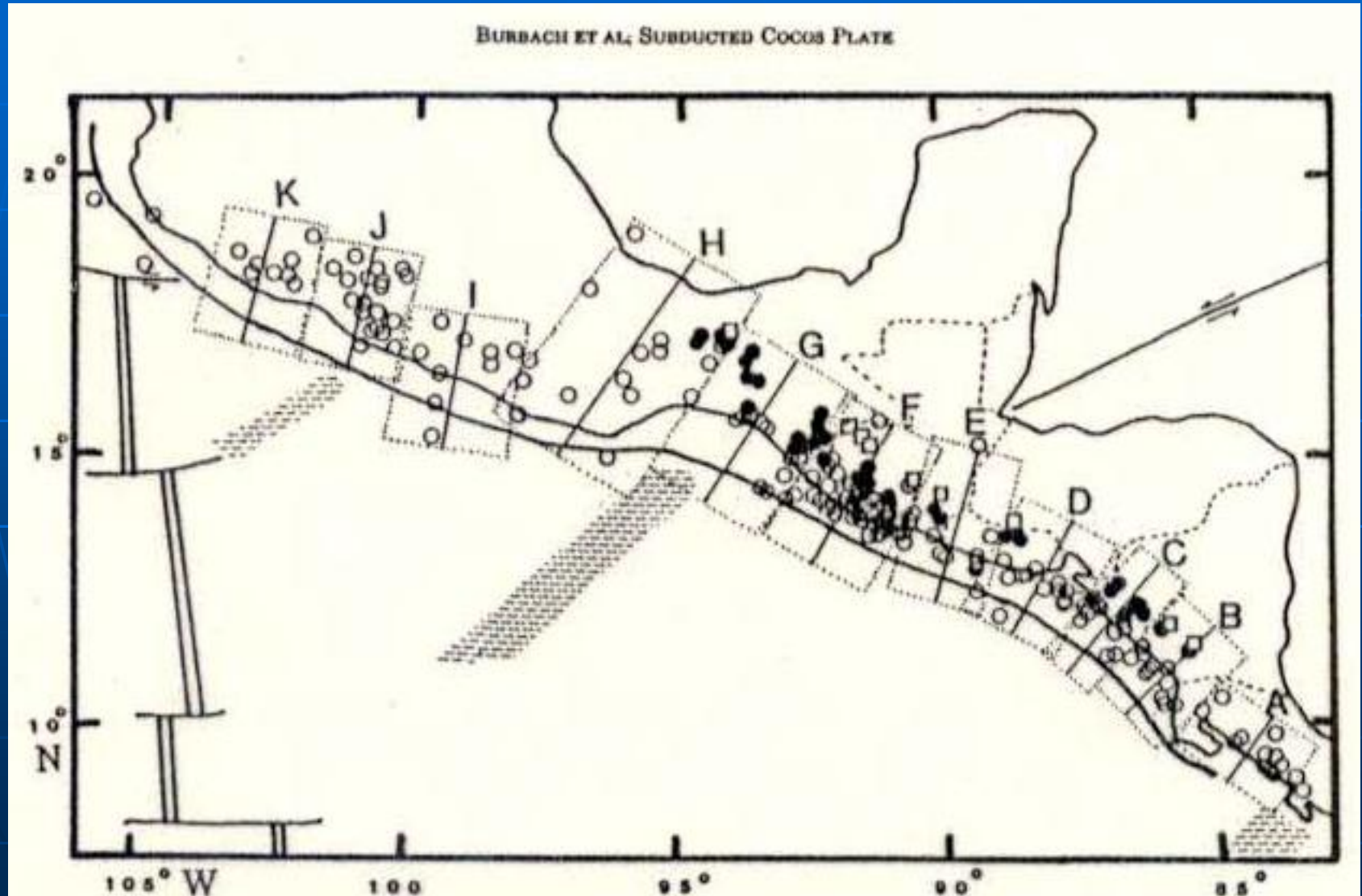
Ubicación del Epicentro del terremoto de 1999

Frente de Subducción en Centro América

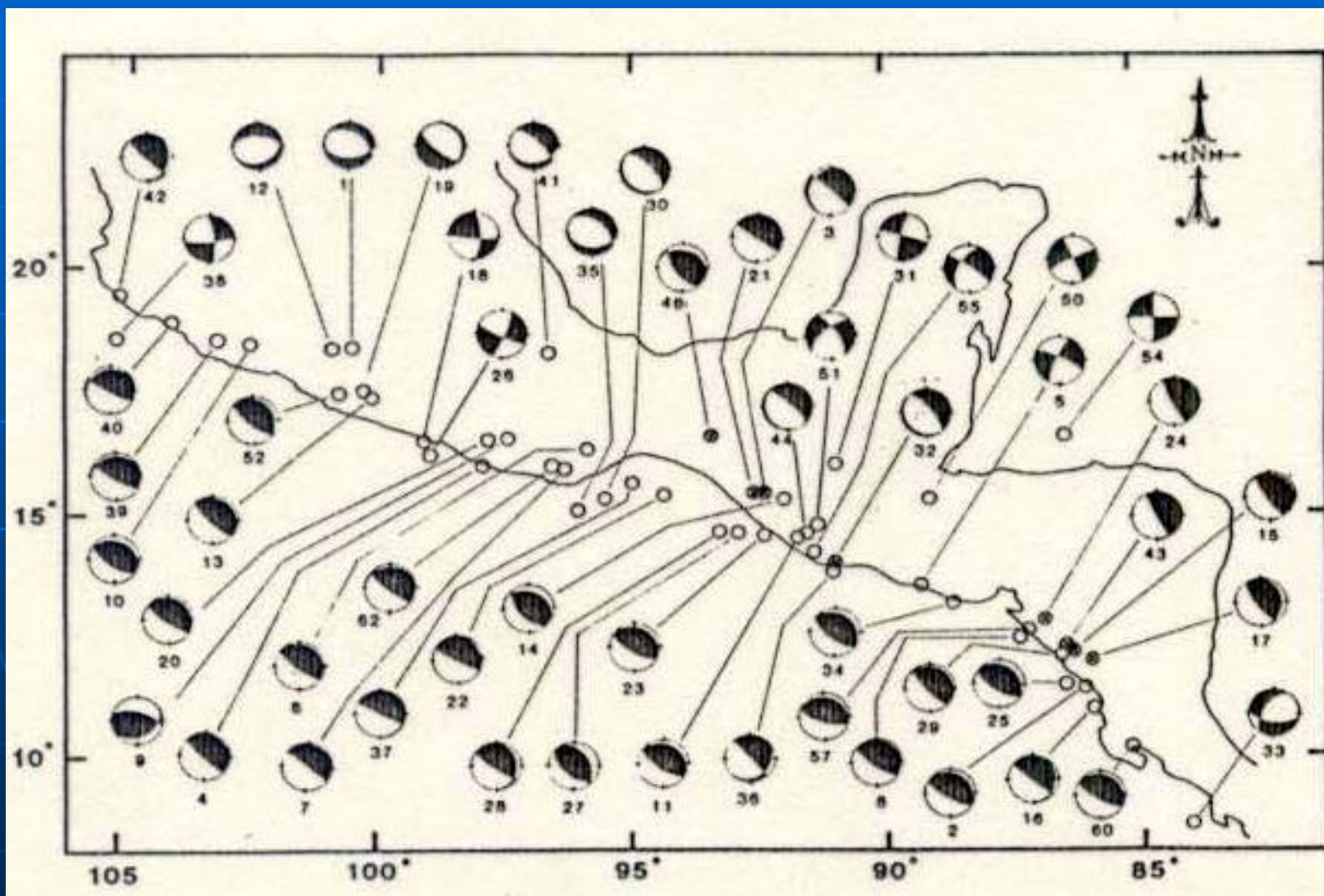
BURBACH ET AL: SUBDUCTED COCOS PLATE

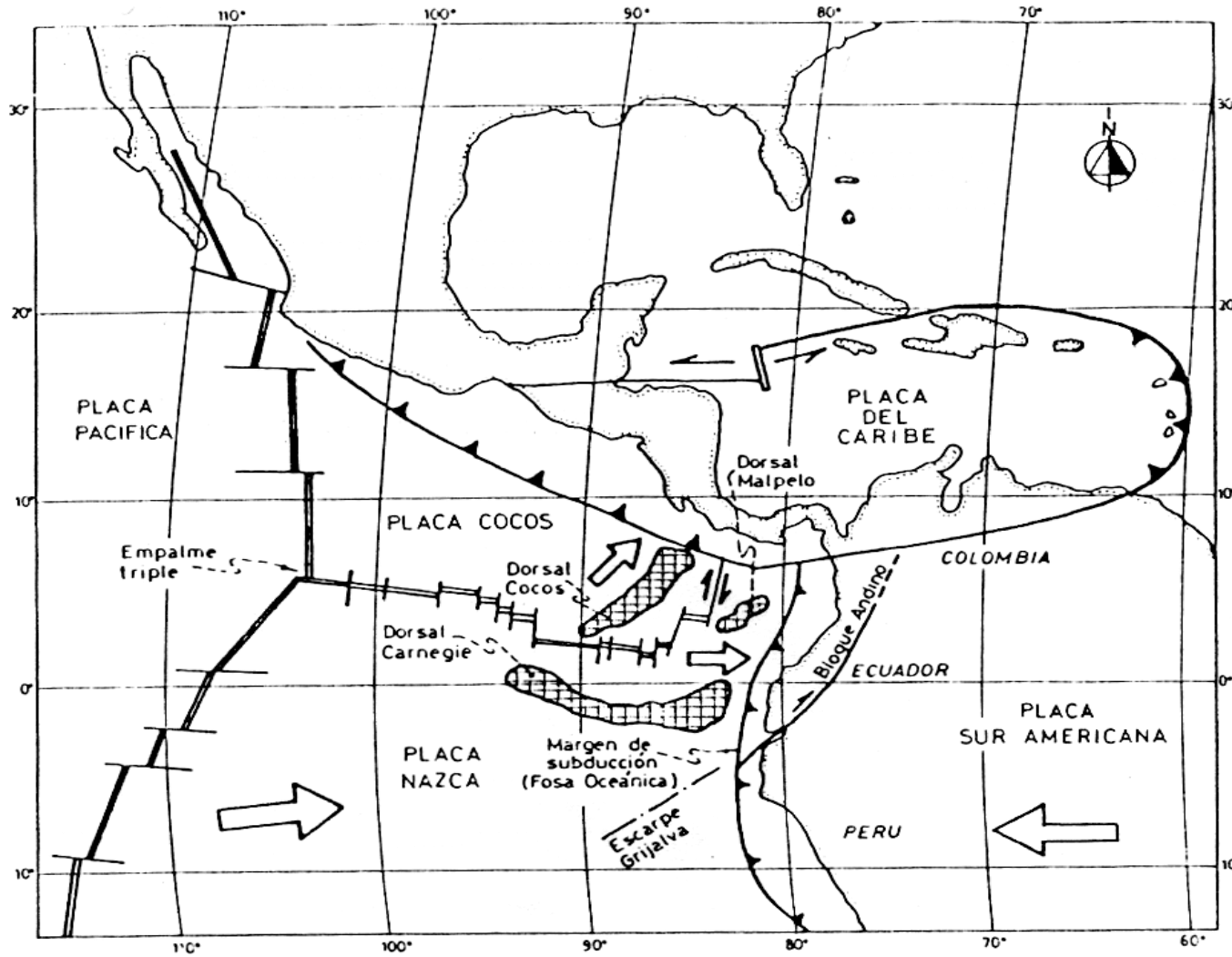


Ubicación de Epicentros en América Central



Mecanismos Focales de los Sismos de Centro América



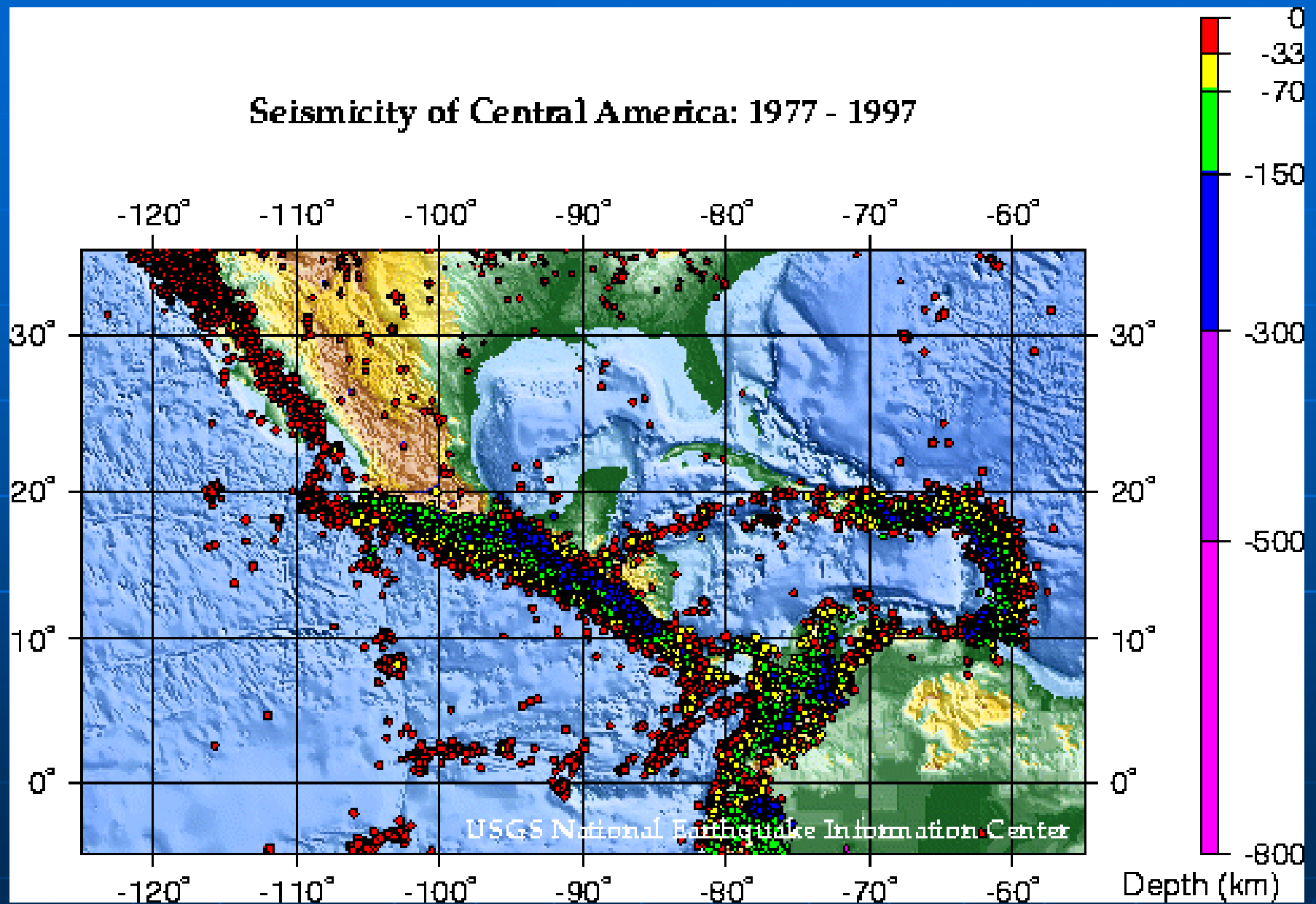


LEYENDA

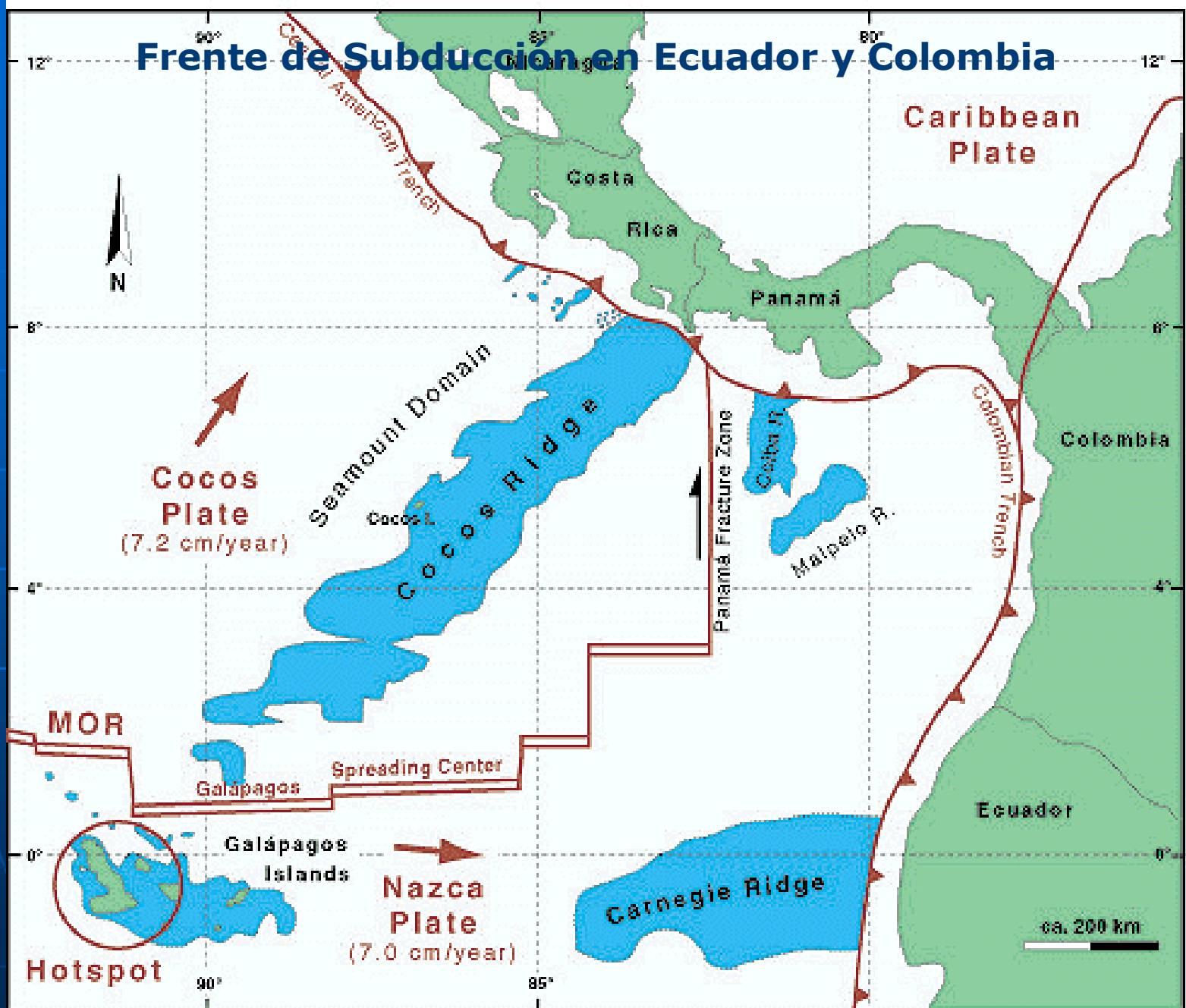
- Dorsal en expansión activa
- Margen de la subducción
- Fallas transcurrentes activas
- Escarpe de falla
- Dorsal originada por un "hotspot"
- Dirección de movimiento

