



## ANÁLISIS DE ESFUERZOS

La inversión de esfuerzos a partir de Reches et al. (1992), permite a partir de poblaciones de fallas, determinar la orientación y las magnitudes relativas del tensor de esfuerzos teniendo en cuenta el criterio mecánico de Navier – Coulomb, con el cual se obtiene la fricción media que se produjo cuando el tensor de esfuerzos actuó haciendo deslizar los planos de falla.

Este método se basa las siguientes premisas: 1. Conforme a Bott (1959), el deslizamiento se produce siguiendo la dirección del máximo esfuerzo de cizalla resuelto. 2. El deslizamiento se produjo bajo una cuantía baja al igual que las rotaciones en los planos de falla, ya que estos se encontraban en unas condiciones relativamente uniformes representando un valor medio en su fricción como resultado de su baja actividad en un mismo estado de esfuerzos y 3. Los esfuerzos de cizalla y normales satisfacen el criterio de ruptura que está en función de sus magnitudes y su coeficiente de fricción, pero no consideran la cohesión y la presión de los fluidos (CSN, 1998). El criterio de selección y medición de estrías en los planos de fallas se basa en la determinación de la orientación y el sentido del deslizamiento del plano de falla.

El problema de la inversión consiste en determinar el tensor de esfuerzos principal conociendo las orientaciones y los sentidos de los deslizamientos de muchas fallas. La presunción de que todas las fallas se mueven durante un solo evento tectónico o que se mueven independientemente bajo un mismo tensor de esfuerzos es una aproximación obvia dentro del análisis, sin embargo es común observar que con la recopilación de muchos datos el error aumenta al presentarse dispersión por los esquemas de esfuerzos locales y por la influencia del movimiento de una falla sobre otra (Angelier, 1994). Esta situación se debe principalmente a la naturaleza del conjunto rocoso y a la arquitectura estructural que este presenta.

Mediante la aplicación del método de Reches los planos de falla presentarán una cohesión igual a 0. La mejor solución deberá tener en cuenta que el ángulo de desviación de los ejes principales (ADP), de las fallas involucradas en el análisis y la desviación angular de deslizamiento (DAD), será igual a el ángulo de desviación entre el eje de deslizamiento medido en campo y la dirección del esfuerzo máximo en el plano de falla. La DAD es menos restrictiva que el ADP y puede anularse para muchos tensores generales. El ADP solo se anula cuando se orienta con un  $\phi = 45 - \downarrow/2$  (CSN, 1998). La mejor solución entonces tendrá además en cuenta que los ángulos de desviación ADP y la DAD entre los ejes observados y calculados con los ejes de deslizamiento tienen que ser mínimos, por lo que el coeficiente de fricción se aproximara a 0.8 y la cohesión residual calculada debe ser resistente al deslizamiento (CSN, 1998).

## RESULTADOS DE LA INVERSIÓN

Los tensores obtenidos para los sistemas de fallas con rasgos neotectónicos en la región se encuentran en dos campos de esfuerzos predominantes (Figuras 4, Tabla 2). Estos están distribuidos de la siguiente manera:

**Áreas I, IV, VI y VII.** Arrojaron una compresión en general con tendencia NW – SE predominando un desplazamiento sinistral en fallas con buzamientos tanto al E como al W (Figura 4). En estas áreas se observa que  $\sigma_3$  mantiene un predominio en NE – SW destacándose más claramente para las áreas I, IV y VI.

El  $\sigma_1$  es bastante claro para I y VI, observándose que el régimen que impera está controlado por el efecto de la interacción de la placa Suramericana con el BCRPC y la placa de Nazca (Duque – Caro, 1990a). Estos resultados coinciden con lo planteado por Ego et al. (1996), y Mojica et al. (2001). En el área VII,  $\sigma_1$  presenta una tendencia NNE – SSW, lo cual indicaría que el régimen de esfuerzos imperante en esta litología puede estar relacionado con los procesos deformativos que condujeron a la exhumación de escamas en los límites con la FCA e implicaría que el régimen es resultante de los paleoesfuerzos a que fue sometido este PLOCO durante su evolución como basamento en esta región previo al régimen de esfuerzos actual.



