

# ANÁLISIS SISMOTECTÓNICO DE LA CONVERGENCIA CARIBE, NAZCA, SURAMÉRICA

Arcila, M.M.<sup>1, 2</sup>, A. Muñoz Martín<sup>1</sup>, G. De Vicente<sup>1</sup>

## RESUMEN

Analizar el contexto geodinámico de una compleja y vasta región como la esquina noroccidental de Suramérica y sur de Centroamérica, donde convergen las placas Caribe, Cocos, Nazca y Suramérica, es posible realizarlo con métodos de Análisis de Poblaciones de Mecanismos Focales de Terremotos. En este trabajo se obtienen tensores puntuales de esfuerzos actuales, a partir del análisis de mecanismos focales de terremotos superficiales (profundidad < 70 km), reportados en el catálogo del Tensor Momento Sísmico (CMT) de la Universidad de Harvard, y se comparan los resultados de las compresiones máximas horizontales ( $S_{HMAX}$ ), con vectores de desplazamiento de las placas litosféricas obtenidos con tecnología GPS. Las poblaciones de mecanismos focales se definieron por su localización espacial y criterios geológicos, y los estados de esfuerzos se calcularon con el *Método de Inversión de Esfuerzos* de Reches, siguiendo los razonamientos del *Modelo de Deslizamiento* para la selección del plano de falla. Los resultados que se obtienen para los esfuerzos actuales son similares a los calculados con datos geológicos, con  $S_{HMAX}$  orientado según SE-NW en el norte de Colombia, y W-E para el suroccidente y Ecuador.

**Palabras clave:** Tectónica, Análisis Poblacional, tensores de esfuerzos, GPS

## ABSTRACT

The focal mechanism analysis is a powerful tool to analyse the geodynamic context of broad and complex regions as the Northwest border of South America and the south of Central America. In this zone a complex convergence between the Caribbean, Nazca and South America plates take place. In this work present-day stress states are calculated using focal mechanisms analysis techniques from shallow earthquakes (depth < 70 km) reported by the Centroid Moment Tensor catalogue located in Harvard University. Obtained results are compared with the displacement vectors between these lithospheric plates calculated with GPS data. The focal mechanism populations were defined following both spatial location and geological criteria. The stress tensors were calculated applying the stress inversion method developed by Reches et al. (1992) following the mechanical assumptions of the slip model (Reches, 1983, Capote et al., 1991) to select the fault plane from the two nodal planes. The final present-day stress map agrees with calculated stress from geological data, with a maximum horizontal stress ( $S_{HMAX}$ ) trending SE-NW in North Colombia and W-E in SW Colombia and Ecuador.

**Key Works:** Tectonic, Population analysis, stress tensor, GPS

---

<sup>1</sup> Departamento de Geodinámica  
Facultad de CC. Geológicas  
Universidad Complutense de Madrid  
28040 Madrid, España  
mmarcila@geo.ucm.es

<sup>2</sup> Ingeominas  
Observatorio Vulcanológico y Sismológico  
Calle 5 B No. 2 – 14  
Popayán, Colombia

Desde el punto de vista tectónico, la esquina noroccidente de Suramérica y sur de Centroamérica se encuentra en un área de intensa deformación, resultado de la interacción de las placas Caribe, Cocos, Nazca y Suramérica (figura 1). Su evolución histórica y configuración de límites ha sido objeto de diversos estudios, centrados principalmente en la placa Farallón y su fragmentación en las placas de Cocos y Nazca, y el origen y evolución de la placa Caribe. Esta evolución ha dado origen a las estructuras que actualmente afectan el territorio colombiano, así como a numerosas provincias interpretadas como terrenos geológicos acrecionados a un borde continental antiguo (Escudo de Guyana).

Aunque existen muchos estudios de análisis de los estados de esfuerzos tectónicos actuales, algunos de carácter global y otros de carácter regional, ellos no involucran de manera específica el extremo noroccidente de Suramérica. La mayoría de esos trabajos están integrados en el *World Stress Map* (Muller *et al.*, 2000), proyecto a mundial cuyo objetivo es establecer el mapa de esfuerzos actual y constituye la más completa base de datos de esfuerzos tectónicos en la corteza. A nivel continental existen trabajos de análisis de estados de esfuerzos, entre los que se destaca Assumpção (1992), para Suramérica; Ego *et al.* (1996), en los Andes del norte; y López (1999) en la esquina suroccidental de la placa Caribe. Modelos sobre las fuerzas que controlan los estados de esfuerzos han sido realizados por Clobentz *et al.* (1996), para la placa Suramérica; Wortel *et al.* (1981, 1985), para la placa de Nazca, y Meijer *et al.* (1997), para los Andes. Para el área de Colombia se reconocen los trabajos de Rivera (1988), para el “nido sísmico” de Bucaramanga; Salcedo (1995), para la zona de Chocó y nido de Bucaramanga; y Dimaté *et al.*, (en prep.), para el terremoto de Tauramena (19 de enero de 1995).