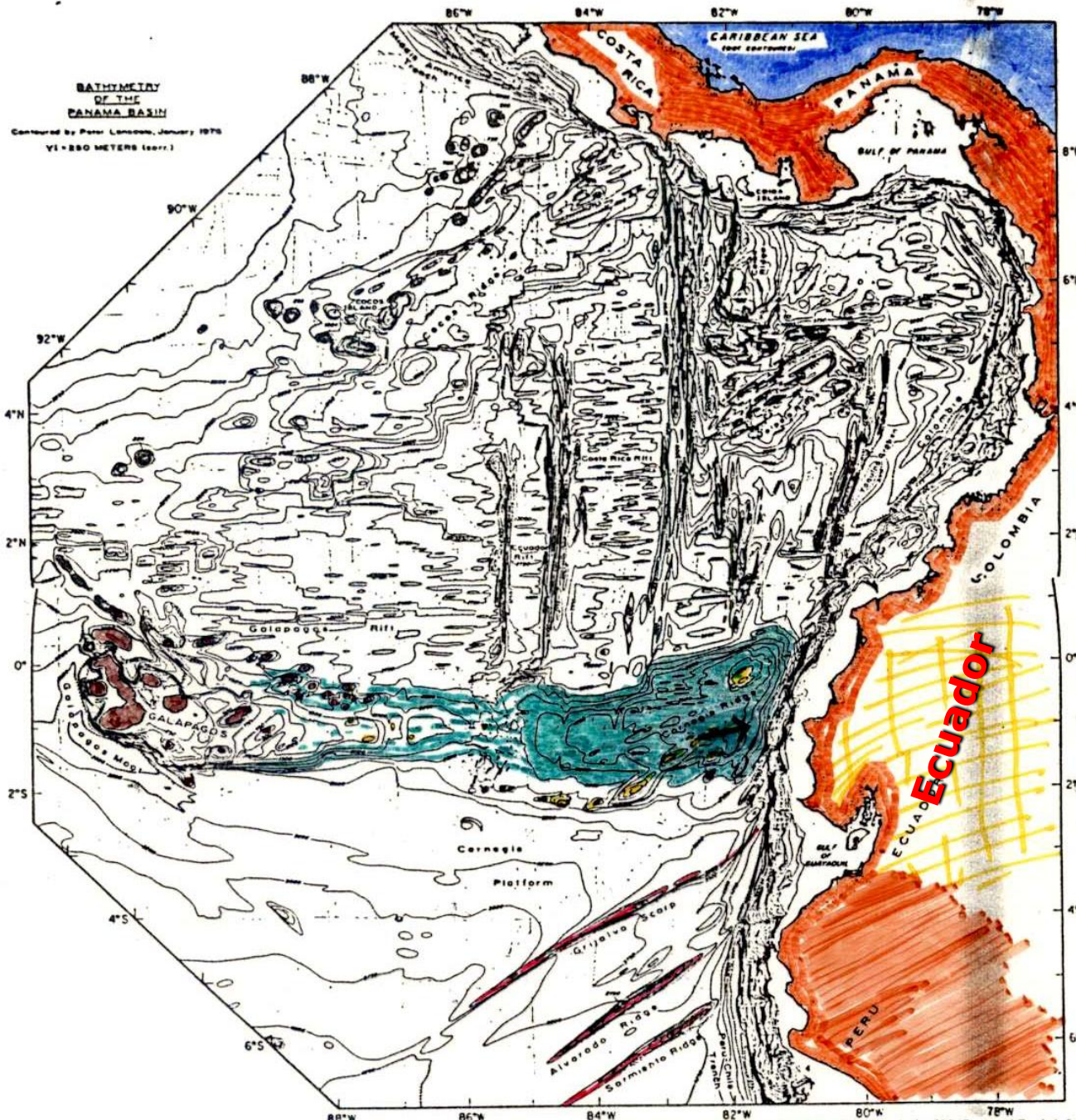
Modelo Geodinámico del Bloque Ecuador, Colombia, Venezuela, El Caribe y Centro América

Seismicity of Central America: 1977 - 1997



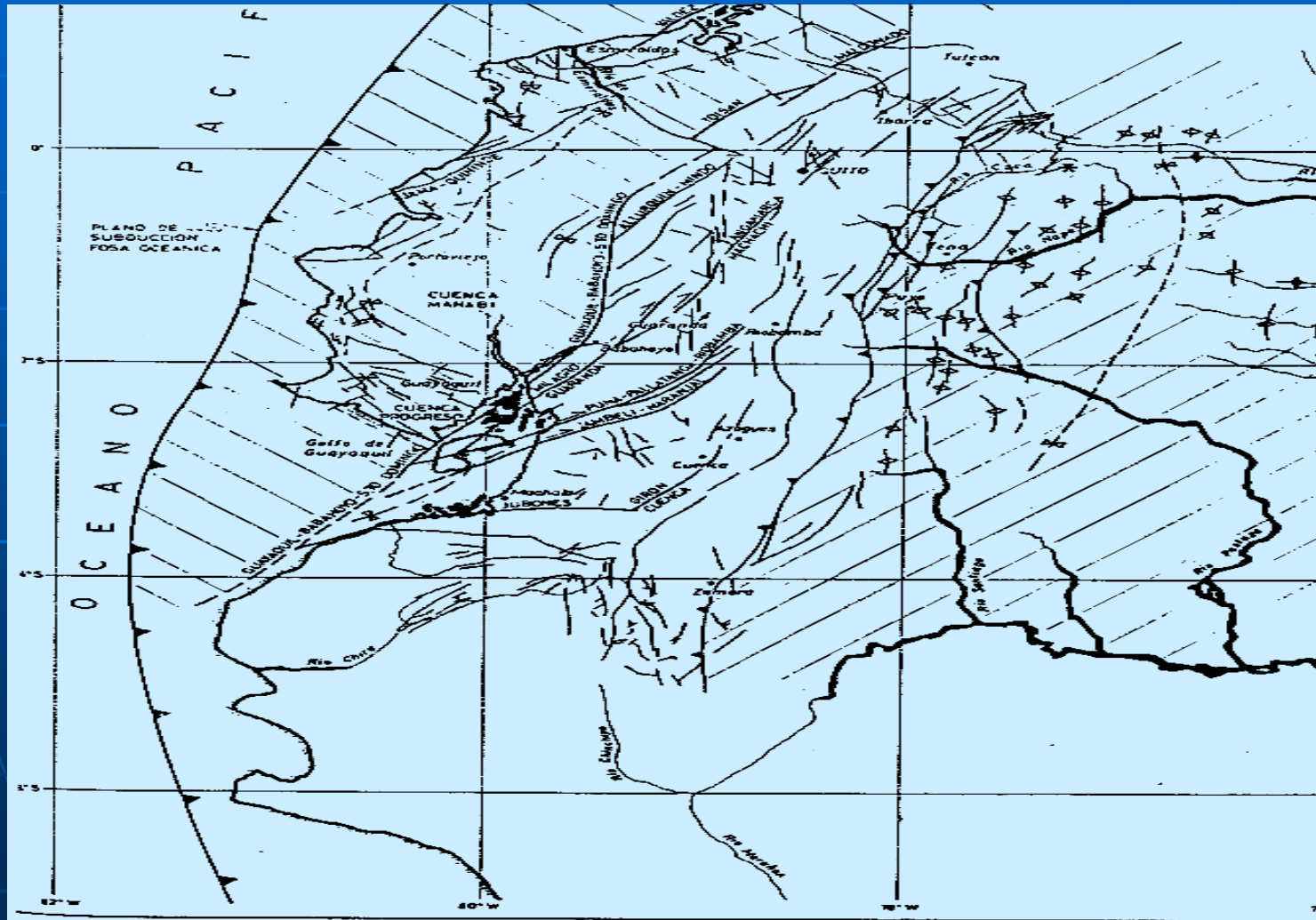
Frente de Subducción en Ecuador y Colombia





Geomorfología Submarina Frente Ecuador

Principales estructuras tectónicas de Ecuador





**Traza de una falla en Macará -
Loja**

Traza de Falla Punta Blanca - Guayas



Línea de Falla Cerros de Durán - Guayas

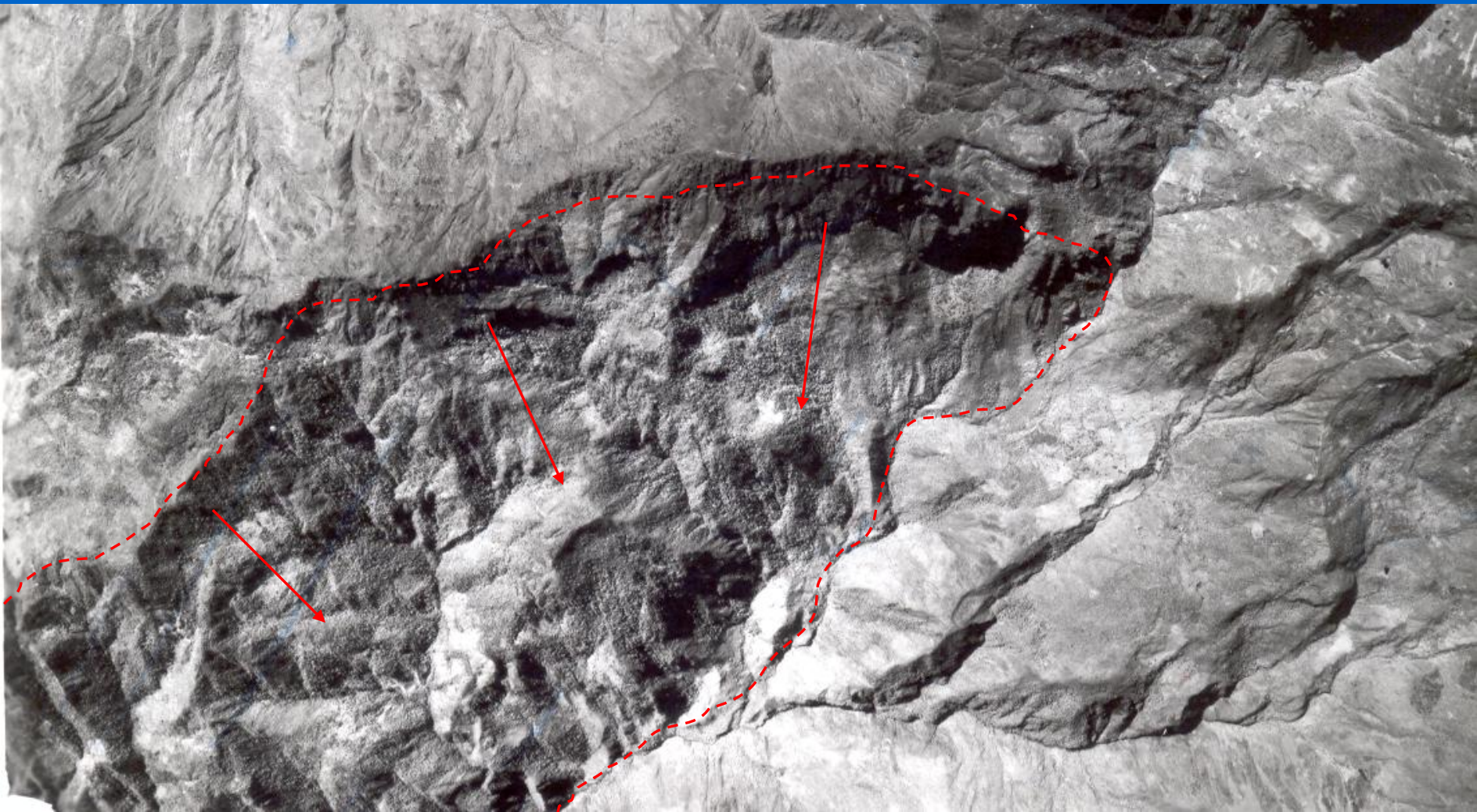


Línea de Falla Cerro Bellavista - Guayaquil



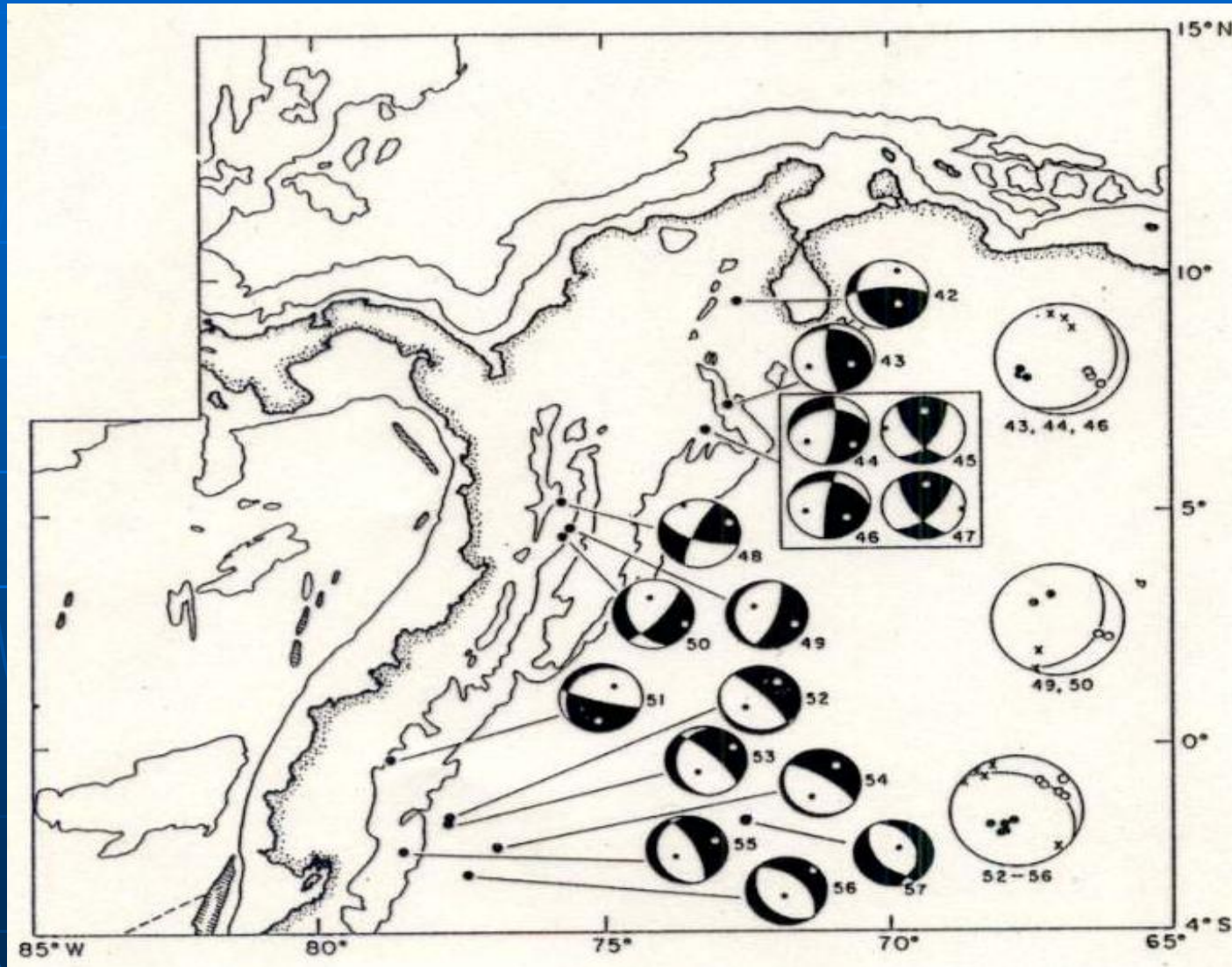
Línea de Falla Pallatanga





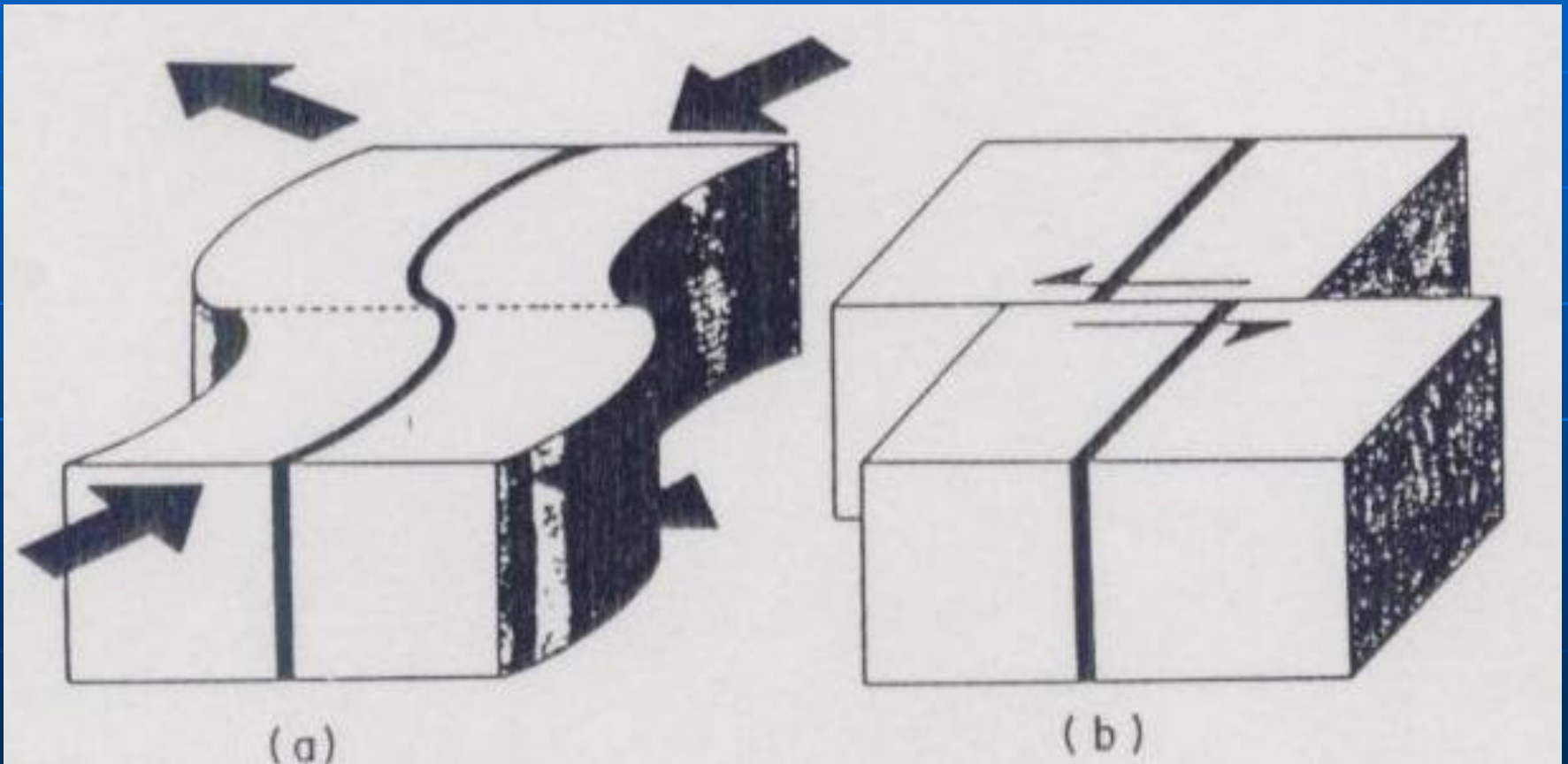
Línea de falla y deslizamientos asociados