Tabla 2. Resultado de la Inversión de esfuerzos en las 10 áreas analizadas en este estudio

AREA	LOCALIZACION	S1	PI	S2	PI	S3	PI	phi
I	La Linda	109	23	249	61	12	17	0,44
II	Tobas	57	74	319	15	310	5	0,53
III	Lusitania	314	47	45	1	136	43	0,61
IV	Arquíá	168	11	309	76	76	9	0,86
V	Laguneta	243	49	59	41	151	2	0,35
VI	Quebradanueva	138	10	325	80	228	1	0,68
VII	Barroso	345	8	250	43	86	55	0,52
VIII	Gruta	359	24	137	59	260	18	0,70
IX	Villatermales	372	46	14	11	114	41	0,58
X	Guali	204	54	318	17	58	31	0,38

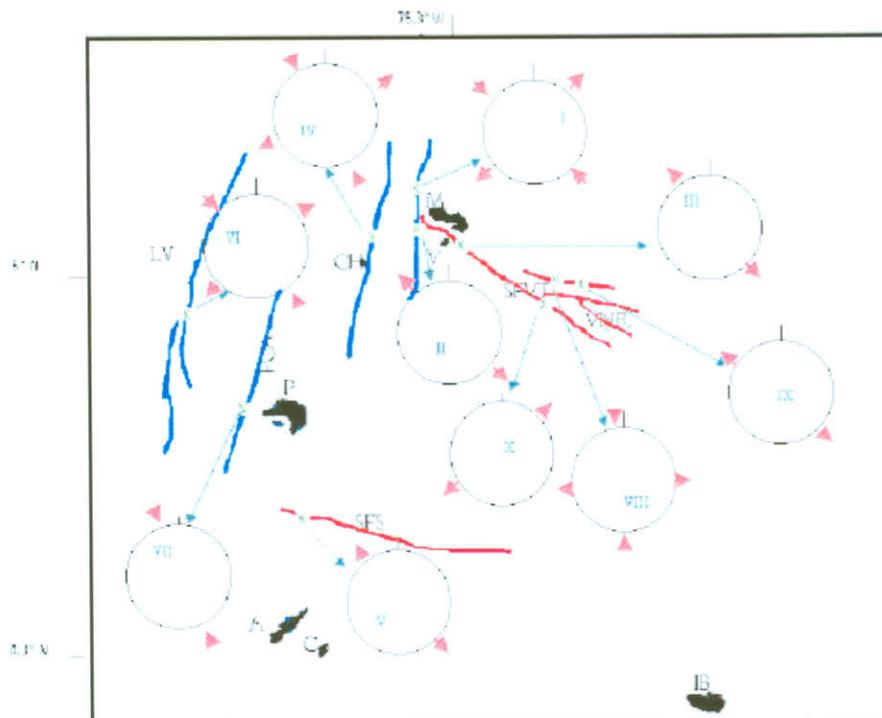


Figura 4. Direcciones principales de los tensores de esfuerzos para las 10 zonas evaluadas en este trabajo.

Áreas II, III, V, VIII, IX y X. Se encontró un régimen extensional predominante en dirección NW – SE expresado por fallas normales con buzamientos tanto al E como al W. Se observa que  $\sigma_1$  es el esfuerzo compresivo en la vertical y  $\sigma_3$  el esfuerzo distensivo principal en la horizontal. Esto muestra que se encuentran bajo un régimen cuyo origen deriva de la actividad tectónica de la denominada por Gómez (1991), como Paleomegacizalla Transversal de Colombia (PMTTC) y que para este caso se destaca el SFVT como estructura neotectónica, la cual está fuertemente relacionada con la actividad reciente y actual del CVRT.