Este trabajo desarrolla un análisis de sismicidad y esfuerzos tectónicos actuales, y su integración

con resultados de desplazamiento de las placas litosféricas.

## 1. METODOLOGÍA

Las fallas constituyen un elemento fundamental en cualquier tipo de análisis tectónico, y el amplio rango de escalas en el que aparecen, hace que puedan estudiarse con diversos enfoques. Si la actividad de una falla responde a la acomodación del campo de esfuerzos sobre dicha estructura, se pueden determinar las características de ese campo regional desde el análisis de los movimientos (mecanismos focales) de las fallas relacionadas. Este problema “*inverso*”, que consiste en estudiar estas estructuras desde un punto de vista estadístico, constituye el denominado *Análisis Poblacional de Fallas* (APF).

Estas metodologías están basadas en las relaciones esfuerzo-deslizamiento descritas por Wallace (1951) y Bott (1959). Anderson (1951) fue el primer autor que estableció una relación entre el estado de esfuerzos, la simetría y la orientación de las fracturas de las rocas (*Modelo de fracturación de Anderson*), basándose en el criterio de fracturación de Navier-Coulomb. Este modelo clásico es aún válido para sistemas de fallas de neofonnación y con cabeceos *puros* de  $0^\circ$  ó  $90^\circ$  (figura 2).

Bott (1959) formula una relación entre la orientación y la forma del elipsoide de esfuerzos que actúa sobre un plano preexistente. La premisa es que la estría refleja la dirección de la componente de cizalla ( $\Gamma$ ) sobre el plano, y se expresa de la forma:

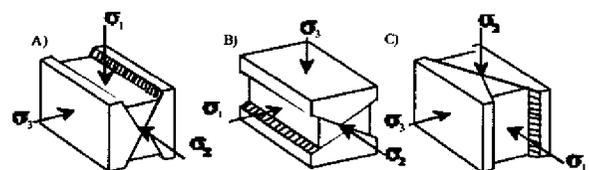


Figura 2. Sistemas de fallas conjugadas, en relación con los tipos de esfuerzo del Modelo de fracturación de Anderson : A) fallas normales, B) fallas inversas y C) fallas en dirección.