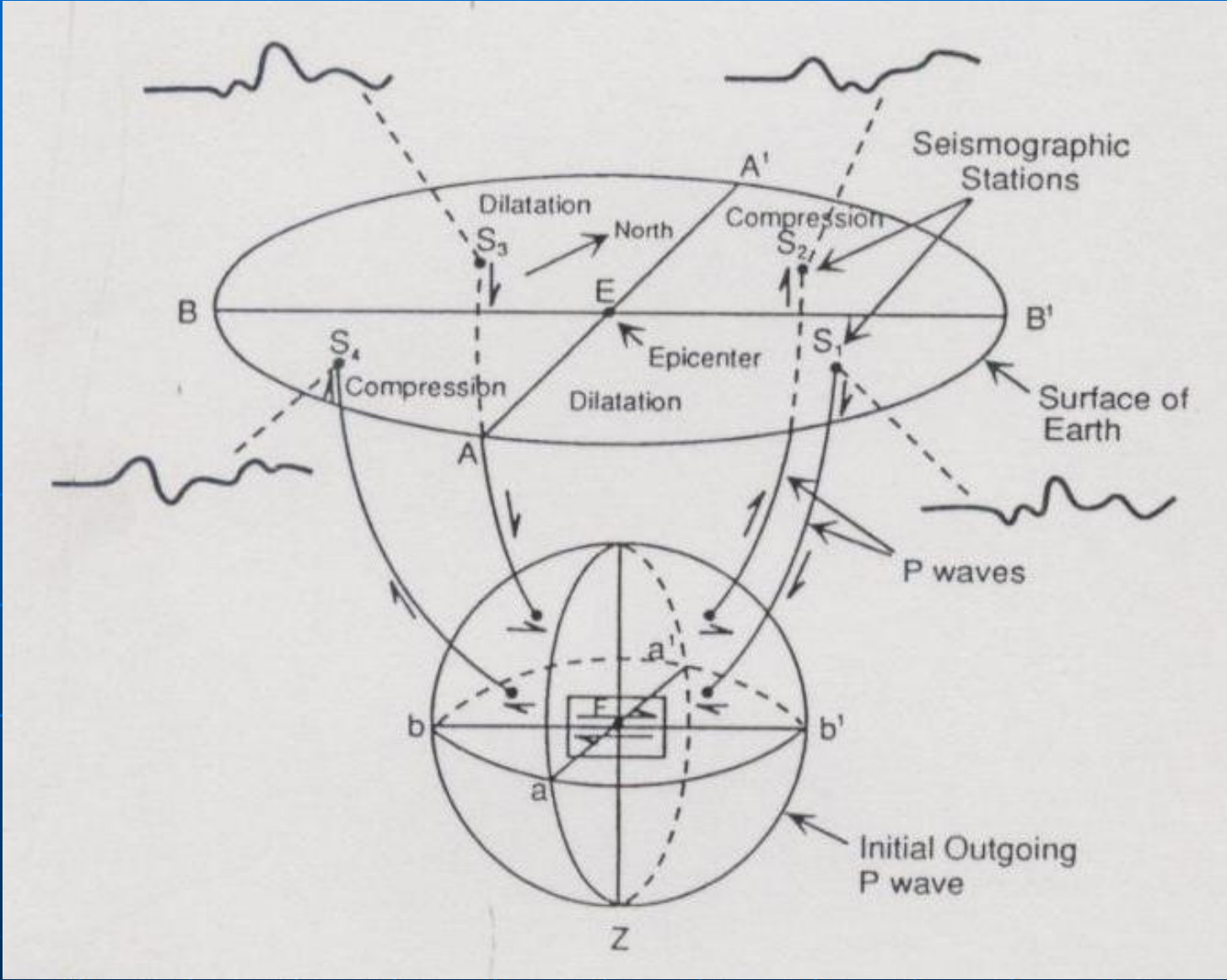
Mecanismos Focales Asociados a sismos Ecuatorianos



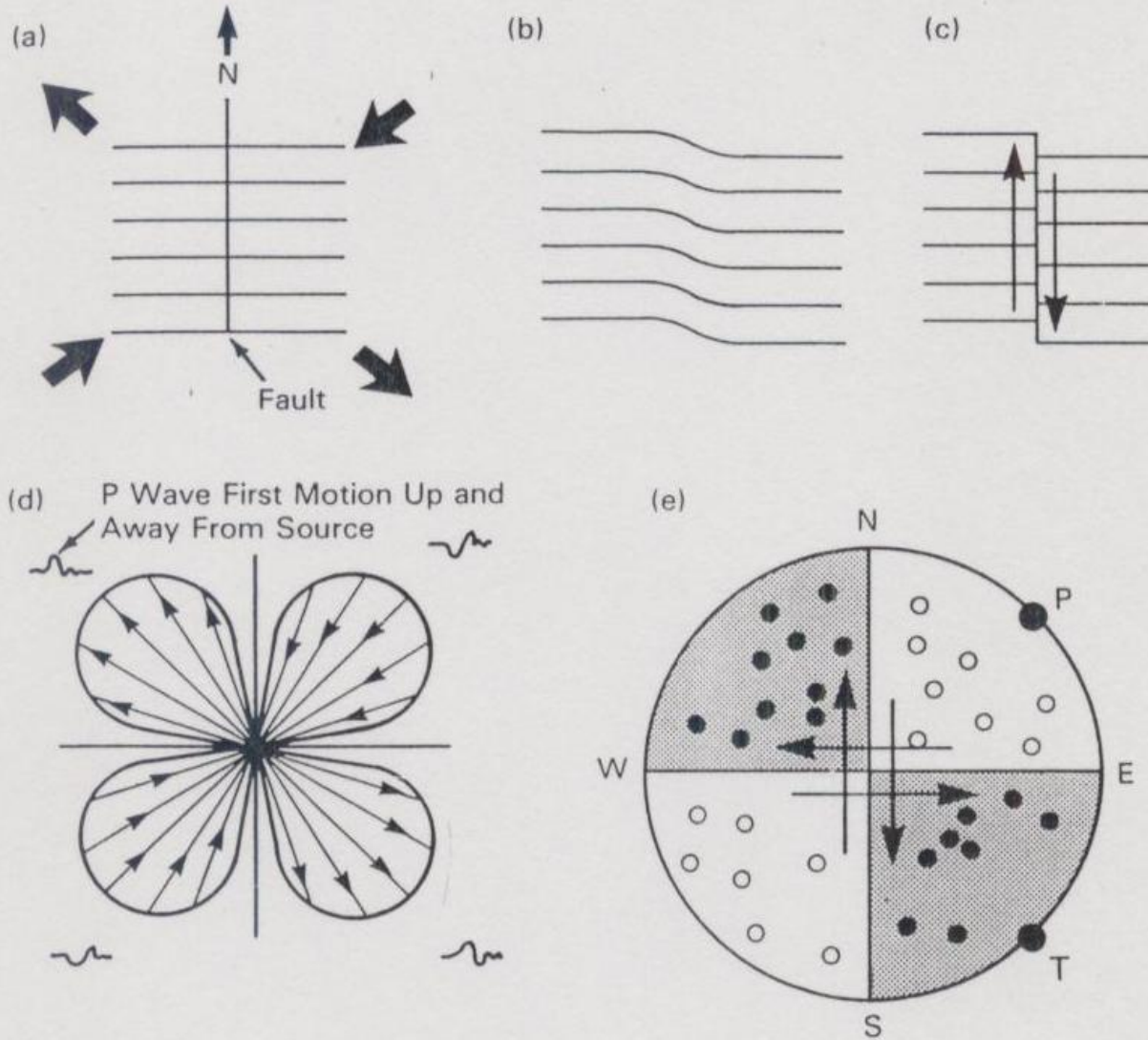
Teoría de rebote elástico de Reid:

- a) Situación deformada anterior al terremoto
- b) Situación después del terremoto





Principio estereográfico del mecanismo focal



Representación Estereográfica del Mecanismo Focal

Modelo de Mecanismo Focal para Cada Tipo de Falla

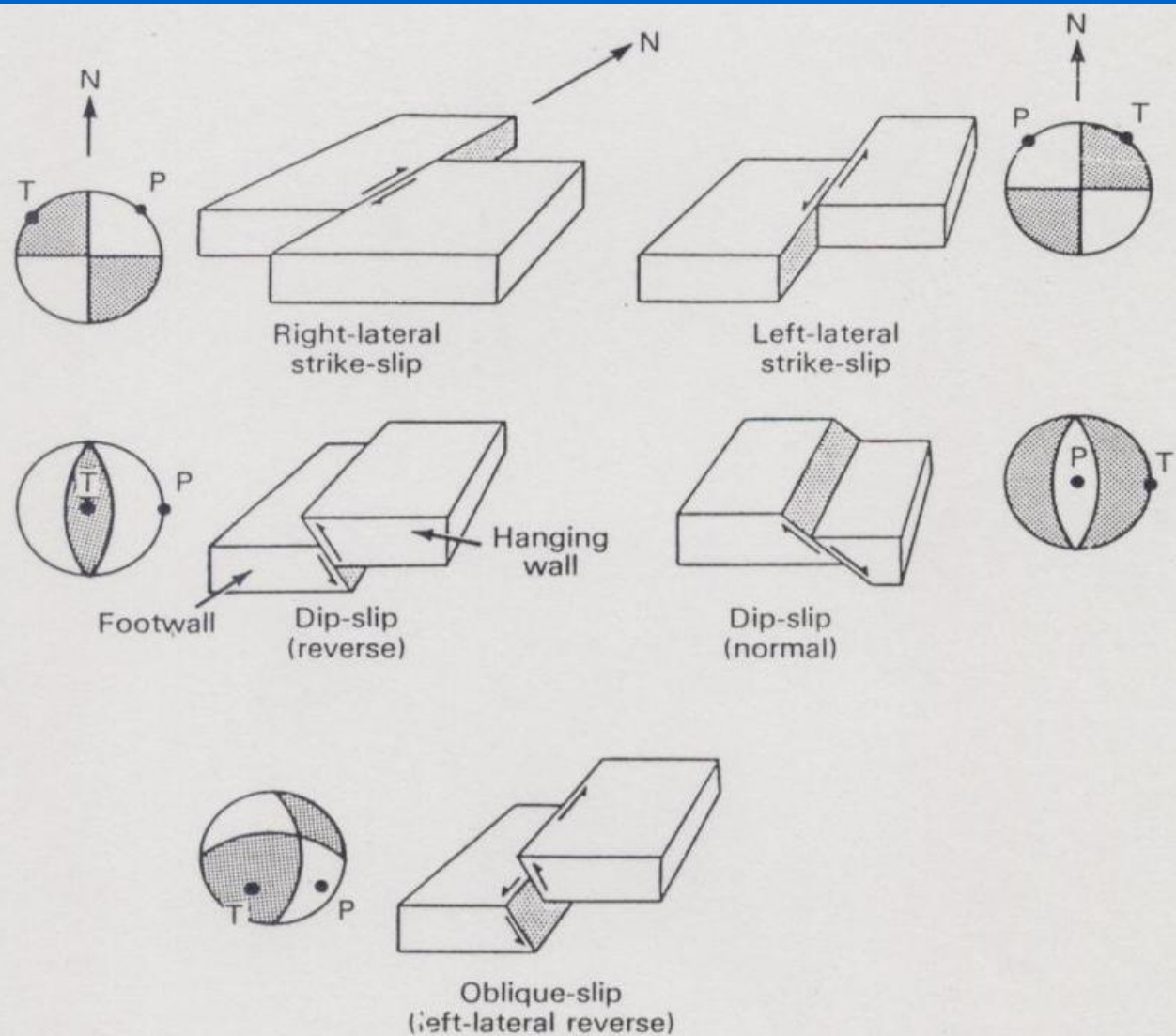
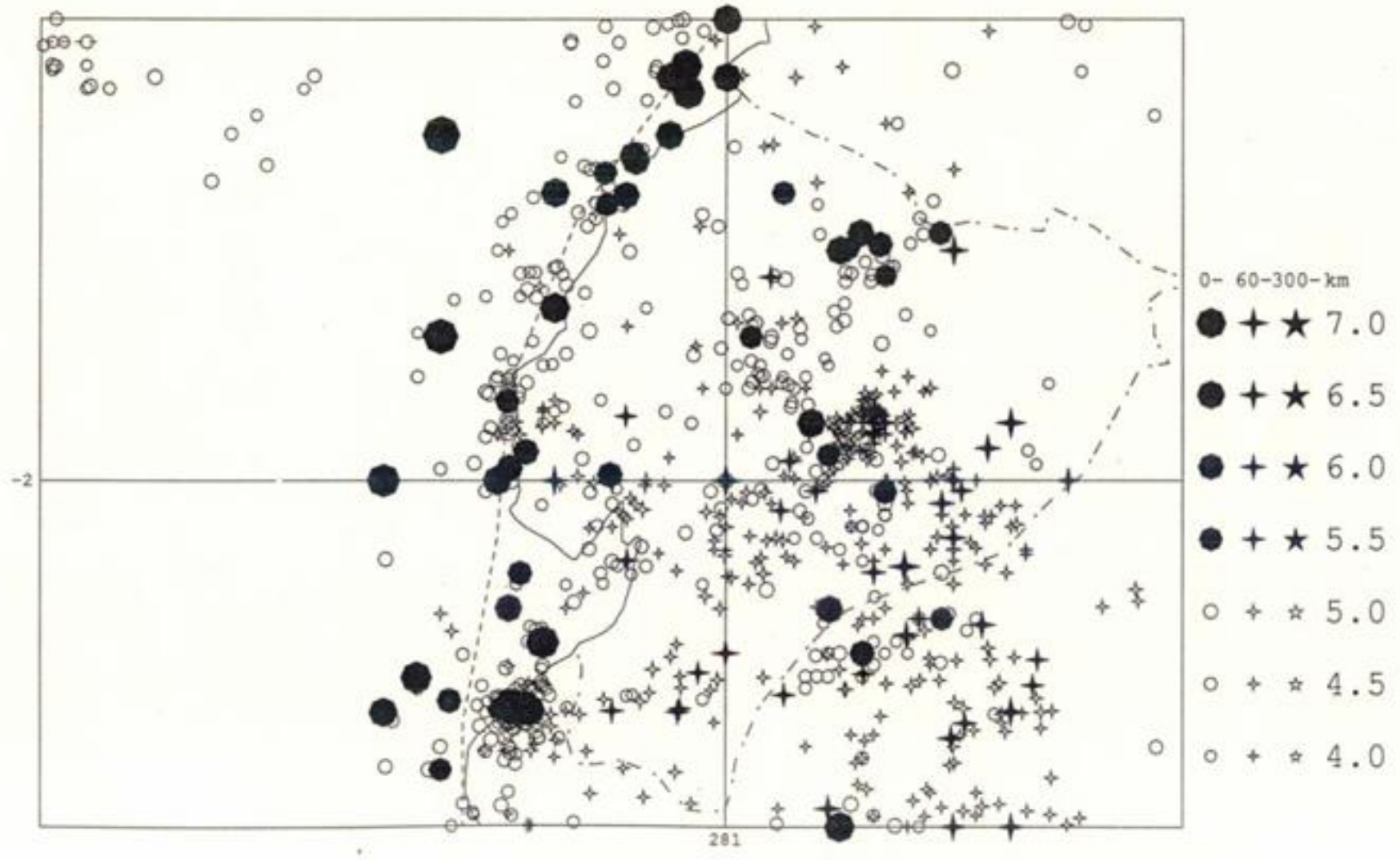


FIGURE 2.7 Different types of faults classified by the orientation of relative movement along the fault plane during an earthquake (after Clark and Hauge 1971; Wesson and others 1975; and Berlin 1980). Also shown are the corresponding focal mechanism solutions with pressure (P) and tension (T) axes.

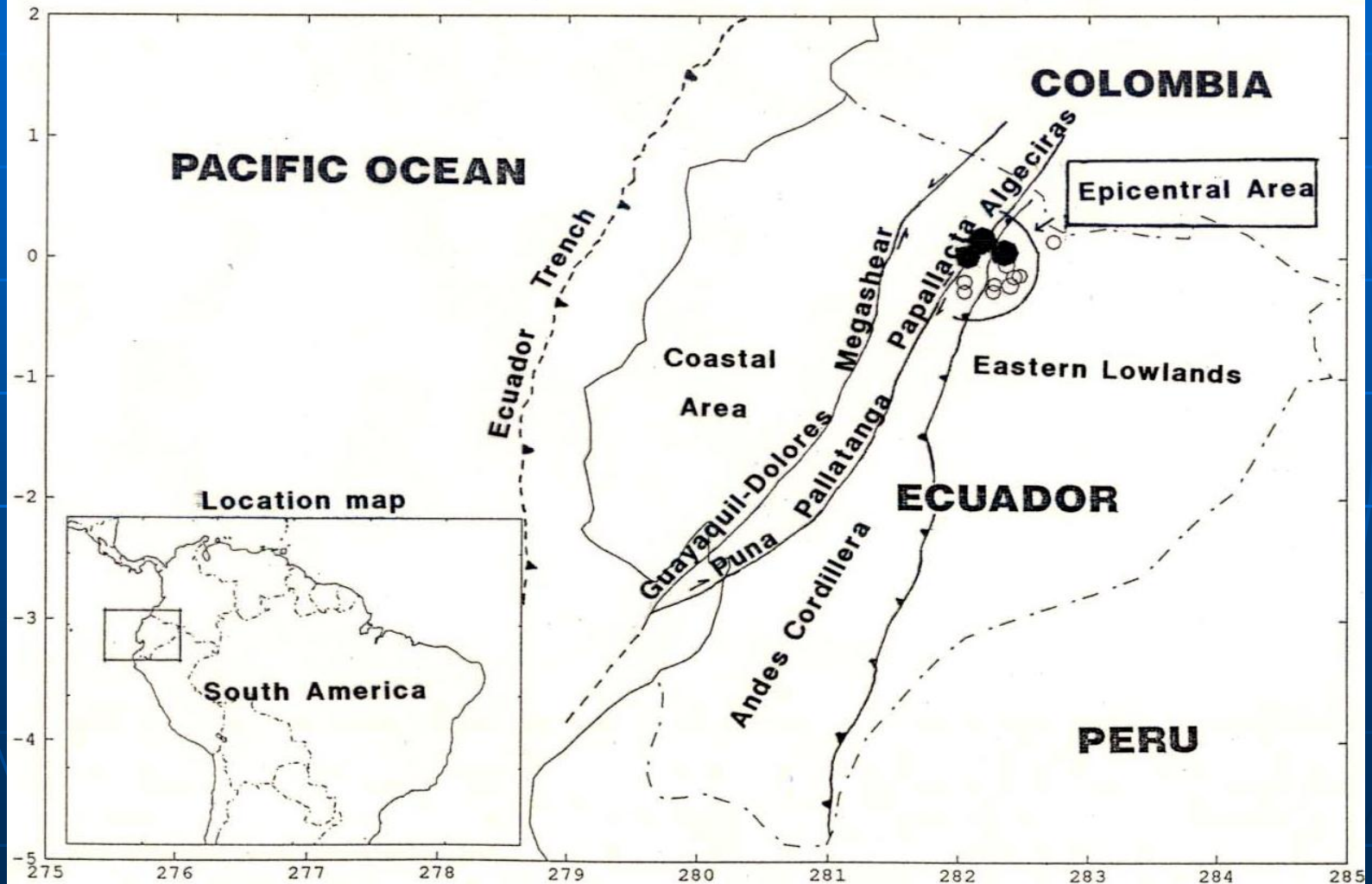
Eventos Sísmicos ocurridos en Ecuador

PDE (1900-June, 1987)

