



# UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

**ANALISIS ESTRUCTURAL DEL BLOQUE TECTONICAMENTE  
ACTIVO DE SANTO TOMAS, BAJA CALIFORNIA, MEXICO**



**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

**OCEANOLOGO**

PRESENTA:

**RAMON MENDOZA BORUNDA**

Ensenada, B. C. Mayo de 1992

## RESUMEN

El Bloque Santo Tomás (Gastil *et al.*, 1975) localizado hacia el sur de Ensenada, Baja California, es una provincia geológica de aproximadamente 600 km<sup>2</sup>, constituida por rocas volcanosedimentarias de la Fm. Alisitos, cuerpos intrusivos pertenecientes al Batolito Peninsular, y un cinturón costero sedimentario de rocas cretácicas y plio-pleistocénicas. Estructuralmente, este bloque se encuentra bajo la influencia de fallas activas mayores a nivel peninsular. Su límite norte, lo constituye el Sistema de Fallamiento de Santo Tomás-Agua Blanca; hacia el Pacífico, en plataforma continental, se encuentra bordeado por el Sistema de Fallamiento de San Clemente.

El análisis de los lineamientos estructurales interpretados en imagen de satélite y de las estructuras medidas en campo, muestra que estas últimas corresponden al patrón geométrico que se obtuvo a partir de la imagen de satélite. Se observa que las estructuras a lo largo de la zona de estudio, se orientan preferencialmente en dos direcciones, que varían de acuerdo a su proximidad con respecto al Sistema Santo Tomás-Agua Blanca. En las proximidades a éste, las estructuras son subparalelas al mismo (WNW y ENE); sin embargo, conforme la influencia del sistema disminuye, éstas tienden a ser más oblicuas (NNW y NNE).

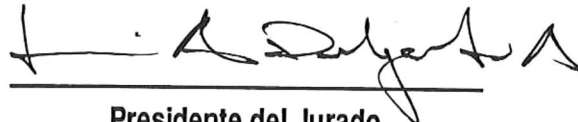
El análisis dinámico del sistema de fallas observado en el campo (344 planos de falla), nos indica que del total de soluciones obtenidas (73) considerando la teoría de fallamiento de Coulomb-Anderson, el 67% de éstas corresponden a soluciones de desplazamiento lateral, el 26% a soluciones normales y únicamente el 7% a sistemas inversos. Los resultados del análisis de esfuerzos, muestran que el Bloque Santo Tomás ha estado sujeto a por lo menos tres sistemas o campos de esfuerzos regionales desde el Cretácico Temprano; siendo su parte sur, la que se ha visto mayormente afectada por el campo de esfuerzos regional actual ( $\sigma_1$  H  $\approx$  N-S). La hipótesis presentada, es apoyada por la historia tectónica regional y los estudios geológicos y sísmicos locales. Finalmente, se infiere que la deformación observada se ha dado en un ambiente tectónico transforme y de intra-arco.

Con base en el monitoreo sísmico realizado en este estudio, aunado a las evidencias geológicas y sísmicas, se concluye que el Bloque Santo Tomás es una región tectónicamente activa, que se encuentra sujeta a procesos de deformación asociados con el régimen tectónico impuesto por el Sistema de Fallamiento Transforme de San Andrés-Golfo de California.

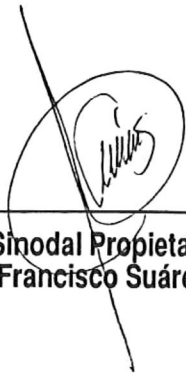
"ANALISIS ESTRUCTURAL DEL BLOQUE TECTONICAMENTE ACTIVO DE SANTO TOMAS,  
BAJA CALIFORNIA, MEXICO"

TESIS  
QUE PRESENTA  
RAMON MENDOZA BORUNDA

Aprobada por:



Presidente del Jurado  
M.C. Luis A. Delgado Argote



Sinodal Propietario  
M.C. Francisco Suárez Vidal



Sinodal Propietario  
Dr. Arturo Martín Barajas

## DEDICATORIAS

A la memoria de mi Padre...quien siempre me acompaña.