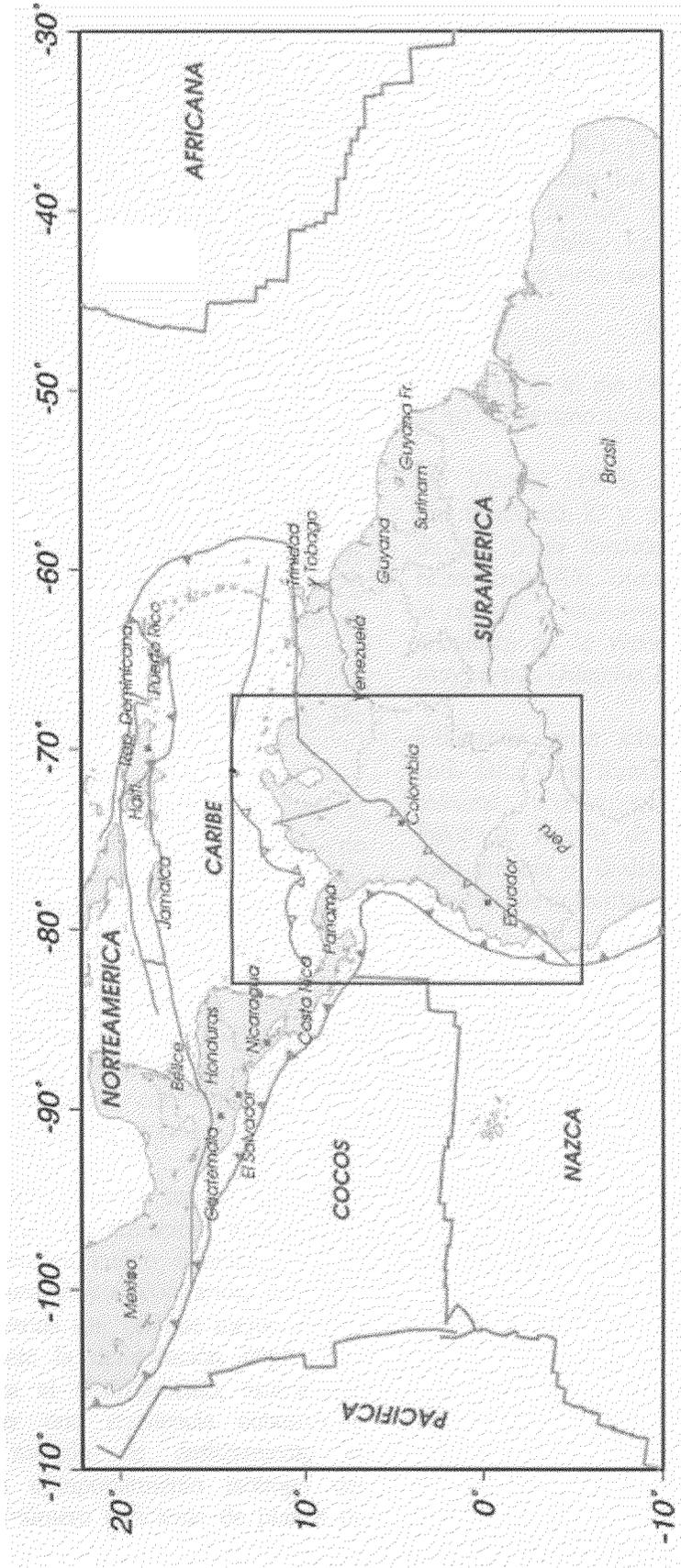


Figura 1. Mapa de localización del área analizada y principales elementos tectónicos

$$\tan(\theta) = \frac{n}{l m} (m^2 - (1 - n^2) R')$$

$$R' = \frac{\sigma_z - \sigma_x}{\sigma_y - \sigma_x}$$

donde la tangente del ángulo de cabeceo ( $\theta$ ) está definida por los cosenos directores del plano de falla ( $l$ ,  $m$ ,  $n$ ) y por el factor de forma ( $R'$ ).  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  son respectivamente el esfuerzo horizontal mínimo, esfuerzo horizontal máximo y esfuerzo vertical. Esta relación, denominada **ecuación de Bott**, es la base de numerosos métodos de inversión de esfuerzos

En este trabajo se utiliza el *Modelo de Deslizamiento* (Reches, 1983; De Vicente, 1988) como criterio básico para la selección del plano de falla, y el *Método de Inversión de Esfuerzos* (Reches, 1987; Reches et al., 1992), para la obtención de los tensores puntuales de esfuerzos actuales.

#### **Modelo de deslizamiento (Reches, 1983; De Vicente, 1988)**

El modelo de deslizamiento intenta explicar el hecho de que en condiciones triaxiales de deformación frágil, tanto naturales como experimentales, las fracturas se disponen según una simetría ortorrómbica con respecto a los ejes fundamentales del elipsoide de deformación ( $e_i$ ). Este modelo se basa en el criterio de fracturación de Navier-Coulomb, e incluye como caso particular el modelo de fracturación de Anderson, con simetría de los planos de falla de tipo *monoclínica*.

El modelo de deslizamiento supone que en el caso más general (deformación triaxial), las fallas se disponen en cuatro familias con dos direcciones y buzamientos contrarios, debido a que estas geometrías son las que mejor disipan la energía durante la deformación frágil. Para que se produzca el deslizamiento, asume que hay que vencer una resistencia cohesiva y friccional. El modelo de deslizamiento es válido para un comportamiento isótropo del macizo rocoso (número suficiente de planos de

debilidad con distintas orientaciones en la roca), o bien para fallas de neoformación.

El modelo relaciona la forma del elipsoide de deformación ( $K'$ ) y el ángulo de rozamiento interno ( $\phi$ ), con los cosenos directores de las estrías de fricción y de las normales a los planos de falla. La forma del elipsoide de deformación viene dada por el parámetro  $K'$ :

$$K' = \frac{e_y}{e_z}$$

donde  $e_z$  es el eje de deformación vertical y  $e_y$  el eje de máximo acortamiento horizontal.

De Vicente (1988) establece unas ecuaciones que relacionan  $K'$  y  $\phi$ , con los valores angulares de las fallas medidas en campo: sentido de buzamiento (D), buzamiento (B) y cabeceo de la estría (C), asumiendo que uno de los ejes se encuentra en la vertical, hecho que resulta ser muy común (Angelier, 1994).

Utilizando estas expresiones se obtiene para cada falla y de forma directa, la orientación del máximo acortamiento horizontal (Dey), un valor del ángulo de rozamiento interno de la roca durante el deslizamiento ( $\phi$ ) y la forma del elipsoide de deformación ( $K'$ ).

Al representar los posibles valores de cabeceo y buzamiento de una falla, se delimitan cuatro campos de relaciones C/B que definen tipos de fallas diferentes. En este *diagrama C/B* (figura 3), las áreas 1 y 3 presentan fallas con mayor movimiento en dirección (cabeceos bajos con buzamientos altos), mientras que las zonas 2 y 4 tienen movimientos importantes según la máxima pendiente del plano (cabeceos altos). Las áreas 1 y 2 corresponden a fallas con acortamiento según el eje  $e_z$  (fallas normales), mientras que las 3 y 4 lo son de extensión según  $e_z$  (fallas inversas). Los casos extremos ( $B = 90^\circ$ ,  $C = 90^\circ$ ) corresponden a los elipsoides de tipo *deformación plana*, para los que sólo existen dos familias de fallas (modelo de fracturación de Anderson).