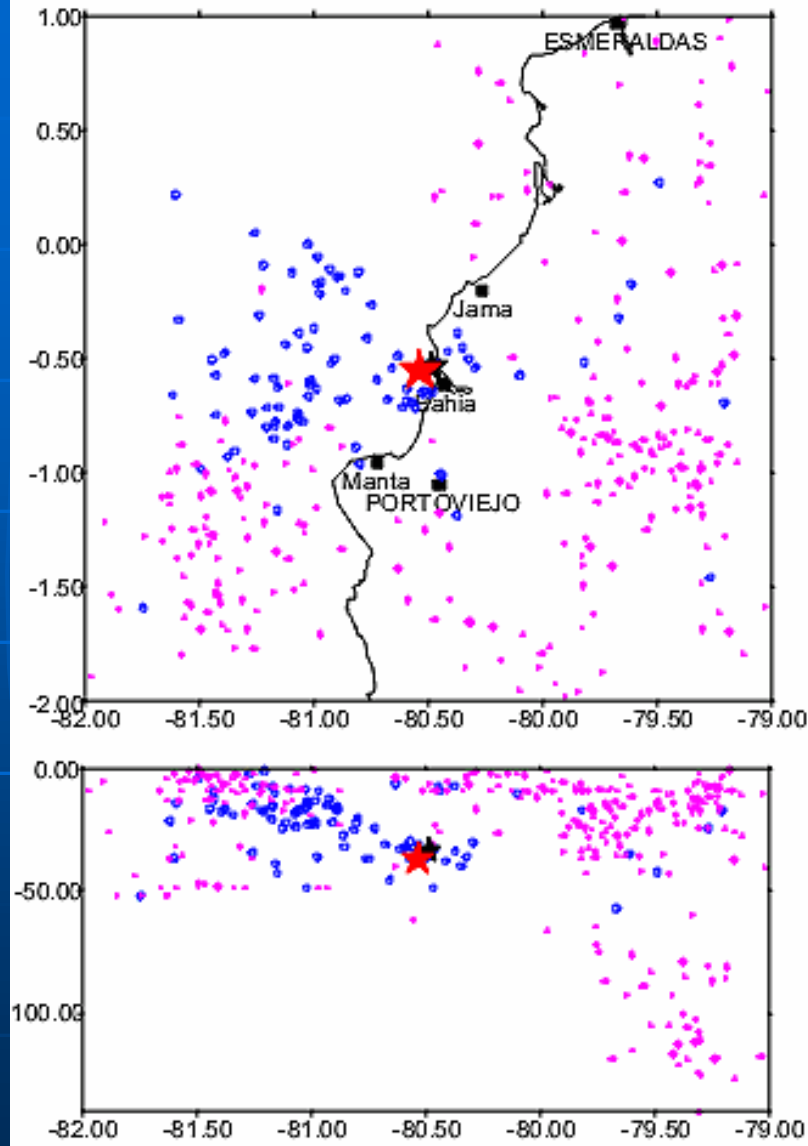


Mega estructuras en el Ecuador de Carácter Activo

PDE March 6-10, 1987



1998 Seismicity Coastal zone



LEGEND

- ✚ Previous activity
- ★ Foreshock 5.4 (04/08/98 17h35 GMT)
- ★ Aftershocks
- Main event 7.1(04/08/98 18h59 GMT)

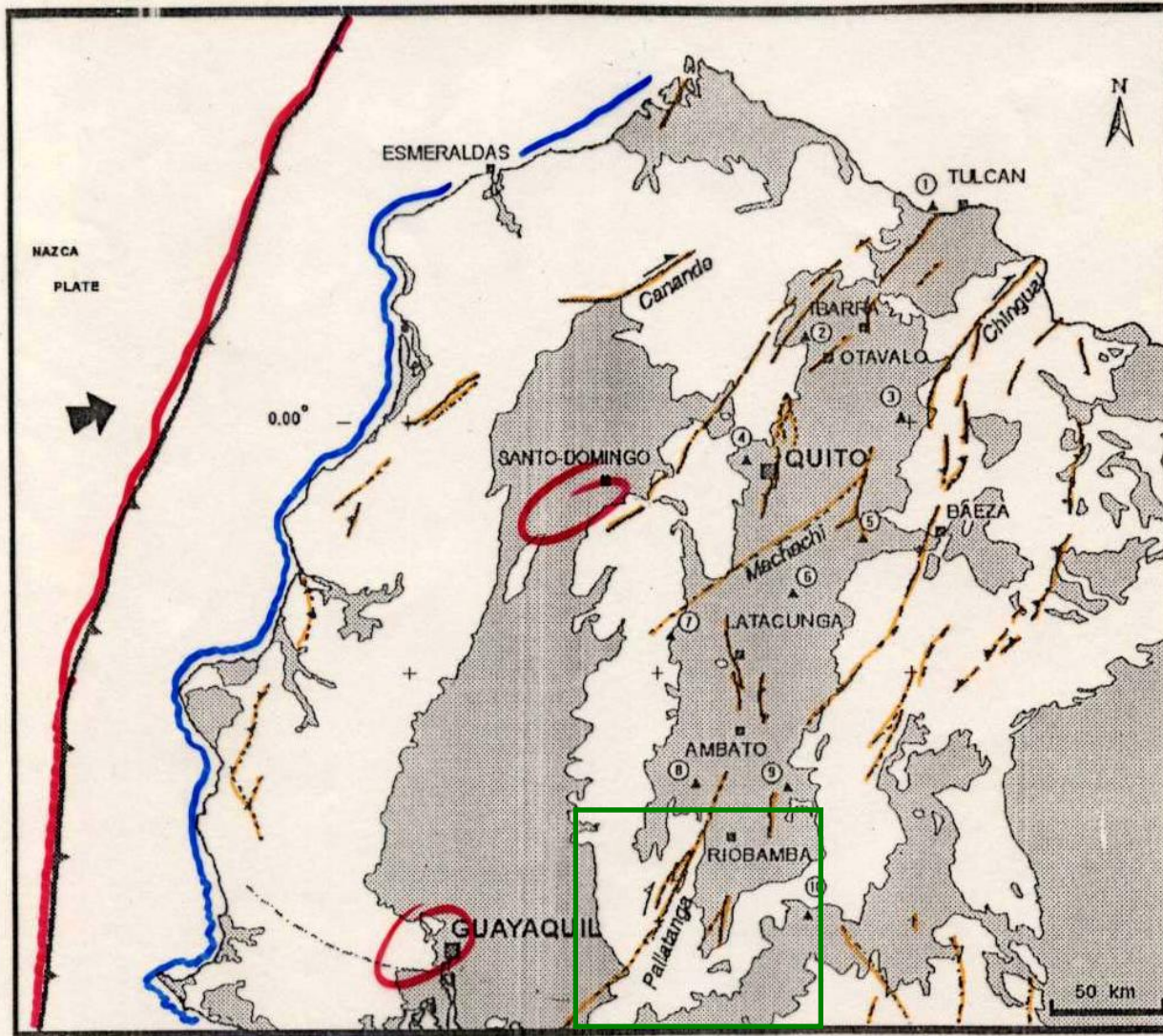
Epicentro del Terremoto de Bahía de Caráquez



Imagen de satélite de Malasia

Observación de lineamientos debido a fallas activas

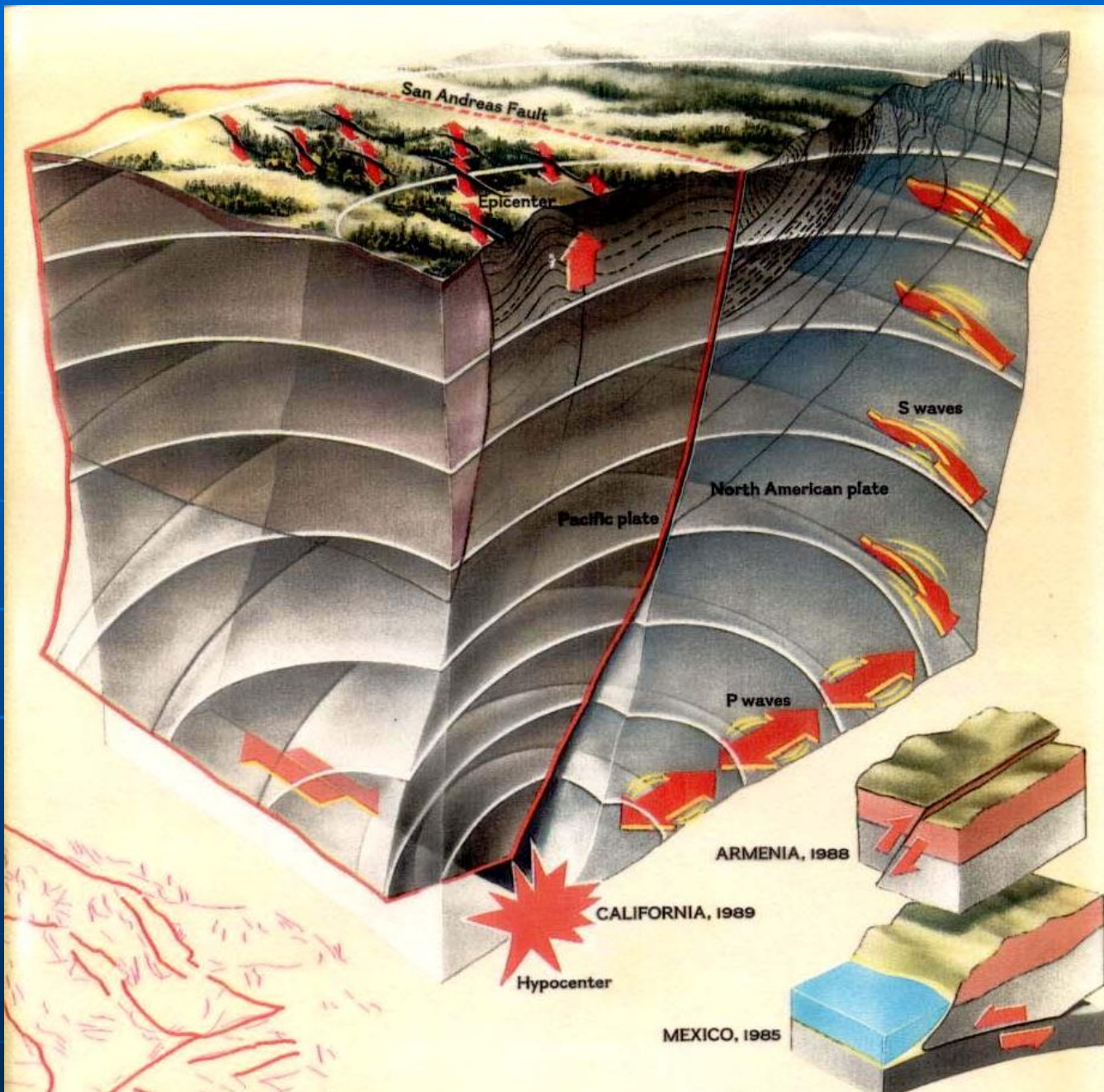
Fig. 1: Mapa neotectónico del Centro y Noroeste del Ecuador (compilación en proceso en el Instituto Geofísico de la E.P.N.)



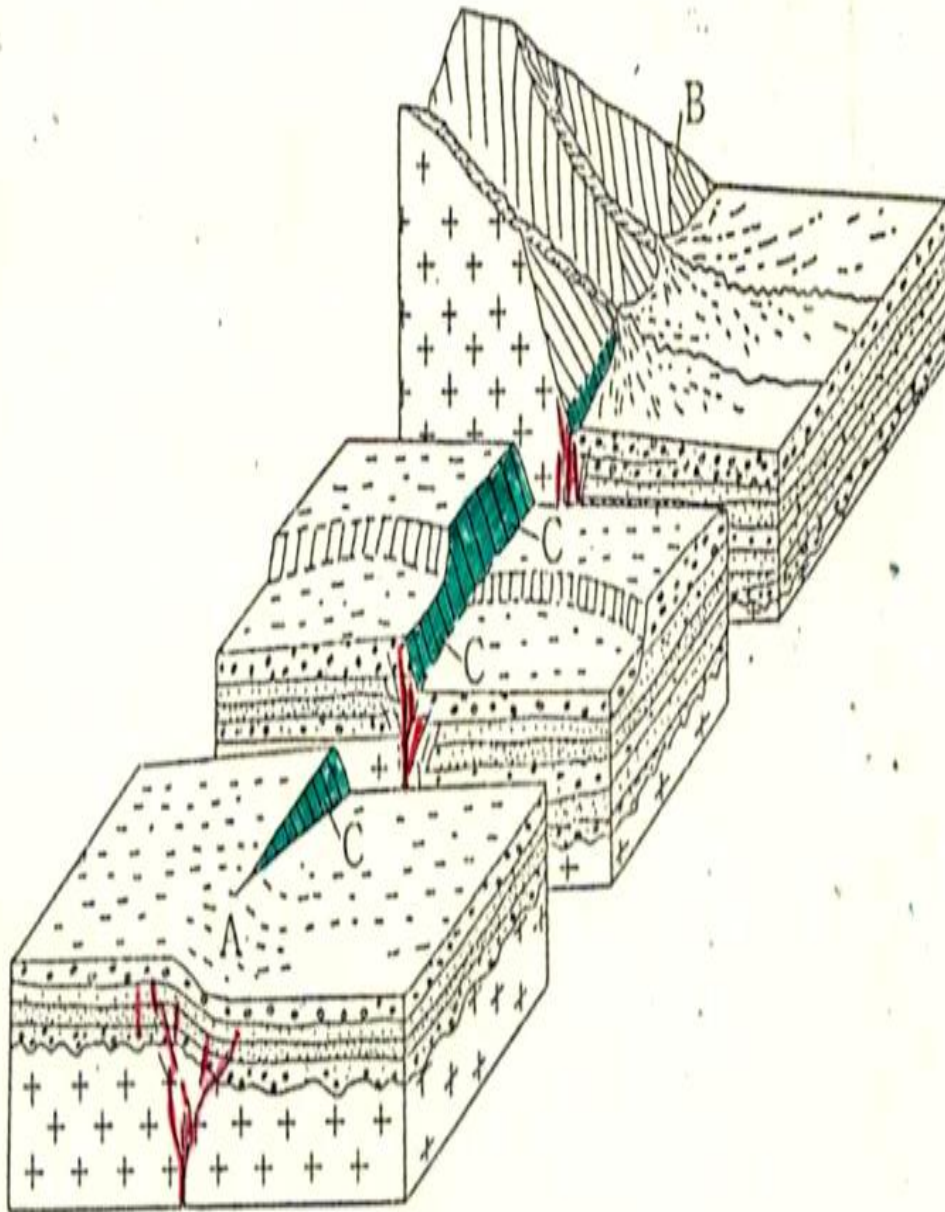
Plio-Cuaternario ▲ Volcanes (1: Chiles, 2: Culebcha, 3: Cayambe, 4: Pichincha, 5: Antillana, 6: Cotopaxi, 7: Quitotoa, 8: Chimborazo, 9: Tungurahua, 10: Sangay)

Fallas Dextrales Senestrales

Mapa de Ubicación de las Principales Fallas Activas del Ecuador por: Soulas

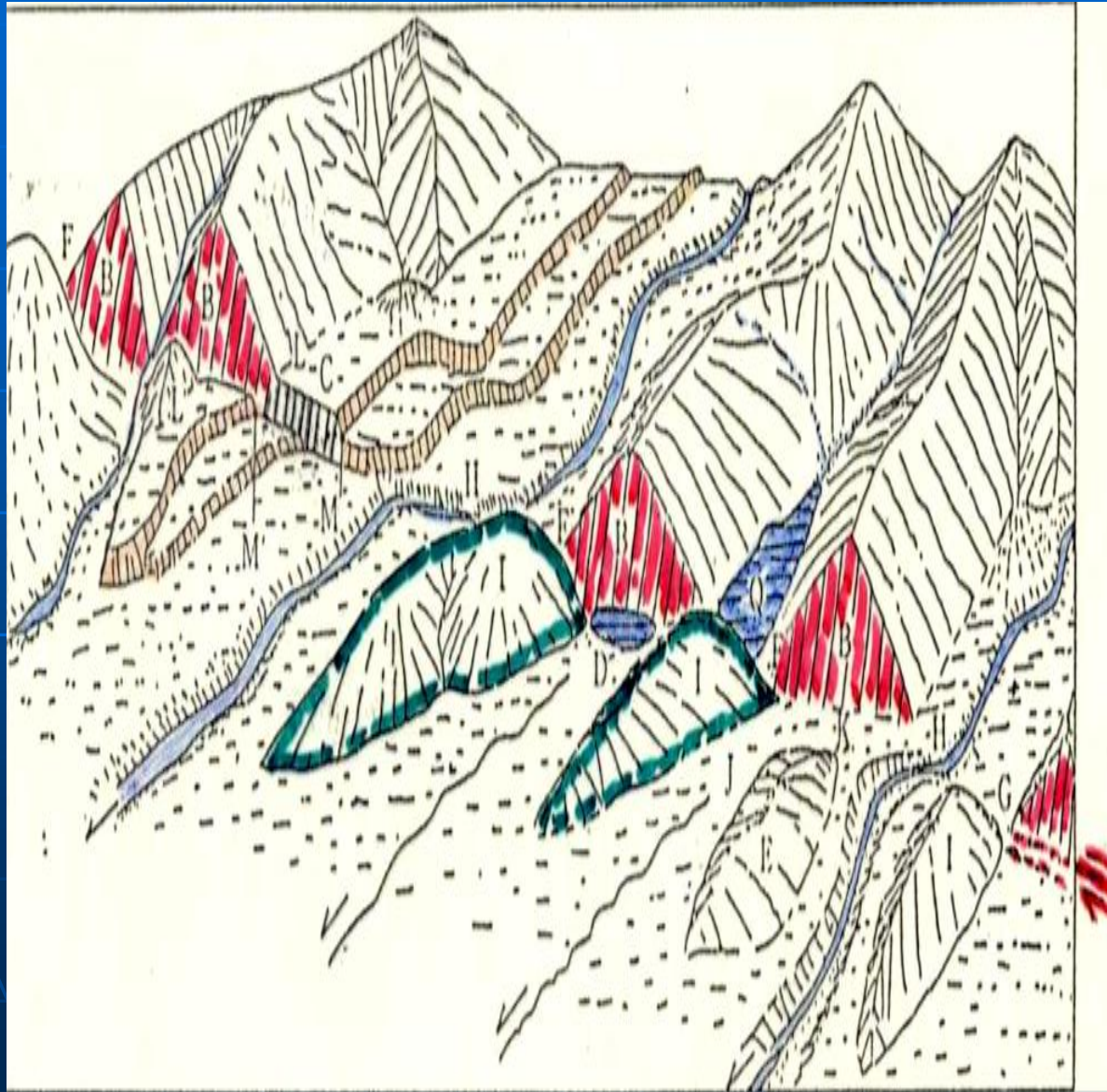


Hipocentro y desplazamiento de las ondas sísmicas



Formas
Topográficas
Asociadas a
Fallas Activas

Formas Topográficas Asociadas a Fallas Activas



Métodos de identificación y delineación de fallas activas.