También se observa una conducta similar para el caso del área V, la cual está relacionada con el SFS, que se relaciona directamente con FTV (Gómez, 1991). Para las áreas II, III, V y IX se observa que las direcciones  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  están relacionados intrínsecamente con la PMTC y la FTV que derivan de fracturas antiguas como resultado de un seccionamiento de placa en el Bloque Andino norte, las cuales presentan reactivación continua en la evolución de la esquina noroeste de Suramérica (Dehandshutter, 1986).

En las áreas VIII y X, se presenta un régimen extensivo con una tendencia WSW – ENE, que están relacionadas con zonas de debilidad sugeridas por la presencia de enjambres de sismos que indican la actividad volcano - tectónica del Volcán Nevado del Ruíz (Carvajal et al., 1988; Muñoz et al., 1990; Bohórquez et al., 2001). Esta actividad proviene de zonas de debilidad cortical derivadas de esfuerzos verticales compresivos relacionados con la relativa cercanía a las cámaras magmáticas someras del complejo volcánico.

Respecto a la edad de las rocas, en la Tabla 3, se observa que el régimen distensivo es predominante para aquellas rocas con edades menores a 1.1 m. a., salvo el caso del área VI en donde el régimen es compresivo. Esto es explicable porque la estructura analizada está relacionada con la Falla Quebradanueva que forma parte del SFR, que a su vez evidencia actividad neotectónica en este sistema. Para aquellas rocas con edades superiores a 1.1 m. a. el régimen predominante está relacionado con la interacción del BCRPC, situación asociable a la evolución de esta región desde el Plioceno -3,7 a 2,5 m.a.- (Pujos, 1987; Duque – Caro, 1990a; Mann & Corrigan, 1990; Coates et al., 1992). De este modo, las litologías analizadas permiten detectar el estado de paleoesfuerzos generados por la colisión y deformación del bloque emergido al acrecionarse con la esquina NW de Sudamérica.

Tabla 3. Resultados de la Inversión de esfuerzos y Relación de estos versus la edad de la litología medida.

LOCALIZACION	AREA	EDAD	S1	P1	S2	P2	S3	P3	phi	REGIMEN	SISTEMA ANALIZADO
Laguneta	V	< 0.004 m.a.	243	49	59	41	151	2	0,35	distensivo	SFS
Guali	X	< 0.004 m.a.	204	54	318	17	58	31	0,38	distensivo	CVRT
Tobas	II	0.05 m.a	57	74	319	15	310	5	0,53	distensivo	SFVT
Gruta	VIII	< 1.1 m.a.	359	24	137	59	260	18	0,70	distensivo	SFVT
Villatermales	IX	< 1.1 m.a.	372	46	14	11	114	41	0,58	distensivo	SFVT
Lusitania	III	< 1,1 m.a.	314	47	45	1	136	43	0,61	distensivo	SFVT
Quebradanueva	VI	< 1.1 m.a.	138	10	325	80	228	1	0,68	compresivo	SFR-FCA
La Linda	I	< 3.6 m.a.	109	23	249	61	12	17	0,44	compresivo	SFR-FSP
Barroso	VII	>70 m.a.	345	8	250	43	86	55	0,52	compresivo	SFR-FCA
Arquia	IV	> 150 m.a.	168	11	309	76	76	9	0,86	compresivo	SFR-FCA

## DISCUSIÓN

La Evolución geodinámica de la Placa de Nazca dentro el campo de influencia del Hot Spot de Galápagos entre los 8° N y los 17° S desde el Mioceno medio hasta hoy, implicó que hacía el norte de 17° S la placa Farallón sufrió un régimen expansivo derivado de la evolución del Hot Spot, el cual continuó con el desarrollo de varias dorsales entre estas Carnegie, Cocos y Nazca principalmente, siendo las dorsales de Coiba y Malpelo las últimas y que se vienen expandiendo desde hace 25 m.a. hasta el presente (Pennington,