En el caso de mecanismos focales, se puede demostrar que si los dos planos tienen geometrías diferentes (buzamiento del plano o cabeceo del deslizamiento), necesariamente uno es reactivado y el otro neoformado (figura 3). La posibilidad de movimiento en los planos *reactivados* depende del valor del ángulo de rozamiento interno deducido, que depende a su vez de la orientación del plano respecto a los ejes principales de deformación. Con esto es posible determinar cual de los planos nodales de un mecanismo focal corresponden a la falla relacionada con él. En este caso se selecciona el plano *neoformado* por ser mecánicamente más compatible con el modelo. Aún sin saber si el plano elegido se corresponde con la falla que originó el sismo, es posible establecer las características del tensor de esfuerzos.

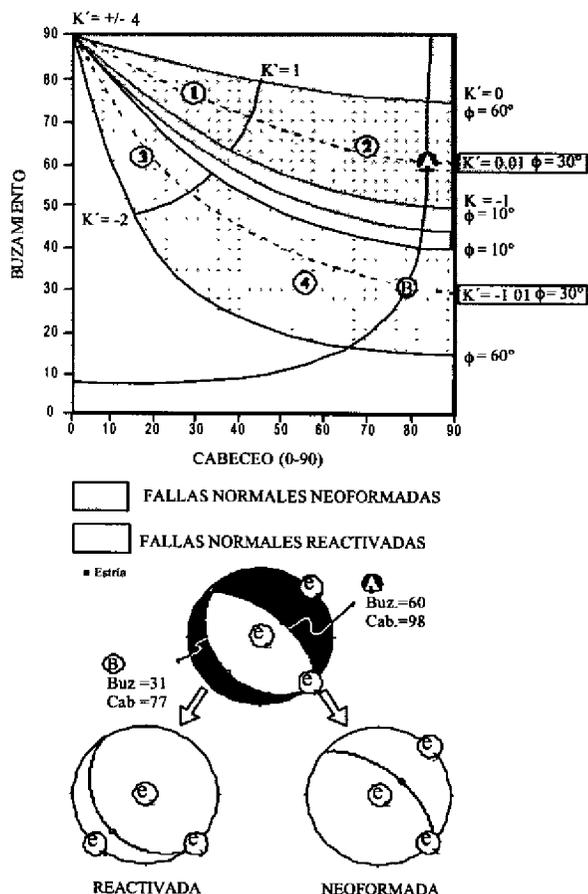


Figura 3. Diagrama C/B con los cuatro tipos de campos: 1-normal direccional, 2-normal, 3-inverso direccional, 4-inverso, y proyección de los planos nodales de un mecanismo focal A y B.

### Método de Inversión de Esfuerzos (Reches, 1987; Reches et al., 1992)

Este método formulado por Ze'ev Reches permite obtener la orientación y las magnitudes relativas del tensor de esfuerzos asociado al movimiento de una población de fallas, y adicionalmente proporciona la fricción media bajo la cual se produjo el deslizamiento. Se basa en la Ecuación de Bott y el criterio de rotura de Navier-Coulomb.

El programa *STRESS* - v. 2.9 (Reches, 1996), es el desarrollo informatizado del método y calcula un conjunto de tensores para distintos coeficientes de fricción ( $\mu$ ), a partir de un  $\mu = 0.01$ , con incremento variable. Para estimar la calidad de una solución se aplican dos tipos de desviaciones angulares que están representadas por dos ángulos de dispersión diferentes:

- > Ángulo de desviación de los ejes principales (PAM): valor medio de las diferencias entre los ejes principales del tensor calculado para toda la población, y los ejes principales del tensor ideal calculado para cada falla.
- > Desviación angular de deslizamiento (SM). Ángulo de desviación medio entre el eje de deslizamiento medido y la dirección del esfuerzo de cizalla máximo calculado.

Además de la orientación y dispersión de los esfuerzos principales para cada tensor solución, proporciona otros parámetros como la cohesión media calculada para las fallas, el *stress ratio* (R), y la relación entre las magnitudes relativas de los esfuerzos calculados en función de un valor arbitrario de esfuerzo vertical ( $\sigma_z = 100$ ).

Este método implica compatibilidad mecánica de todas las fallas explicadas, mientras en otros métodos desarrollados a partir de la ecuación de Bott es necesario interpretar subjetivamente la proyección de las fallas sobre el círculo de Mohr para evaluar la veracidad de la solución, ya que no se conoce valor de la fricción media.