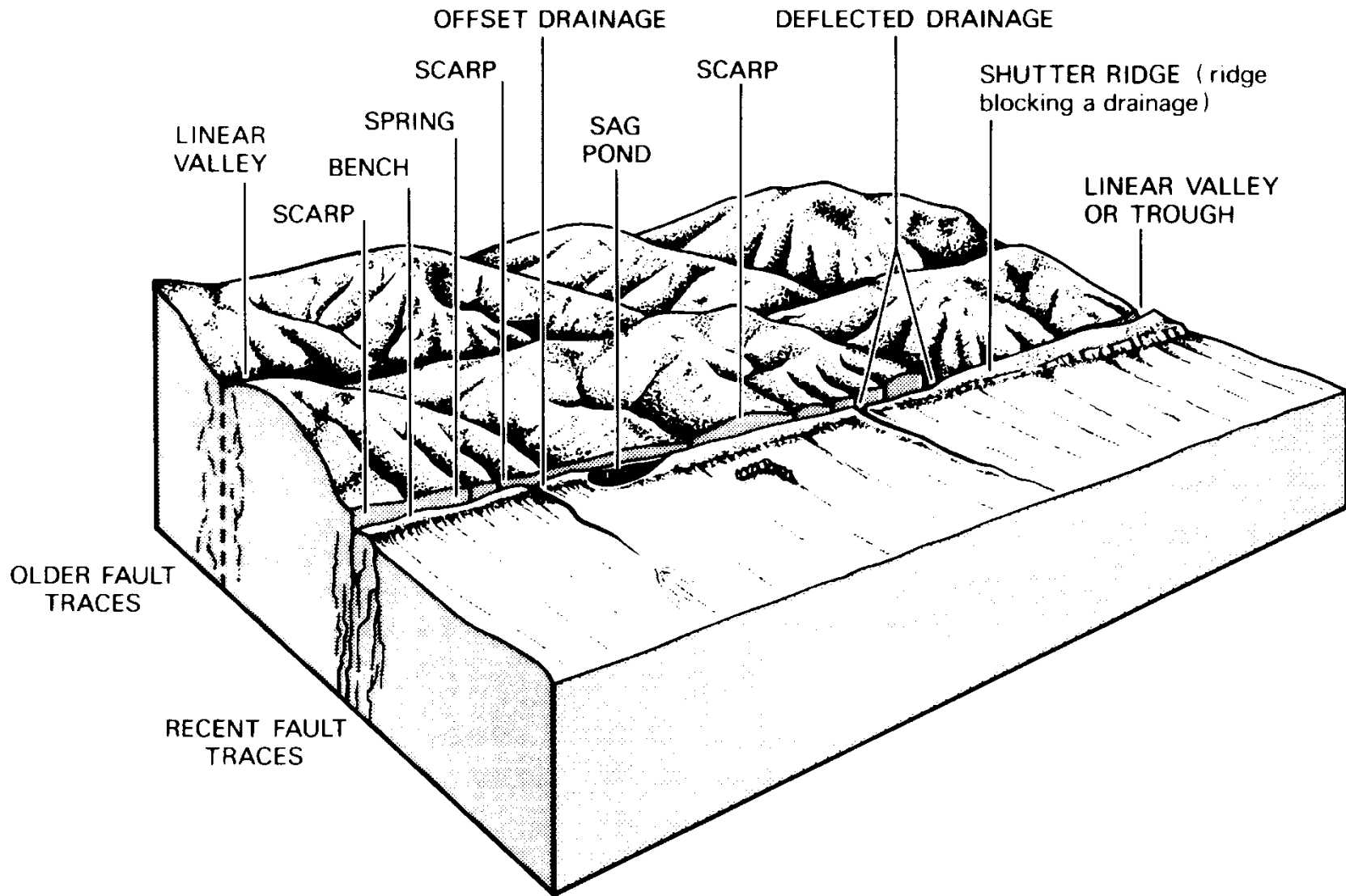
- **Geológicos.** Hasta 1950 énfasis en estructuras antiguas. Reactivación de fallas. Técnicas de calicatas.
- **Teledetección.** Detección de escarpes mediante iluminación adecuada. Con imagen radar existe penetración en el suelo. No hay obstáculos de visión.
- **Geofísicos.** Alineación de sismicidad. Imagen de fallas no visibles. Estudios de detalle de reflexión (COCORP). Estudios gravimétricos en zonas extensivas. Estudios magnéticos y aeromagnéticos.
- **Geomórficos.**
- **Geodésicos.** Nivelación. GPS.

Santa Cruz Analquito- Jerusalén



Panamericana en Cojutepeque



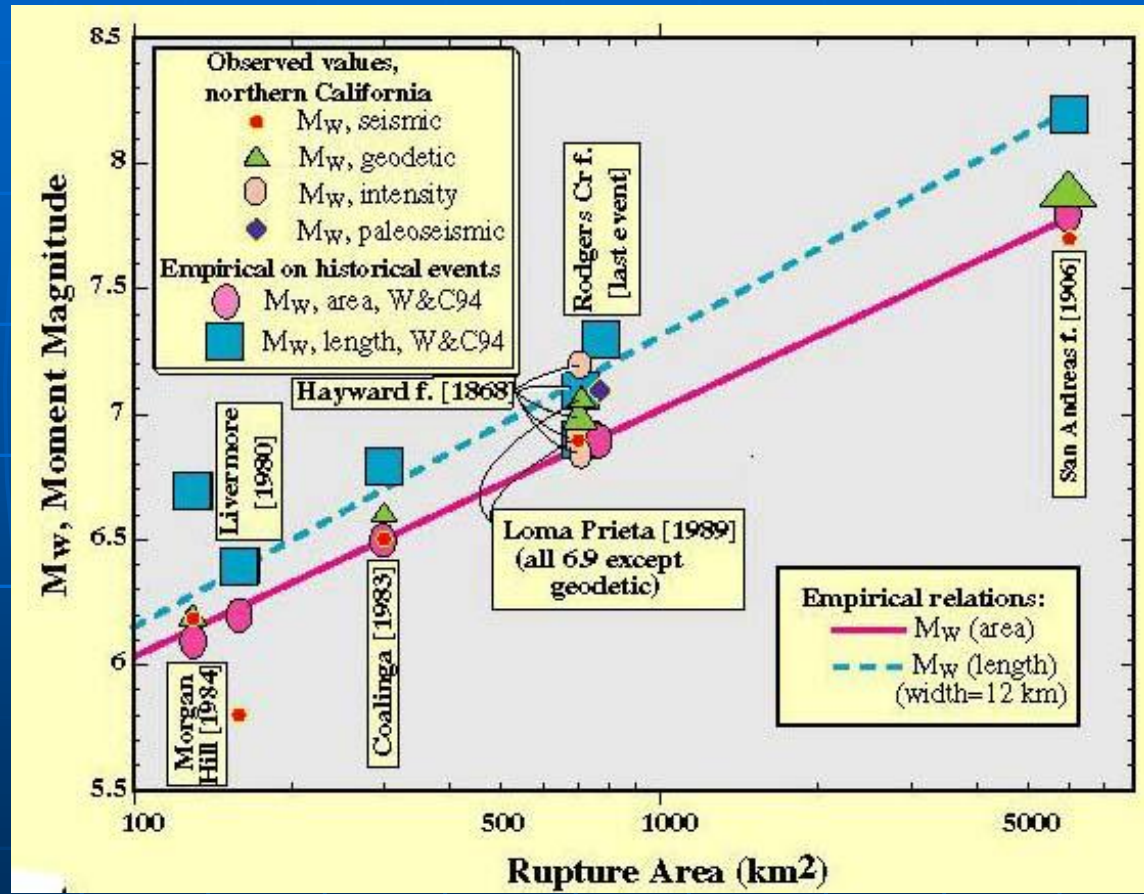


Definición de *falla capaz* según la NRC de EEUU

Se considera *falla capaz* si presenta al menos una de las siguientes características:

- Movimiento detectado en superficie en los últimos 35.000 años o movimiento recurrente en los últimos 500.000 años.
- Macrosismicidad instrumental de precisión que demuestre una relación directa con la falla.
- Una relación estructural con la falla capaz, definida según alguna de las dos anteriores características, tal que el movimiento en ella pueda ser inducido en la otra.

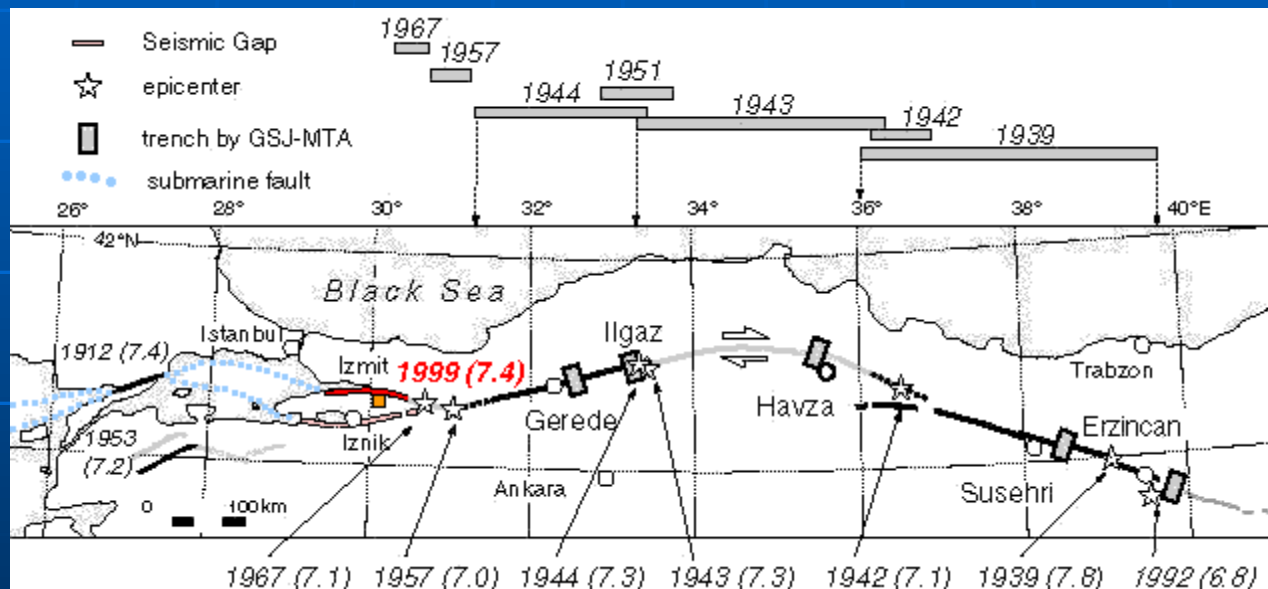
Correlaciones de falla y magnitud



Algunas correlaciones según Wells y Coppersmith

- $M = 5.08(0.10) + 1.16(0.07) * L$
- $L = -3.22(0.27) + 0.69(0.04) * M$
- $M = 4.07(0.06) + 0.98(0.03) * \log(\text{Área de ruptura})$
- $\log(\text{Área de ruptura}) = -3.49(0.16) + 0.91(0.03) * M$

Segmentación de una falla: Es la identificación de los segmentos individualizados con el mismo carácter, continuidad y orientación.



Recurrencia de terremotos:

El tiempo entre dos rupturas consecutivas de un mismo segmento de falla.

- ***Modelo de Reid*** perfectamente periódico.
- ***Modelo de tiempo predecible.*** Cada sismo ocurre a un nivel crítico de esfuerzos, aunque la caída de esfuerzos (deslizamiento) puede variar.
- ***Modelo de tamaño predecible*** este caso el deslizamiento se puede determinar a partir del tiempo de ocurrencia del anterior, pero no el momento de ocurrir.

Modelos de recurrencia según el valor del deslizamiento.

- **Modelo de deslizamiento variable.** El deslizamiento en un punto y la longitud de ruptura varia de sismo a sismo. Se mantiene constante la tasa de deslizamiento. Tamaño variable de terremotos.
- **Modelo de deslizamiento uniforme.** El deslizamiento en un punto y la longitud de ruptura es constante. Se mantiene constante la tasa de deslizamiento. Tamaño constante de terremotos grandes y frecuentes terremotos pequeños.
- **Modelo de terremoto característico.** El deslizamiento en un punto y la longitud de ruptura es constante. Varía la tasa de deslizamiento. Tamaño constante de terremotos grandes e infrecuentes terremotos pequeños

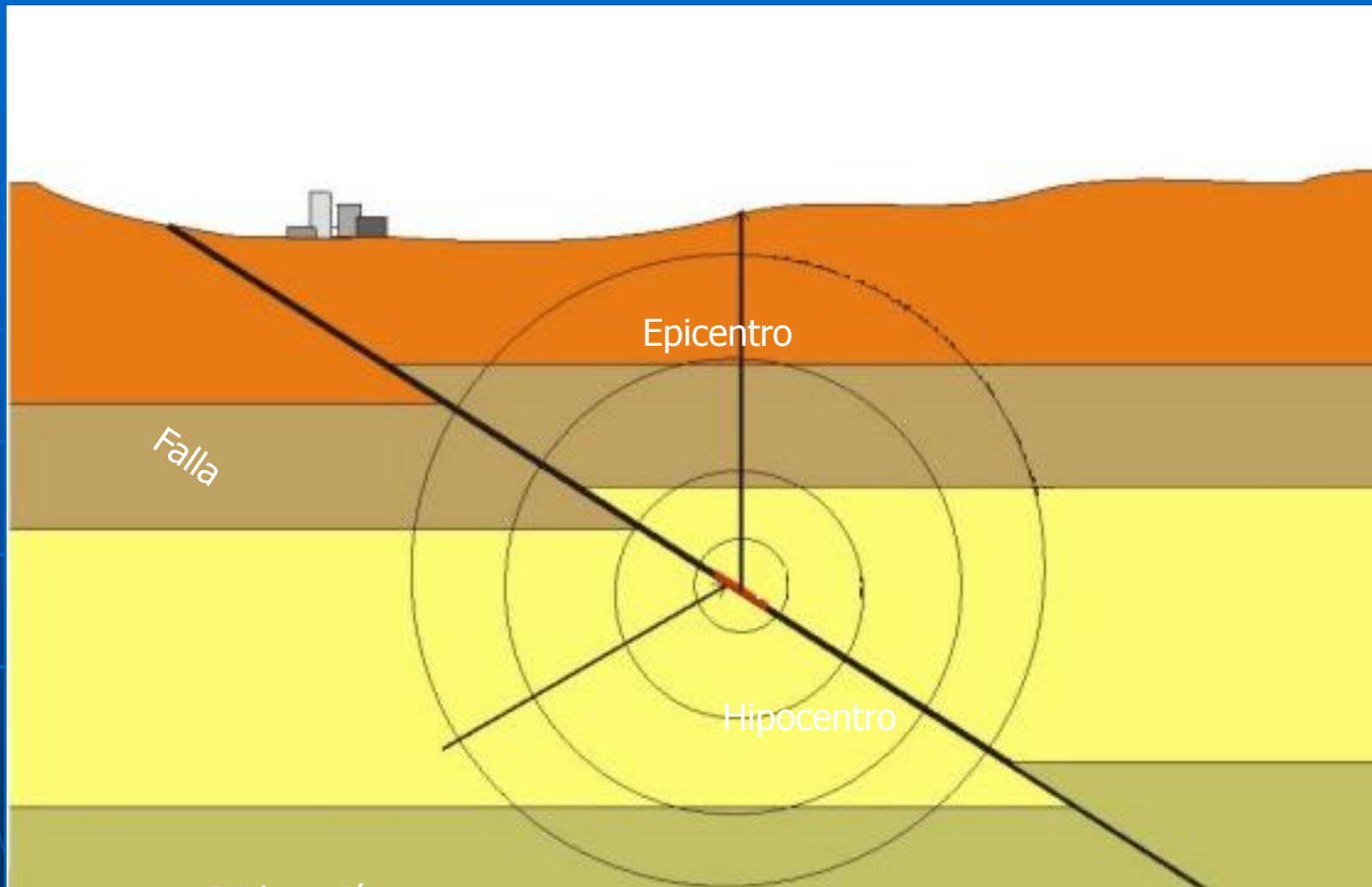
Asignación de probabilidad de sismogénesis de una estructura

MATRIX OF PHYSICAL CHARACTERISTICS

ASSOCIATION WITH SEISMICITY GEOMETRY RELATIVE TO STRESS I SENSE OF SLIP DEEP CRUSTAL ASSOCIATION	MODERATE TO LARGE EARTHQUAKES		SMALL EARTHQUAKES ONLY		NO SEISMICITY	
	Favorable	Unfavorable	Favorable	Unfavorable	Favorable	Unfavorable
	YES	0.80	0.40	0.30	0.10	0.060
NO	0.64	0.20	0.15	0.05	0.024	0.004

La fuente sísmica.

Modelización



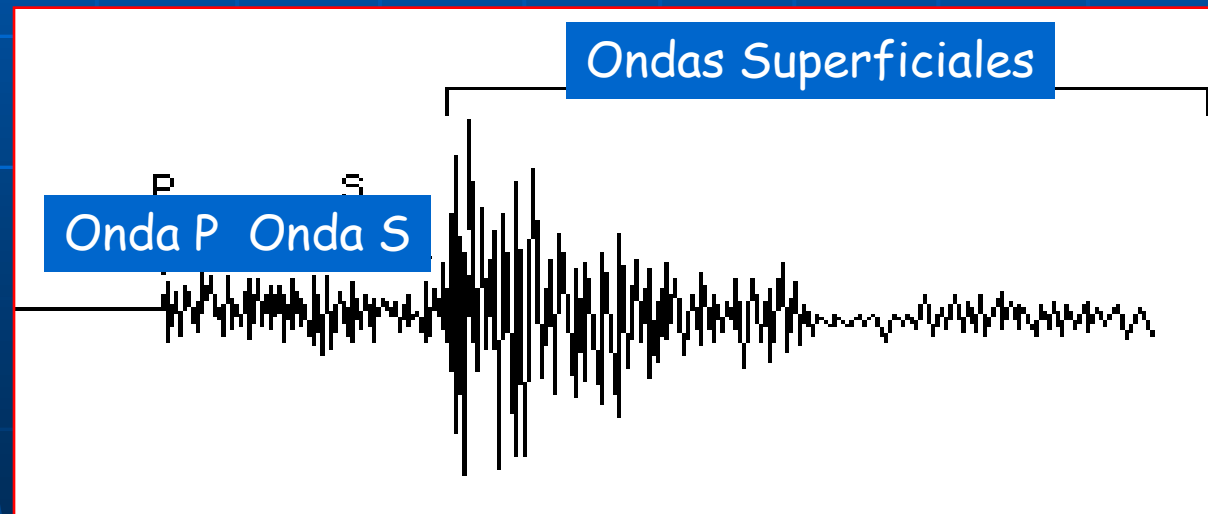
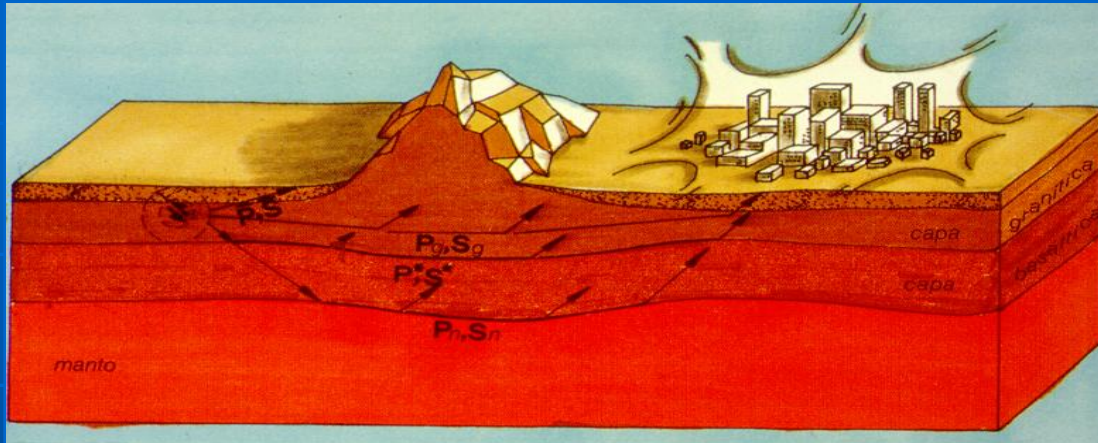
Falla

Epicentro

Hipocentro

Dislocación

A partir del foco o hipocentro las ondas se transmiten y son registradas.