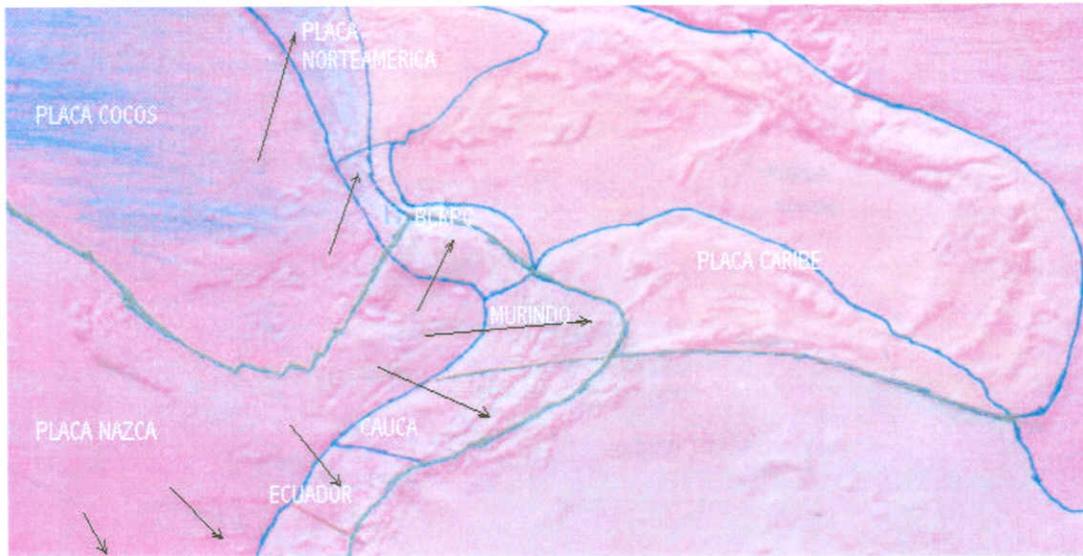


Figura 5. Esbozo de la convergencia de la placa de Nazca en el NW de Suramérica, y la segmentación de esta.

1979; Frisch et al., 1992; Kellogg & Vega, 1995; Risnes, 1995), dando como resultado la aparición de la placa de Cocos, la cual comienza a subducir bajo el sector W del BCRPC en una dirección NNW durante el transcurso del Mioceno al Plioceno (Figuras 8 y 9). Dicha subducción obligó a la Placa Caribe a derivar hacia el ENE y trasladar el BCRPC hacia el NE (Meschede & Frisch, 1998), con la subsiguiente emergencia del bloque y su acreción en la esquina NW de Sudamérica (Pujos, 1987; Duque – Caro, 1990a,b; Mann & Corrigan, 1990; Coates et al., 1992; Frisch et al., 1992; Avé – Lallemand., 1997; Menschede & Frisch, 1998), ocasionando con esto que la placa de Nazca “empujara” la Placa Caribe, la cual se deformó y se imbricó (underthrusting) acrecionandose bajo la Placa Suramericana (Avé – Lallemand, 1997).

La conducta litosférica de la Placa Caribe en este sector de convergencia deriva de las condiciones de temperatura de esta, su flotabilidad (buoyancy) y de su resistencia a la subducción (Cloos, 1993b); en este sentido, la Placa Caribe por su edad y su mayor espesor en comparación con la Nazca tiende a ser menos densa, menos flexible por ser fría y a flotar oponiendo más resistencia para subducir y por el contrario se acreciona a la placa continental (Cloos, 1993b).

Hacia el sur del Hot Spot de Galápagos y durante el transcurso de esta expansión se observa que la Dorsal de Nazca deriva en dirección SE (Figura 8), y comienza a subducir de forma oblicua bajo el margen suramericano desde hace 10 m.a., lo cual queda evidenciado por el solevantamiento del margen continental en