Instrumento

I

Efecto local

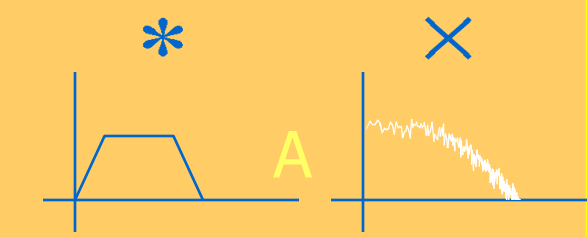
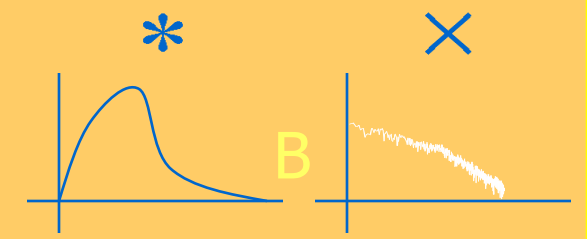
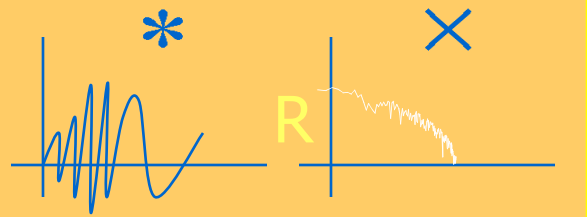
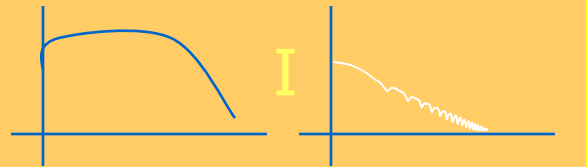
R

B

Atenuación del medio

A

Fuente



I

R

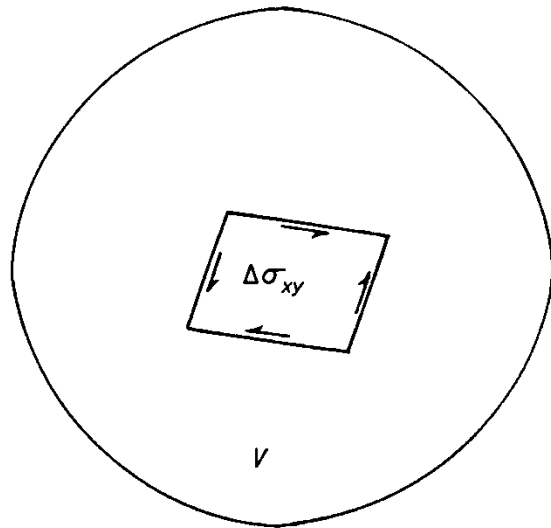
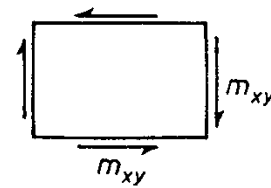
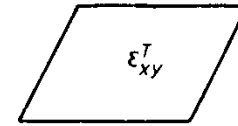
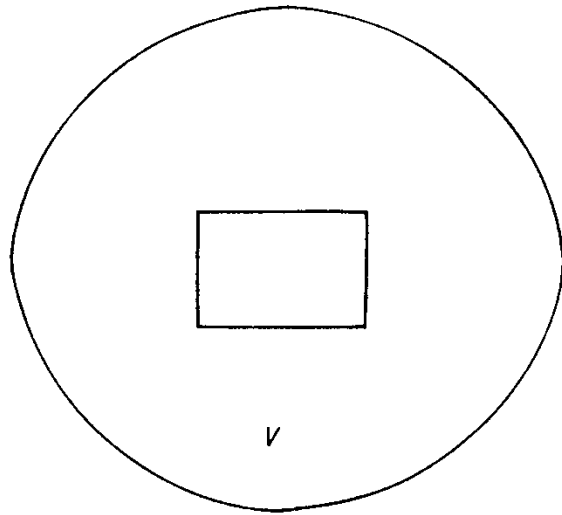
B

A

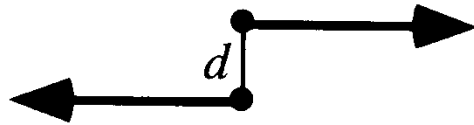
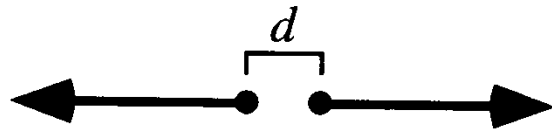
X

X

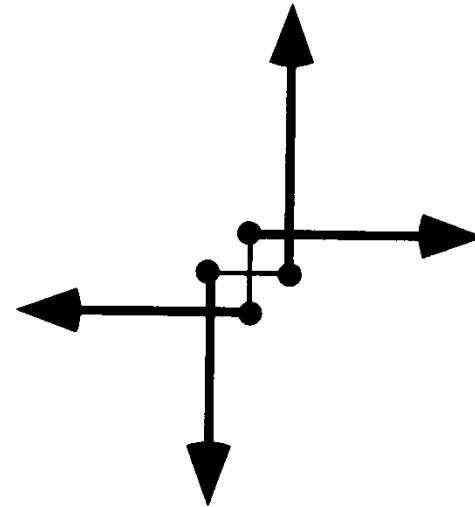
X



Ejemplos de pares y doble par de fuerzas

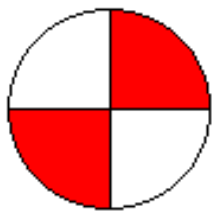


Force Couples

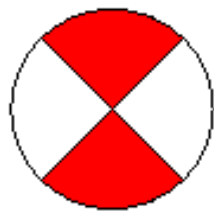


Double Couple

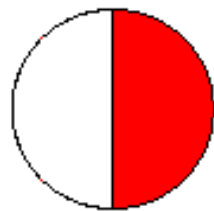
Elementary Moment Tensors



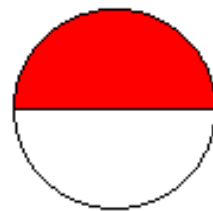
M1



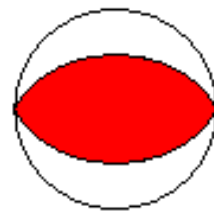
M2



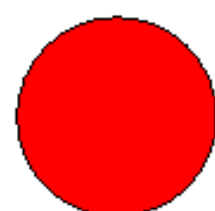
M3



M4

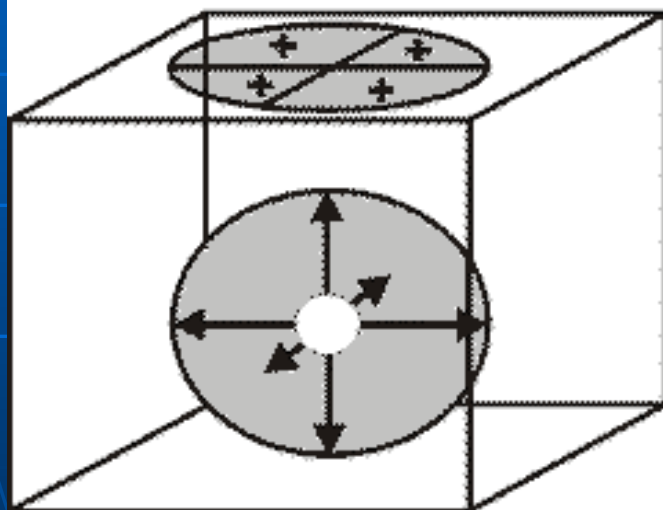


M5



M6

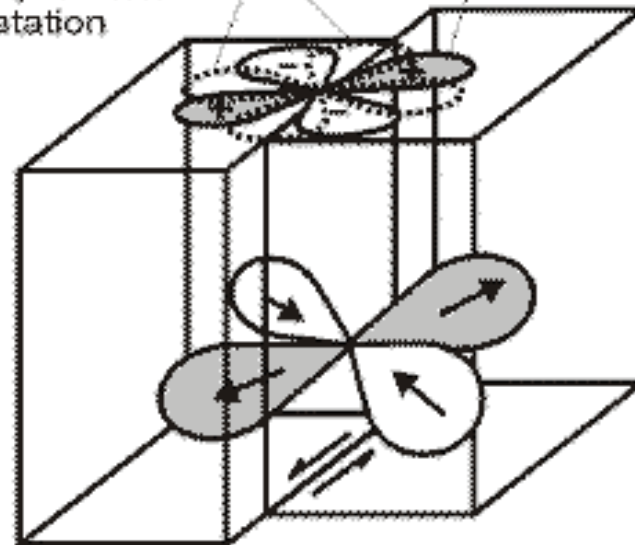
Explosion



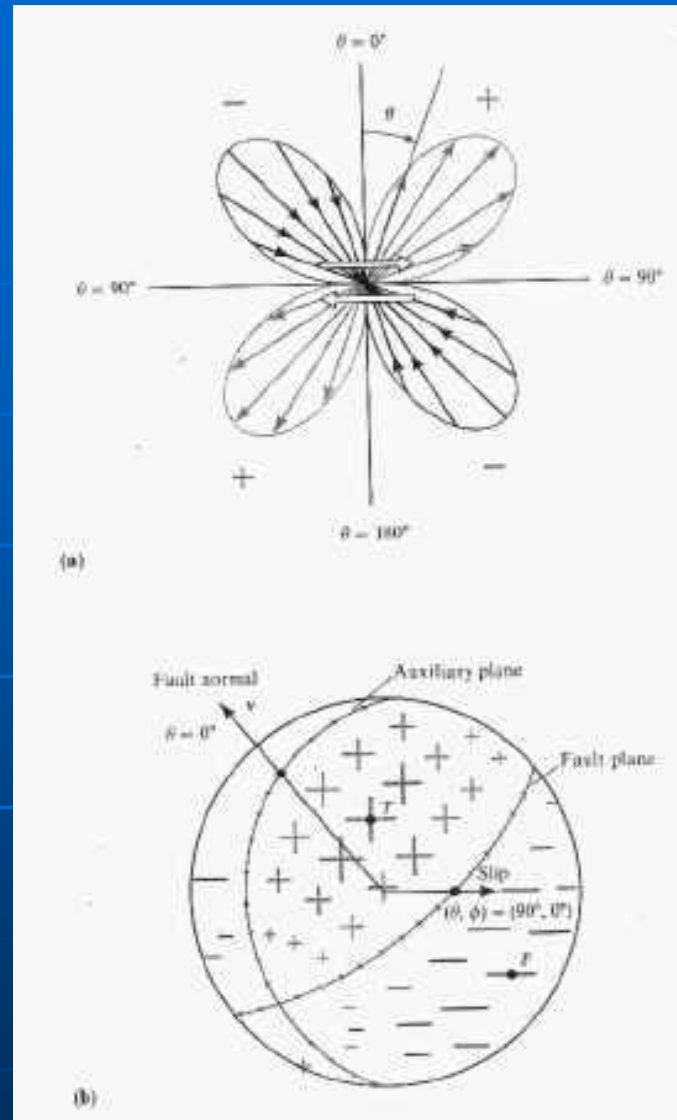
+ Compression
- Dilatation

Earthquake (pure strike-slip)

SH- & LOVE-waves P- & Rayleigh-waves

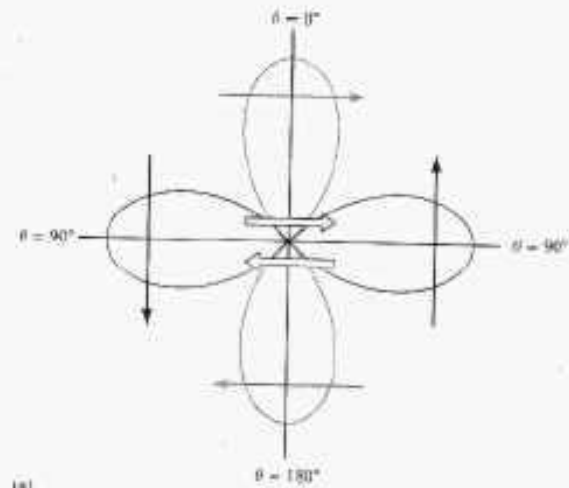


Cuadro de radiación de P para un doble par de fuerzas.

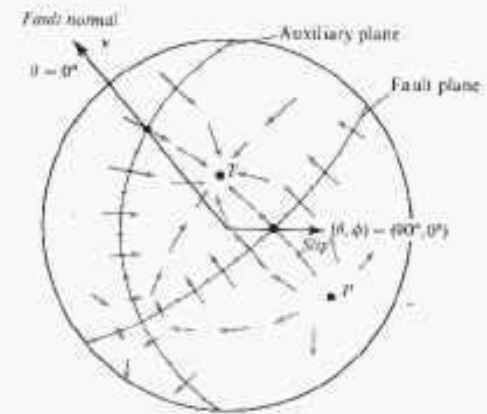


El cuadro de radiación sobre una esfera.

Cuadro de radiación para la onda S.



(a)

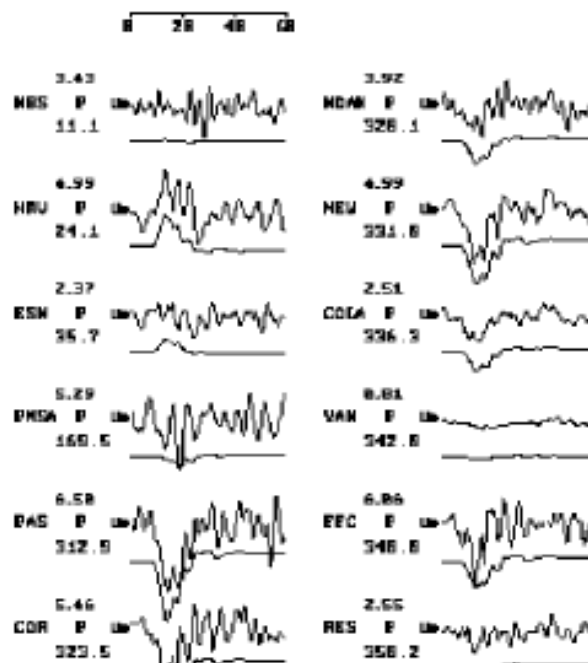
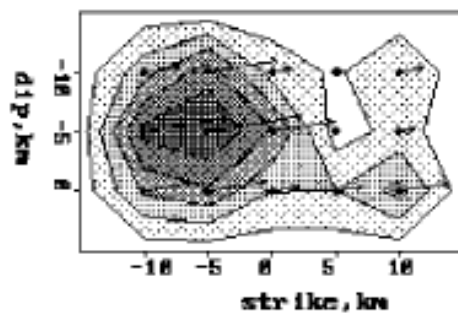
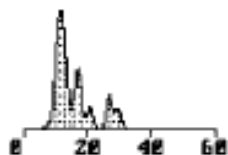


(b)

El Salvador 01/02/13 Ms 6.6

$M_0 = 6.8 \times 10^{18}$ Nm $M_w = 6.5$

$H = 5-15$ km $T = 16$ s $var. = 0.4963$



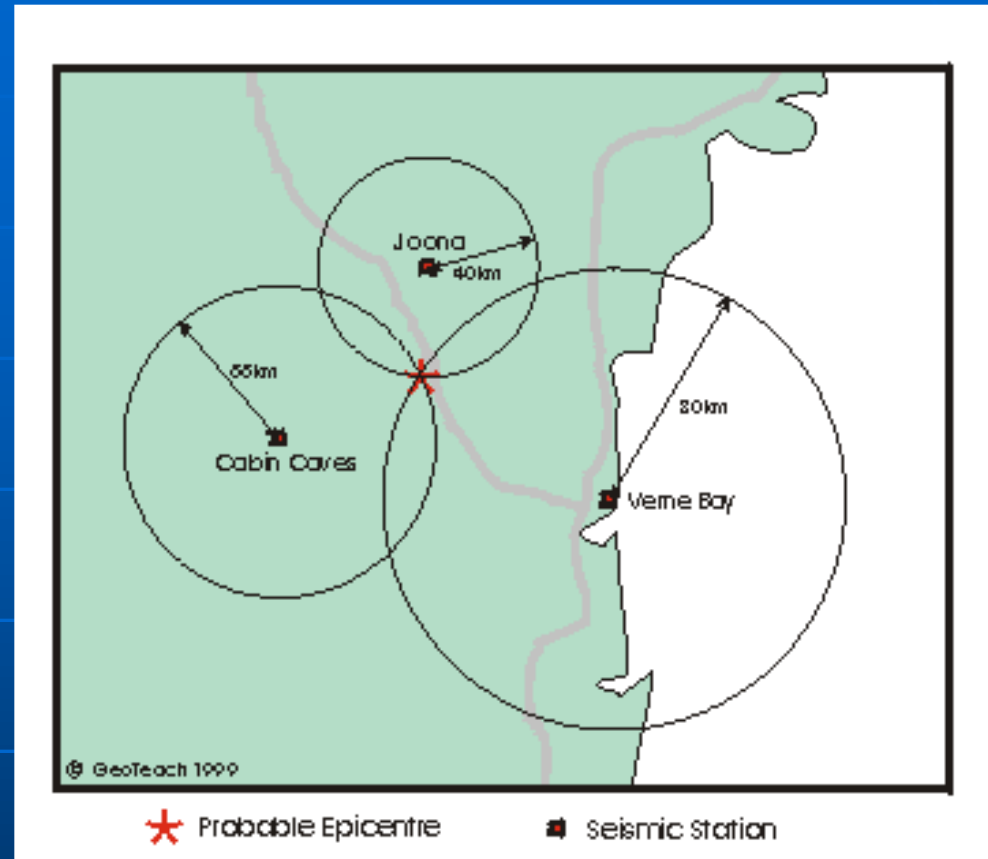
Localización

- Terremoto Histórico.
 - Si se dispone de mapa de isosista se estudia la zona de mayor intensidad. Se asigna el epicentro al punto de mayor valor.
 - Si se dispone de información de replicas, el área encerrada por ellas delimitan el epicentro.
 - Si solo se dispone del valor de la intensidad máxima, este será el epicentro.
 - Error. Oscila entre $\pm 50-60$ Km. a $\pm 5 -10$ Km..

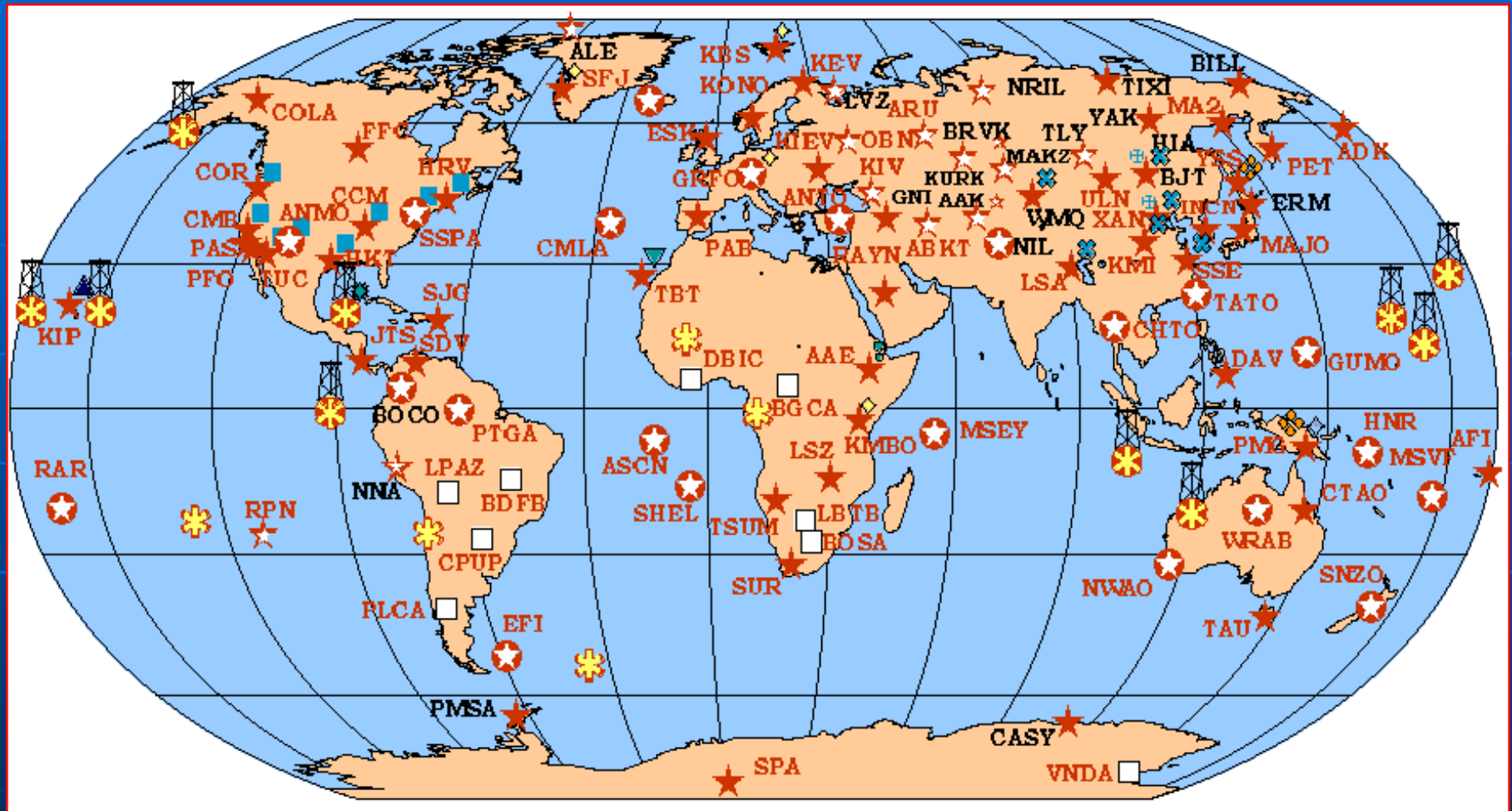
Isosístas de terremoto de Bahía de Caráquez



Con los datos de los tiempos de llegada de las distintas ondas sísmicas procedentes de un terremoto a cada una de las estaciones de la red se obtiene la distancia epicentral. Por intersección obtenemos las coordenadas epicentrales.



Red Sísmica Mundial



**MODIFIED
MERCALLI**

I
II
III
IV
V
VI
VII
VIII
IX
X
XI
XII

**ROSSI
FOREL**

I
II
III
IV
V
VI
VII
VIII
IX
X

JMA

I
II
III
IV
V
VI
VII

**MERCALLI
CANCANI
SIEBERG**

II
III
IV
V
VI
VII
VIII
IX
X
XI
XII

**MEDVEDEV
SPONHEUER
KARNIK**

I
II
III
IV
V
VI
VII
VIII
IX
X
XI
XII

Magnitud local de Richter M_L

- Originalmente diseñada para el Sur de California.
- Se utilizó un instrumento Wood-Anderson de $T_S=0.8s$, amortiguamiento de 0.8 y Amplificación máxima de 2800.
- Se midió sobre la onda máxima del registro.
- Se definió así: $M_L = \log A_{\max} - \log A_0$
siendo A_0 la amplitud máxima en mm registrada por el instrumento de un terremoto de $M_L=0$ a una distancia variable entre 0-600 km.
- Hasta 1944 hay una sobreestimación de los valores.
- Desde 1975 hay una disminución del umbral de detección.
- Se ha extendido esta definición a numerosas áreas sísmicas en diferentes países.

Magnitud de ondas Superficiales M_S

- Para distancias grandes, el registro de un sismo esta dominado por las ondas superficiales.
- Gutenberg y Richter en 1936 desarrollaron una formula de magnitud basada en la amplitud de las ondas de Rayleigh con periodo de 20s.

$$M_S = \log A + 1.66 \log D + 2.0$$

donde A es el desplazamiento máximo en micrones
D es la distancia epicentro-estación en grados.

- M_S esta basada en desplazamiento máximo, no depende del instrumento.
- Se utiliza para sismos superficiales y distancias a partir de 1000 km.

Magnitud Momento M_W

- Para evitar saturación de las escalas de magnitud que se produce en los siguientes valores: M_L entre 6-7, M_b entre 7-8 y M_s superior a 8.
- Kanamori (1977) propuso una magnitud que no dependiese del grado del movimiento del suelo al paso de las ondas. Esta basada en el Momento sísmico M_0

$$M_W = (\log M_0 / 1.5) + 10.7 \quad \text{siendo } M_0 \text{ en din.cm}$$

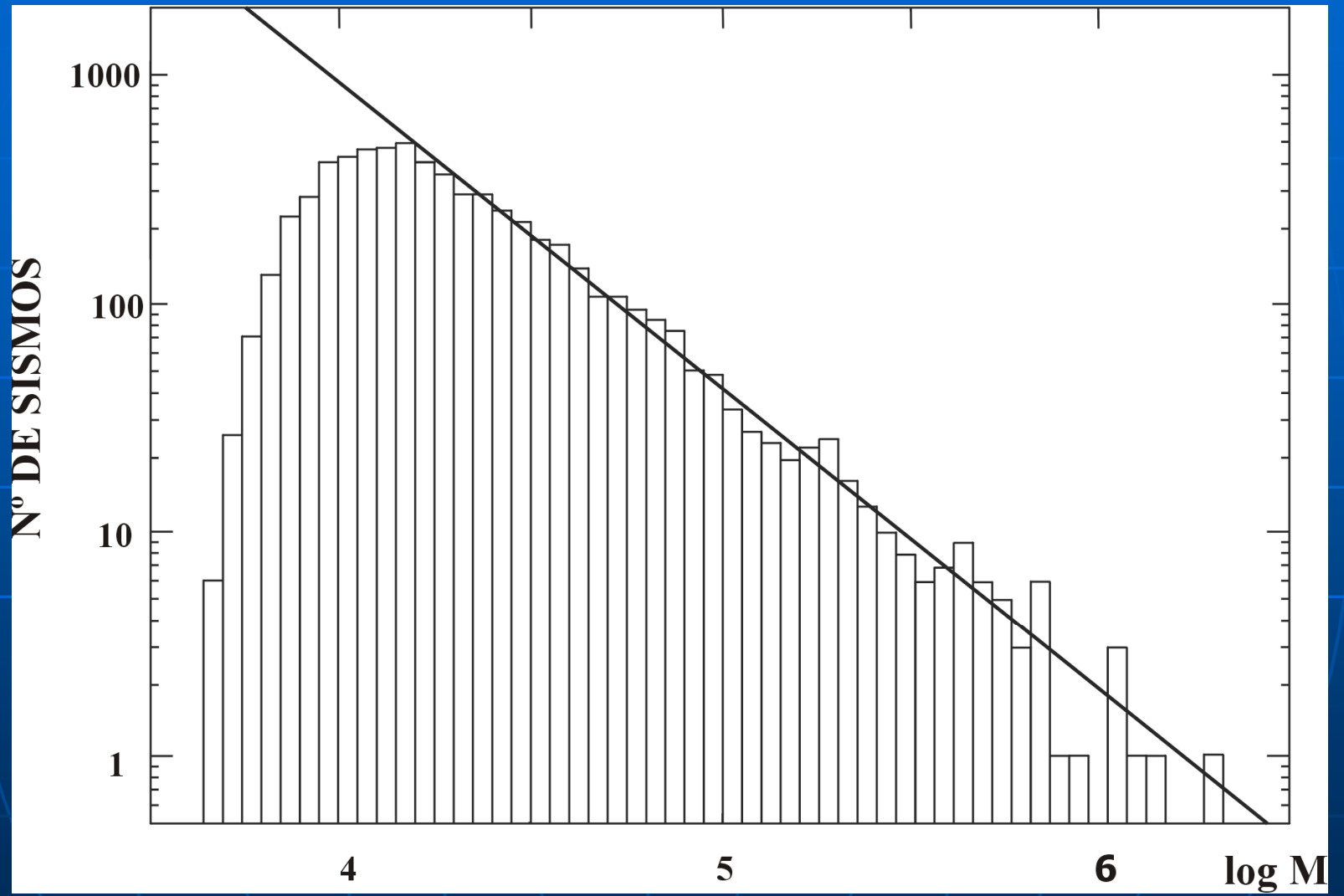
Se denomina también **M**

Distribución de sismos por tamaño

- Distribución Gutenberg-Richter

$$\log_{10} N = a - b \cdot M$$

siendo N el número de sismos con magnitud M .



Distribución espacial de terremotos.

- Distribución de epicentros de una zona.
 - Diferenciación de periodos por su precisión. Históricos, instrumentales para distintos periodos de tiempo, etc.
- Distribución de hipocentros de una zona.
 - Diferenciación continua de profundidad en planos en los que se proyecta la sismicidad de un cierto volumen.
 - Distribución de epicentros correspondientes a intervalos amplios de profundidad.

La Peligrosidad Sísmica

es la *cuantificación de la amenaza de terremotos* en un emplazamiento como consecuencia de los fenómenos primarios y secundarios que acompañan a un terremoto.

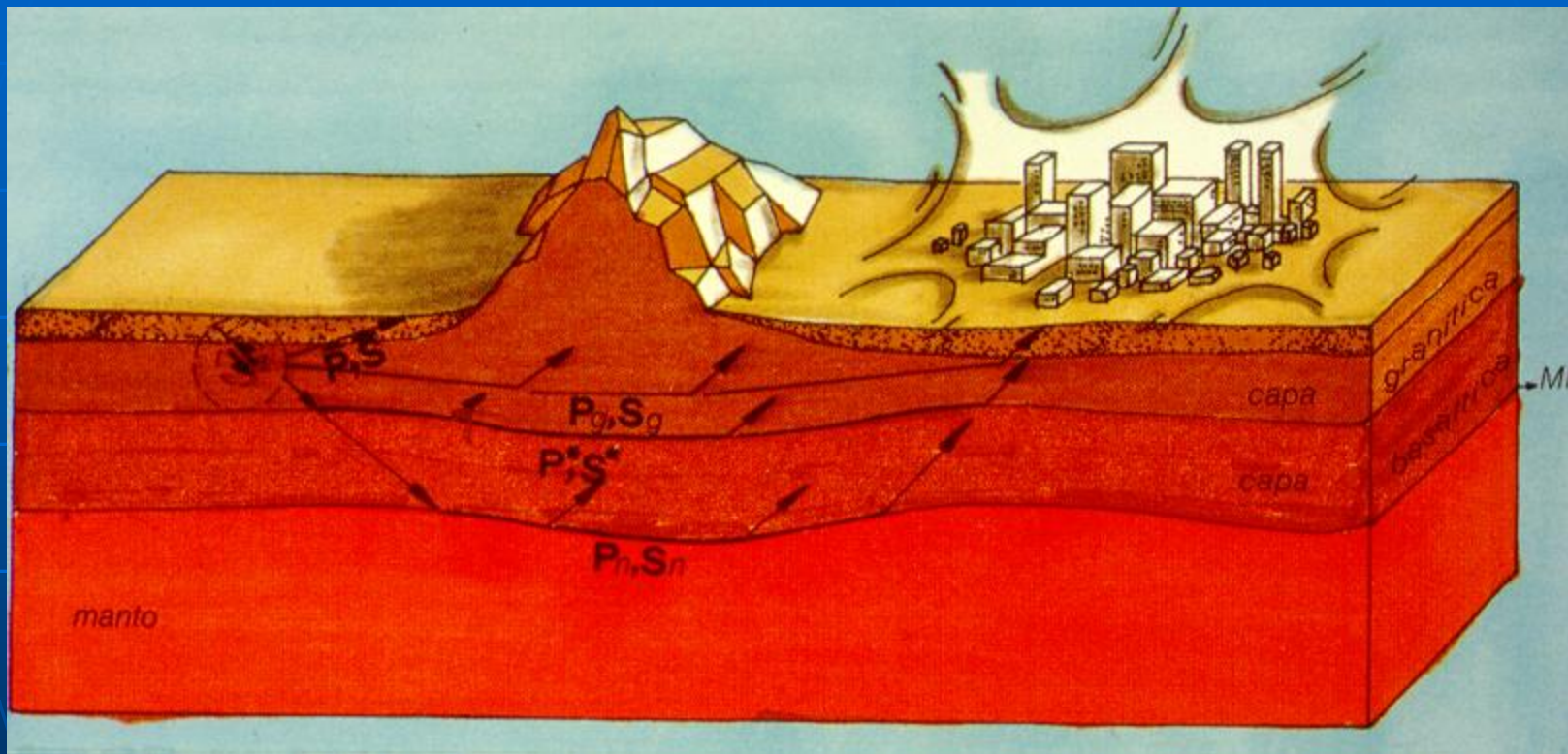
Fenómenos asociados al sismo

■ Primarios

- Rotura del terreno.
- Deformación tectónica.
- Vibración producida por las ondas sísmicas

■ Secundarios

- Asentamiento de cimentaciones.
- Licuefacción.
- Movimiento de taludes.
- Tsunami.



Peligrosidad Sísmica VS. Riesgo Sísmico

- **Peligrosidad Sísmica**. Es la cuantificación de cualquier fenómeno (móv. del suelo, licuefacción, etc.) asociado con un terremoto que puede producir daño a las actividades del hombre. Se expresa, generalmente como la probabilidad de que el fenómeno sísmico se produzca.
- **Riesgo sísmico**. Es la cuantificación de las consecuencias sociales y económicas (vulnerabilidad) que puede producir un terremoto, expresado en función de la probabilidad de superación cierto valor durante un periodo de tiempo

Riesgo Sísmico = Peligrosidad Sísmica X Vulnerabilidad

Formas de obtener la Peligrosidad sísmica .

- Método no paramétrico.
 - No utiliza concepto de falla tectónica.
 - Utiliza la sismicidad histórica.
 - Se considera la tasa histórica del mov.del suelo.

(Método histórico)

- Método deductivo.
 - Utiliza concepto de fuente sismogénica.

(Método determinista)

 - Utiliza además incertidumbres en los parámetros.

(Método probabilista)

Ejemplos de Análisis de la Peligrosidad Sísmica probabilista.

En función de la fuente sismogénica.

- Probabilidad anual de 0.08 de que se produzca un sismo >7 en la fuente E.
- El periodo de retorno de un terremoto >7 en fuente E es 12,5 años.
- Existe la probabilidad del 85% de que un sismo >7 se produzca en la fuente E en los próximos 25 años

En función del emplazamiento propuesto

- En el emplazamiento se ha obtenido una probabilidad anual de 0.004(ó 4 %) de una intensidad VI.
- En el emplazamiento se ha obtenido una probabilidad anual de 0.20 (ó 20 %) de que la aceleración máxima horizontal supere el valor de 0.15% g.

La Peligrosidad sísmica según los diferentes usuarios

- **Ingenieros especialistas en diseño antisísmico.**- ¿Cuál es el movimiento del suelo esperado o/y el espectro de respuesta?
- **Propietarios de instalaciones sensibles.**¿ Es la instalación segura?
- **Compañías de seguros.** ¿Cuál es la vulnerabilidad y las pérdidas económicas asociadas?
- **Protección Civil.** ¿Que escenarios se pueden dar para la interrupción de la seguridad publica?

Elementos que intervienen en el análisis de la peligrosidad sísmica

- Catalogo de **terremotos de la región** de estudio. Debe contener localización, fecha y tamaño.
- **Fuentes sismogénicas**: fallas y sus características (longitud, deslizamiento, etc.), áreas (profundidad de actividad).
- **Modelo de ocurrencia** para cada fuente.
- Ecuación para la **estimación del movimiento del suelo** a diferentes distancias.

Método Histórico

- Se considera el catalogo histórico de sismos.
- Cada sismo se traslada según una ley de atenuación al emplazamiento.
- Se obtiene la función de superación del movimiento del suelo, según cada sismo, en el emplazamiento.
- Se divide la función de superación, por el intervalo de tiempo, obteniéndose la tasa anual de superación.

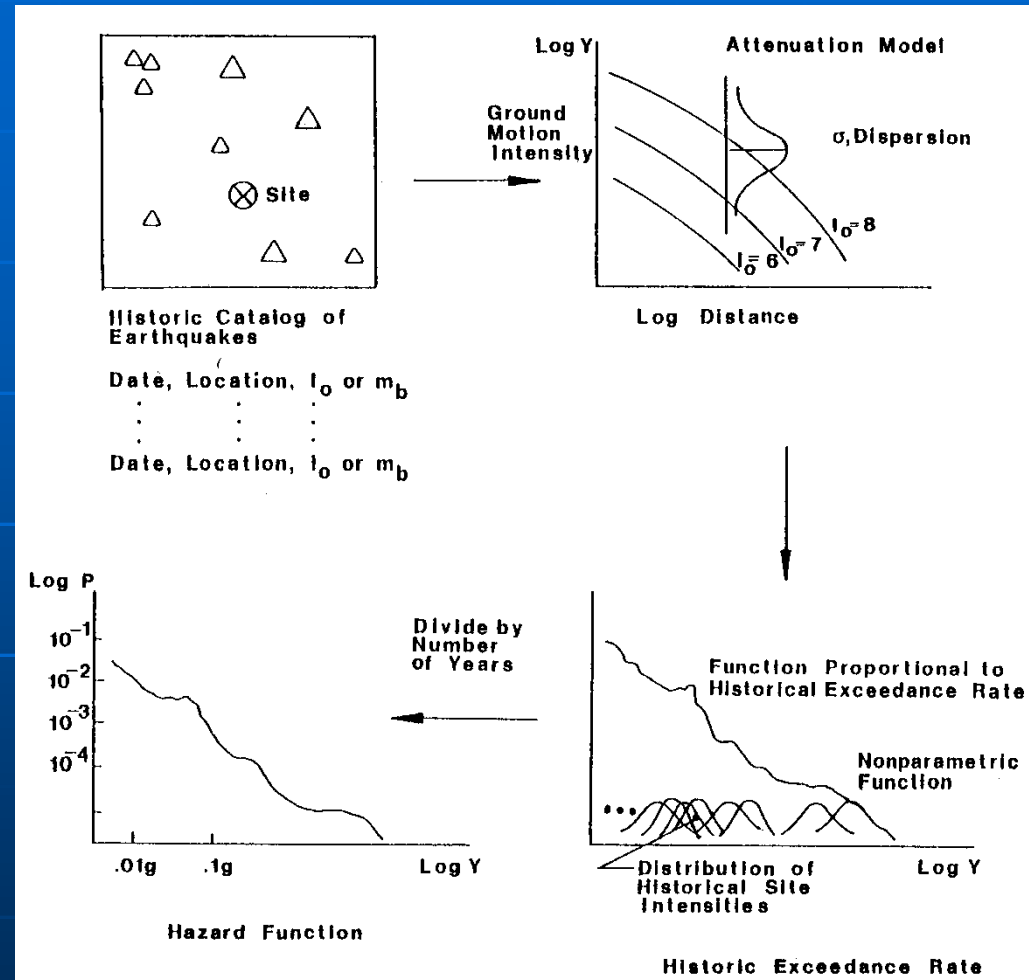
Método histórico

■ Ventajas

- No se necesita conocimiento de fuentes ni parámetros de sismicidad
- No es necesario hacer interpretaciones.
- Es un método probabilista.

■ Desventajas.

- No es valido para probabilidades anuales inferiores al inverso del periodo del catalogo.

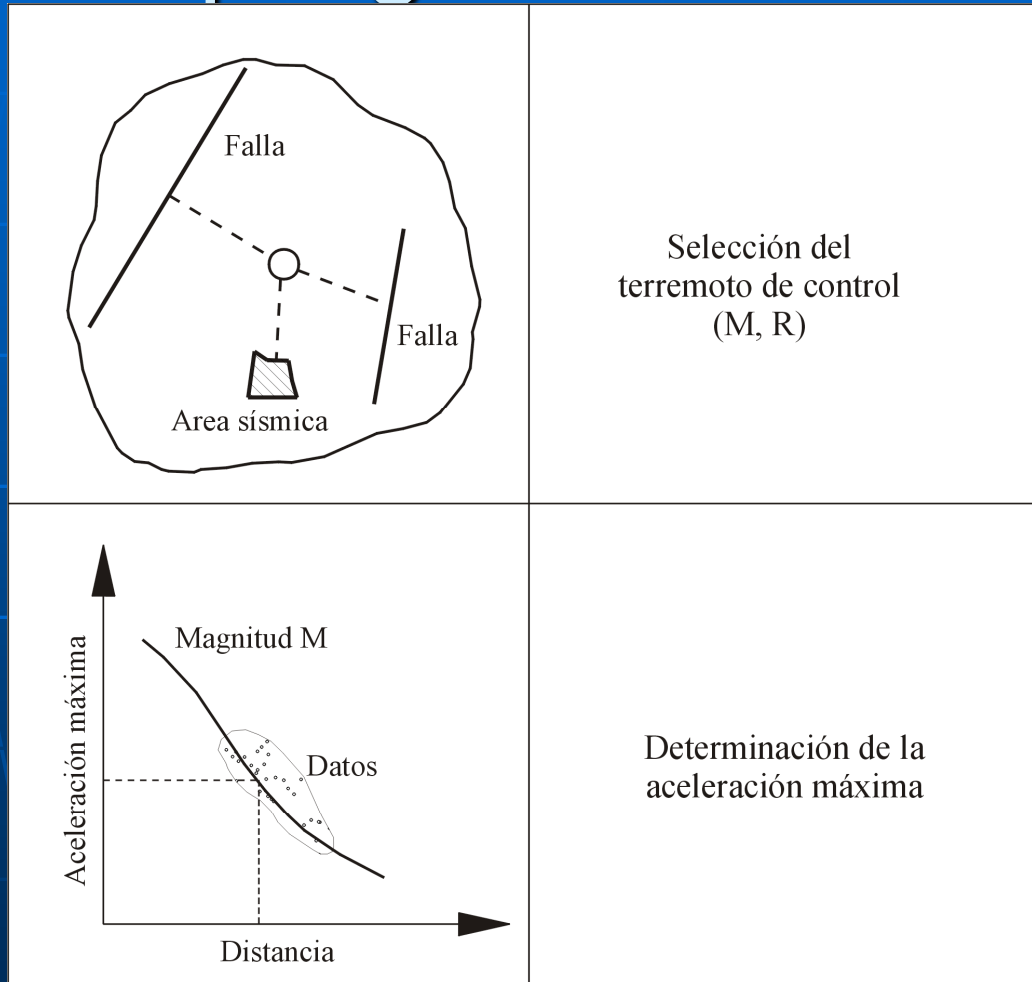


Análisis determinista de la Peligrosidad Sísmica

En este análisis se requiere el conocimiento de tres elementos básicos:

- Delimitación de la diferentes **fuentes sismógenas** que intervienen en el estudio.
- Selección dentro de cada fuente del **máximo terremoto** asociado, así como la **distancia mínima al emplazamiento** de estudio.
- Determinación del efecto (movimiento del suelo) de cada uno de estos sismos de control en el emplazamiento, mediante la **ecuación de atenuación.**
- Se define como Peligrosidad el peor efecto (movimiento del suelo mayor) que puedan inducir las distintas fuentes.

Esquema de Análisis determinista de la peligrosidad sísmica



Definición de fuentes sismogenicas

- **Fallas.** Debe especificarse su geometría, longitud de ruptura, sentido de deslizamiento, segmentación, etc.
- **Áreas.** Cuando existe dificultad de identificación de fallas, o no son observables, se recurre a áreas donde los terremotos, de carácter similar, pueden producirse.
- Las fuentes definidas han de caracterizarse también por tener:
 - los terremotos estén distribuidos espacialmente con la misma probabilidad.
 - los terremotos tengan una única distribución estadística de magnitud.
 - los terremotos sean independientes entre sí.

Características de las fuentes sismogénicas

- los terremotos estén distribuidos espacialmente con la misma probabilidad.
- los terremotos tengan una única distribución estadística de magnitud.
- los terremotos sean independientes entre sí

¿Incertidumbre en los datos ?

Análisis Probabilista de la peligrosidad sísmica (APPS)

- Existe incertidumbre en la localización del futuro terremoto.
- Existe incertidumbre en la magnitud de los terremotos que se puedan producir.
- Existe incertidumbre en la estimación del movimiento del suelo que inducirá esa futura actividad sísmica.

Modelo de distribución de magnitudes.

- La relación empírica de Gutenberg-Richter :

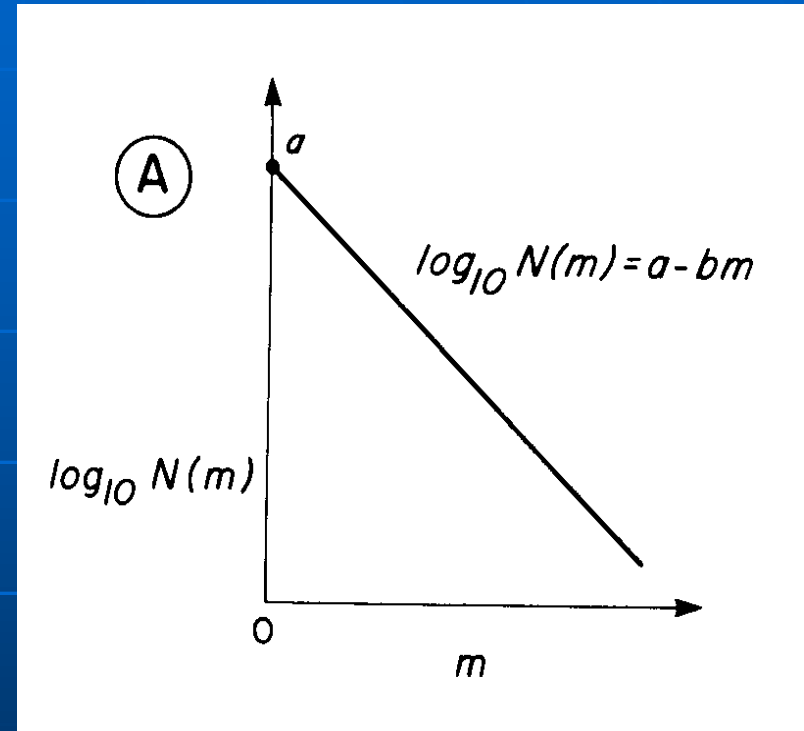
$$\log_{10} N(m) = a - bm$$

con $N(m)$ el número de sismos de magnitud $\geq m$ por unidad de tiempo

a una constante que representa la **tasa de ocurrencia**.

si hacemos $m=0$,
 $\log_{10} N(0) = a$, $N(0) = 10^a$

b relaciona actividad de grandes y pequeños sismos.



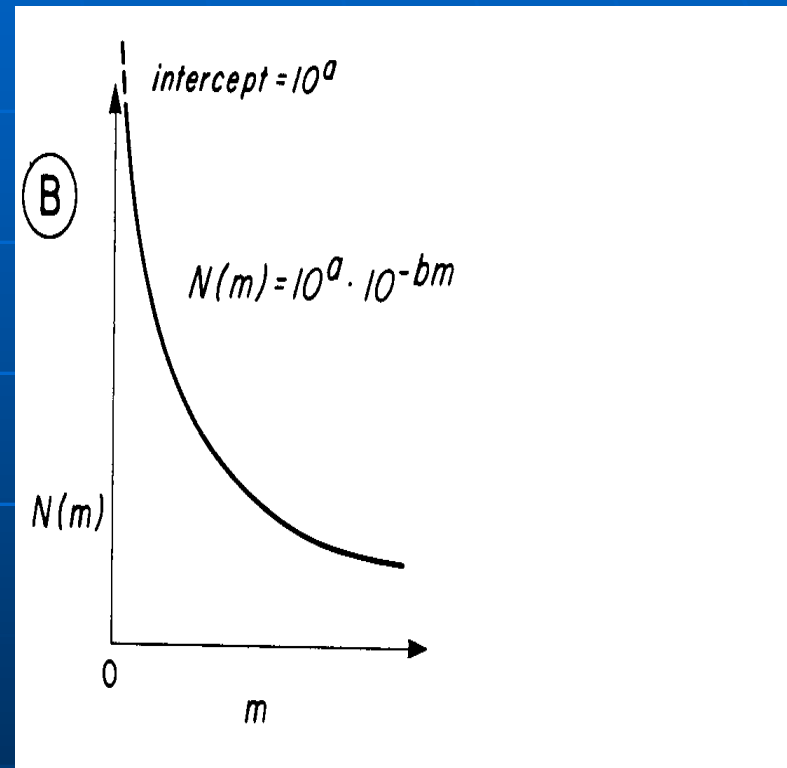
Distribución de probabilidad de magnitudes para la ley Gutenberg-Richter.

- ***Paso de ley de G-R a forma exponencial***

$$\log_{10} N(m) = a - bm \quad N(m) = 10^{a-bm}$$

Si hacemos $\alpha = a \ln 10$
 $\beta = b \ln 10$

$$N(m) = e^{\alpha - \beta m}$$



Acotación inferior : $m=m_0$

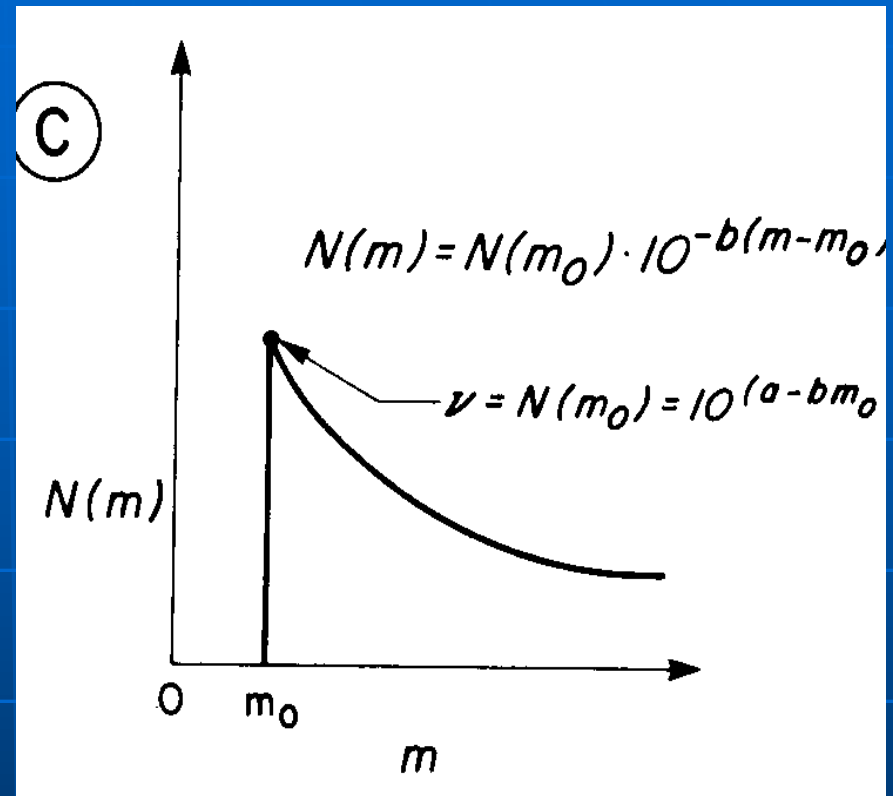
$$N(m)=10^a [10^{-b(m-m_0)} 10^{-bm_0}]$$

$$=10^{a-bm_0} [10^{-b(m-m_0)}]$$

$$= N(m_0) 10^{-b(m-m_0)}$$

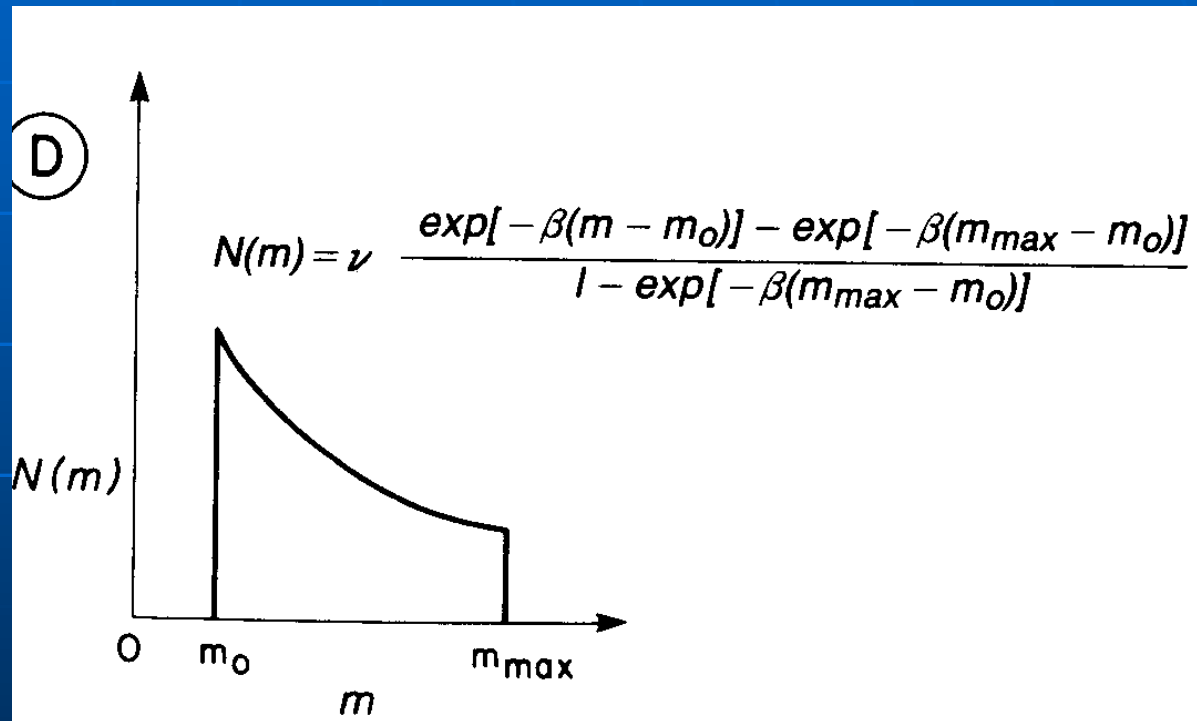
y en forma exponencial

$$= e^{\alpha - \beta m_0} [e^{-\beta(m-m_0)}]$$



Acotación superior: $m=m_{max}$

$$N(m) = N(m_0) [e^{-\beta(m-m_0)} - e^{-\beta(m_{max}-m_0)}] / (1 - e^{-\beta(m_{max}-m_0)})$$



- **Calculo de la probabilidad de que la magnitud($M < m$ | $m > m_0$)**

(es decir, sea siempre superior a m_0)

$$P(M < m \mid m > m_0) = 1 - F_M(m_0)$$

siendo $F_M(m)$ la función de distribución acumulada.

$$F_M(m_0) = \sum P(m_0) = N(m) / N(m_0)$$

$$P(M < m \mid m > m_0) = 1 - [N(m) / N(m_0)] = [N(m_0) - N(m)] / N(m_0)$$

$$= 1 - e^{-\beta(m-m_0)}$$

Si además esta acotada superiormente, la probabilidad de que la magnitud este entre ambos limites es :

$$P(M < m \mid m_0 \leq M \leq m_{\max}) = [1 - e^{-\beta(m-m_0)}] / [1 - e^{-\beta(m_{\max}-m_0)}]$$

Fuentes de incertidumbre en la estimación del movimiento del suelo.

- Estimación de magnitudes a partir de intensidades macrosísmicas.
- Atenuación de intensidades con la distancia.
- Atenuación del movimiento del suelo (aceleración, velocidad, etc) con parámetros como distancia y magnitud.

Estimación del movimiento del suelo.

- **Empírica.** A partir de datos obtenidos con acelerógrafos, para distintas magnitudes y distancias.
- **Teórica.** Generación de movimientos del suelo teóricos a partir de modelos de fuente, camino y emplazamiento.

Incertidumbre temporal.

- Para calcular la tasa, número de sismos por unidad de tiempo en una fuente sismogénica, se pueden utilizar los modelos:

-Modelo de Poisson.

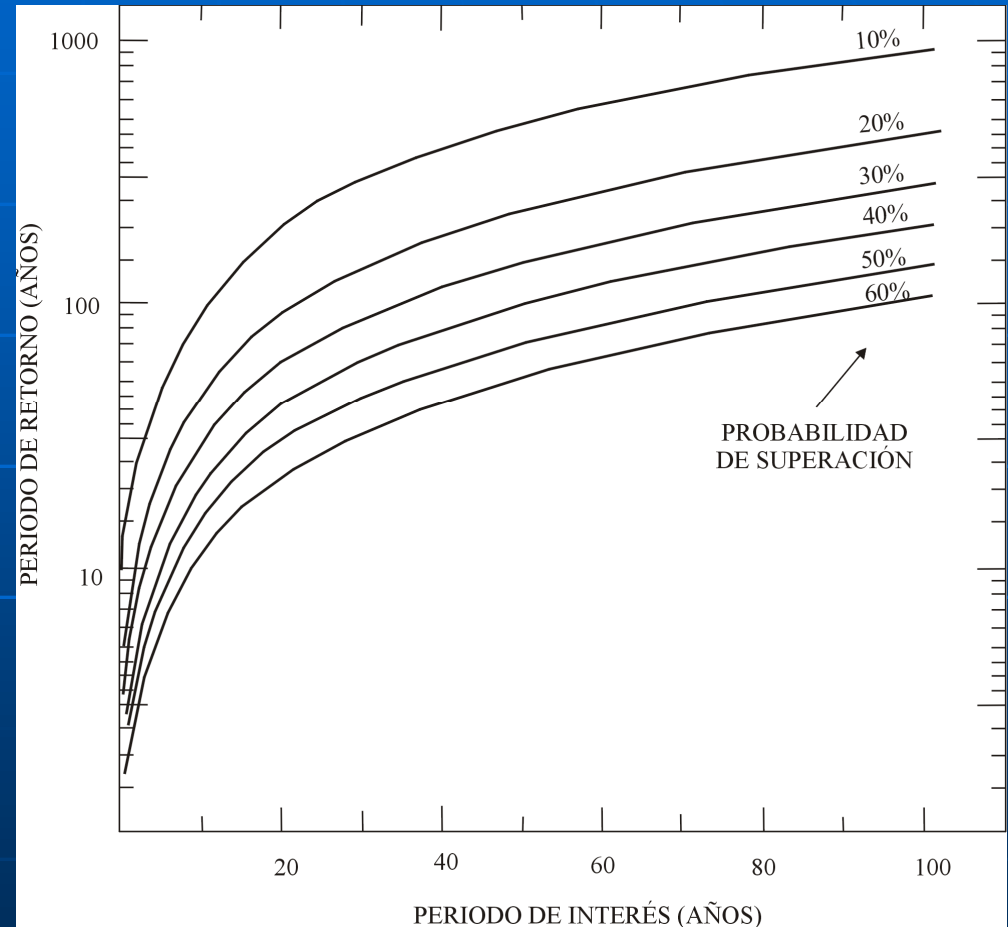
-Modelo de predicción del tiempo.

-Modelo de predicción del deslizamiento.

Periodo de retorno.

- En el caso de considerar modelo de Poisson, se define
- Periodo de Retorno (PR)
en años de un valor del movimiento del suelo, que supere un determinado valor y^* durante un intervalo de tiempo T , por ejemplo la vida útil de la estructura:

$$PR = -T / \ln(1 - P(Y > y^*))$$



Grupo de Especialistas en Impacto Ambiental



Erosión y formación de acantilados por acción hidráulica



Supervisión de Impacto ambiental por trabajos de construcción en obras civiles



Deslizamientos por trabajos antrópicos



Avalancha de lodos volcánicos debido a lluvias intensas



Traza de la falla geológica Guayaquil-Dolores Cerros de Durán



Deslizamiento de suelo causado por ampliación de carretera



Deslizamientos de tierra por acción sísmica



Embalse de agua debido al flujo de lava producido por el volcán Antisana



Aeropuerto Internacional en el Japón



Áreas de inestabilidad por apertura de vía