A mi Madre...de quien he recibido las mejores lecciones. Gracias por ser esa luz, que siempre ha iluminado mi camino.

A mis hermanos...de quienes siempre he recibido lo mejor.

A mis cuñadas...gracias por todo.

A Tirso...gracias por todo tu apoyo, y por esa lección de fortaleza que nos has dado.

A mis sobrinos...en quienes veo la prolongación de mi existencia.

A Sara...por ser la responsable de esta locura. Gracias por todo tu apoyo...sin ti esto no hubiese llegado a su fin.

A todos mis amigos...salud!

## AGRADECIMIENTOS

Quiero expresarle mi gratitud al M.C. Luis A. Delgado Argote, quien propuso y dirigió este trabajo. Le doy las gracias porque en vez de fijarme la ruta de trabajo, supo canalizar mis inquietudes. Gracias por esas discusiones abiertas, que me han ido formando un criterio; y sobre todo, por su amistad y paciencia.

A mis sinodales M.C. Francisco Suárez Vidal y Dr. Arturo Martín Barajas, les agradezco la gran disponibilidad que mostraron hacia este trabajo. Gracias por sus comentarios y observaciones durante la realización de esta tesis; y especialmente, por la revisión crítica que hicieron de la misma en su etapa final. Gracias por su amistad.

A Victor Manuel Frías Camacho, quiero expresarle mi gratitud por todo el tiempo que invirtió en la edición de este trabajo. Gracias por ayudarme en la elaboración de todas y cada una de las tablas y figuras que aparecen en la tesis. Gracias por favorecerme con tu amistad.

Al Dr. Juan García Absdeslem y Dr. José Frez, les agradezco el haberme permitido generosamente invadirles su espacio de trabajo durante la realización de esta tesis. Gracias por sus comentarios.

A la M.C. Ana Luz Quintanilla, le agradezco el haber despertado en mí el gusto por lo que ahora hago.

A todos los estudiantes de la División de Ciencias de la Tierra, gracias por la amistad y apoyo que me ofrecieron en todo momento. Gracias por esas charlas tan amenas.

A Memo Díaz, gracias por esas palabras de aliento que mucho me ayudaron.

Quiero agradecer las facilidades y apoyo que me ofreció el Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE) para la realización de este trabajo, tanto en lo que respecta al uso de sus instalaciones, como al apoyo económico que me otorgó a través de la beca tesis que recibí.

A todas las personas que en alguna etapa de mi tesis me ayudaron, muchas gracias.

## CONTENIDO

	Página
I. INTRODUCCION	1
II. ANTECEDENTES	6
III. OBJETIVOS	10
IV. DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO	11
V. MARCO GEOLOGICO DE REFERENCIA	13
VI. METODOLOGIA	18
VII. RESULTADOS Y DISCUSIONES	21
VII.1. Aspectos Generales	21
VII.2. Correlación Estructural	21
VII.3. Análisis Estructural	34
VII.3.1. Implicaciones Regionales	70
VII.4. Estabilidad Tectónica del Bloque Santo Tomás	80
VIII. CONCLUSIONES	84
IX. LITERATURA	86
APENDICE ESTRUCTURAL	

## LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Rasgos tectónicos del sur de California y norte de Baja California (tomado de Legg et al., 1991). El recuadro indica el área de este estudio.	4
2	Mapa de localización del área de estudio.	12
3	Mapa geológico del Bloque Santo Tomás (modificado de INEGI, escala 1:250 000). Los círculos mayores representan el fallamiento medido en campo. Los números romanos indican las áreas de medición de la Fig. 4., y los números entre paréntesis indican el número de sitios de medición por área.	14
4	Interpretación de lineamientos estructurales utilizando la imagen de satélite LANDSAT (132, INEGI) digitalizada (modificada de Delgado-Argote <i>et al.</i> , 1990).	19
5	Mapa de localización de los sitios de control estructural y su agrupamiento en áreas. Las áreas XI y XII no tienen sitios de control en vista de que fueron medidas con detalle de campo (modificado de Delgado-Argote <i>et al.</i> , 1990).	22
6	Rosas de fallamiento construidas con base en el conteo de lineamientos en imagen de satélite, con intervalos de clase de 5°. a) Total de lineamientos en el Bloque Santo Tomás (589). b) Lineamientos en la Región Norte del Bloque Santo Tomás (257).	24
7	Rosas de fallamiento construidas con base en las estructuras medidas en campo, con intervalos de clase de 5°. a) Total de estructuras en el Bloque Santo Tomás (380). b) Estructuras en la Región Norte (96).	25
8	Rosas de fallamiento construidas con base en el conteo de lineamientos en imagen de satélite, con intervalos de clase de 5°. a) Lineamientos en la Región Central del Bloque Santo Tomás (187). b) Lineamientos en la Región Sur del Bloque Santo Tomás (145).	28

## LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura		Página
9	Rosas de fallamiento construidas con base en las estructuras medidas en campo, con intervalos de clase de 5°. a) Estructuras en la Región Central del Bloque Santo Tomás (190). b) Estructuras en la Región Sur del Bloque Santo Tomás (94).	29
10	Orientación de los esfuerzos principales de máxima (cuadros), intermedia (diamantes) y mínima (asteriscos) compresión de cuatro sitios de control en el Area I (ver la tabla respectiva y el apéndice estructural). La orientación promedio resultante de cada uno de los esfuerzos principales, se representa por la cruz ( $\sigma_1=34/N66W$ ), el punto ( $\sigma_2=54/S46E$ ) y la equis ( $\sigma_3=22/N21E$ ), respectivamente. El número de fallas analizadas en el Area I, es de 19.	36
11	Orientación de los esfuerzos principales de máxima, intermedia y mínima compresión de cuatro sitios de control en el Area II (ver la tabla respectiva y el apéndice estructural). La simbología usada es la misma que en la Figura 10. Dada la dispersión del conjunto de datos, únicamente se obtuvo la orientación promedio resultante del vector de máxima compresión ( $\sigma_1=30/N61W$ ). Este valor, se obtuvo considerando solamente los esfuerzos principales horizontales de máxima compresión. El número de fallas analizadas en el Area II, es de 9.	36
12	Orientación de los esfuerzos principales de máxima, intermedia y mínima compresión de seis sitios de control en el Area III (ver la tabla respectiva y el apéndice estructural). La simbología usada es la misma que en la Figura 10. Las orientaciones promedio resultantes que se obtuvieron, dada la distribución de los esfuerzos principales, corresponden a los esfuerzos principales de máxima ( $\sigma_1=16/N54W$ y $\sigma_1=24/N50E$ ) y intermedia ( $\sigma_2=68/S10E$ y $\sigma_2=10/S36E$ ) compresión (lo referente a los dos valores promedio para el mismo esfuerzo principal, se discute en el texto). El número de fallas analizadas en el Area III, es de 34.	41

## LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura		Página
13	<p>Orientación de los esfuerzos principales de máxima, intermedia y mínima compresión de once sitios de control en el Area IV (ver la tabla respectiva y el apéndice estructural). La simbología usada es la misma que en la Figura 10. Las orientaciones promedio resultantes que se obtuvieron, dada la distribución de los esfuerzos principales, corresponden a los esfuerzos principales de máxima (<math>\sigma_1=18/S22E</math> y <math>\sigma_1=30/N73E</math>) y mínima (<math>\sigma_3=09/N60E</math> y <math>\sigma_3=14/N28W</math>) compresión (para lo referente a los dos valores promedio para el mismo esfuerzo principal, ver el texto). El número de fallas analizadas en el Area IV, es de 50.</p>	41
14	<p>Orientación de los esfuerzos principales de máxima, intermedia y mínima compresión de siete sitios de control en el Area V (ver la tabla respectiva y el apéndice estructural). La simbología usada es la misma que en la Figura 10. Las orientaciones promedio resultantes que se obtuvieron, corresponden al esfuerzo principal de máxima compresión: <math>\sigma_1=33/N67W</math> y <math>\sigma_1=21/N03W</math>. El número de fallas analizadas en el Area V, es de 26.</p>	48
15	<p>Orientación de los esfuerzos principales de máxima, intermedia y mínima compresión de tres sitios de control en el Area VI (ver la tabla respectiva y el apéndice estructural). La simbología usada es la misma que en la Figura 10. La orientación promedio resultante de cada uno de los esfuerzos principales, es: <math>\sigma_1=14/S62E</math>, <math>\sigma_2=87/N02E</math> y <math>\sigma_3=03/S28W</math>. El número de fallas analizadas en el Area VI, es de 20.</p>	48
16	<p>Orientación de los esfuerzos principales de máxima, intermedia y mínima compresión de seis sitios de control en el Area VII (ver la tabla respectiva y el apéndice estructural). La simbología usada es la misma que en la Figura 10. Las orientaciones promedio resultantes de cada uno de los esfuerzos principales, son: <math>\sigma_1=31/N46W</math> y <math>\sigma_1=24/N54E</math>; <math>\sigma_2=71/S45W</math>; <math>\sigma_3=09/N53E</math> y <math>\sigma_3=21/N37W</math>. El número de fallas analizadas en el Area VII, es de 27.</p>	54

## LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura		Página
17	Orientación de los esfuerzos principales de máxima, intermedia y mínima compresión de siete sitios de control en el Area VIII (ver la tabla respectiva y el apéndice estructural). La simbología usada es la misma que en la Figura 10. La orientación promedio resultante de los esfuerzos principales de máxima y mínima compresión, es: $\sigma_1=30/N24E$ y $\sigma_3=16/N69W$ , respectivamente. El número de fallas analizadas en el Area VIII, es de 31.	54
18	Orientación de los esfuerzos principales de máxima, intermedia y mínima compresión de diez sitios de control en el Area IX (ver la tabla respectiva y el apéndice estructural). La simbología usada es la misma que en la Figura 10. La orientación promedio resultante de cada uno de los esfuerzos principales, es: $\sigma_1=21/N24W$ , $\sigma_2=75/S54W$ y $\sigma_3=24/N62E$ . El número de fallas analizadas en el Area IX, es de 50.	59
19	Orientación de los esfuerzos principales de máxima, intermedia y mínima compresión de cinco sitios de control en el Area X (ver la tabla respectiva y el apéndice estructural). La simbología usada es la misma que en la Figura 10. Dada la distribución de los esfuerzos principales, se obtuvieron dos orientaciones promedio resultantes de máxima compresión ( $\sigma_1=23/N08W$ y $\sigma_1=08/S43W$ ) y dos de mínima compresión ( $\sigma_3=08/N84E$ y $\sigma_3=13/N51W$ ). El número de fallas analizadas en el Area X, es de 21.	59
20	Datos de fallamiento de la Región de Punta Cabras Norte (Area XI). (a) Los polos de los planos de falla y (b) los círculos mayores, muestran el dominio de las estructuras verticales con orientación NNW y NNE, con echados hacia el SW y SE, respectivamente. También se observan algunas estructuras inversas con orientación E-W y algunas estructuras normales con orientación N-S. El número de fallas medidas en campo para el Area XI, es de 29.	66

## LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura		Página
21	Datos de fallamiento de la Región de Punta Cabras Sur (Area XII). (a) Los polos de los planos de falla y (b) los círculos mayores, muestran el dominio de las estructuras verticales con orientación NE y echado SE. Las estructuras verticales hacia el NW, las normales y las inversas, son mínimas. El número de fallas medidas en campo para el Area XII, es de 28.	69
22	Mapa geológico del Bloque Santo Tomás que muestra la dirección de los esfuerzos principales horizontales de máxima compresión ( $\sigma_1$ H) que generaron el fallamiento analizado en cada una de las áreas de la Fig. 4.	71
23	Orientación de los esfuerzos principales de máxima compresión ( $\sigma_1$ ) en el Bloque Santo Tomás, obtenida a partir del análisis de 344 planos de falla. En la figura se observan tres conjuntos de vectores de máxima compresión: 1º) con orientación NW, 2º) con orientación N-S y 3º) con orientación NE. Los valores promedio resultantes, son: $\sigma_1=28/N59W$ , $\sigma_1=19/N11W$ y $\sigma_1=31/N45E$ , respectivamente.	72
24	Distancias máximas de localización de eventos sísmicos con una estación en el Rancho El Coyote. Las distancias fueron calculadas a partir de los tiempos de arribo de las ondas S y P (S-P) para una velocidad de propagación de onda de 7 km/s (ver Tabla VI)(modificada de Delgado-Argote <i>et al.</i> , 1990).	82

## LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
I	RESULTADOS DEL ANALISIS DE ESFUERZOS EN LAS AREAS I Y II	37
II	RESULTADOS DEL ANALISIS DE ESFUERZOS EN LAS AREAS III Y IV	42
III	RESULTADOS DEL ANALISIS DE ESFUERZOS EN LAS AREAS V Y VI	49
IV	RESULTADOS DEL ANALISIS DE ESFUERZOS EN LAS AREAS VII Y VIII	55
V	RESULTADOS DEL ANALISIS DE ESFUERZOS EN LAS AREAS IX Y X	61
VI	CRONOLOGIA DE LA SISMICIDAD EN EL BLOQUE SANTO TOMAS (TOMADA DE DELGADO-ARGOTE ET AL., 1990).	81

## I. INTRODUCCION

La Península de Baja California se encuentra ubicada dentro de la zona de influencia del Sistema de Fallamiento Transforme de San Andrés-Golfo de California, uno de los sistemas más estudiados y mejor comprendidos en el mundo (Sylvester, 1984). Las razones de tan numerosos y extensos estudios obedecen, entre otras cosas, a la accesibilidad y exposición de las diversas estructuras del sistema, al gran número de geólogos que viven y trabajan en la región (tanto en los sectores académico, industrial y gubernamental); así como, al peligro potencial que representa la actividad de las fallas del sistema en la generación de terremotos en las áreas densamente pobladas de la costa oeste de California, E.U.A. (Sylvester, 1984) y del norte de la Península de Baja California.

La historia tectónica de la margen continental oeste de Norteamérica, se caracteriza por haber experimentado durante el curso de su historia geológica, los cuatro tipos de regímenes tectónicos por los que puede pasar una margen continental (Dickinson, 1981). La historia de esta margen continental activa, al menos en sus últimos 200 Ma, se puede dividir en dos grandes etapas (Dickinson, 1981): (1) el tectonismo convergente del Mesozoico medio-Cenozoico temprano, principalmente asociado con los procesos de subducción de la Placa Farallón bajo la margen occidental de la Placa de Norteamérica, resultando en el consumo casi total de la primera de ellas (Menard, 1978; Mammerickx y Klitgord, 1982; Atwater, 1989), y (2) la etapa que marca el origen y evolución del Sistema de Fallamiento Transforme de San Andrés, al entrar en contacto la Placa Pacífico y la Placa de Norteamérica, como consecuencia del encuentro dorsal-trinchera, dando lugar posteriormente entre 6 y 4 Ma al Sistema San Andrés-Golfo de California. (Larson *et al.*, 1968; Atwater, 1970, 1989; Spencer y Normark, 1979, 1989; Dickinson, 1981).

Los procesos tectónicos que han influido en el desarrollo geológico de la Península de Baja California, se reflejan en el patrón estructural actual de la península. Este patrón estructural, obedece a estados de esfuerzos que en su momento fueron impuestos por el régimen tectónico prevaleciente. Actualmente, se sabe que el estado de esfuerzos en la litósfera es el resultado de una gran variedad de fuerzas que actúan a diferentes escalas, siendo las más importantes las fuerzas responsables del movimiento de placas (mecanismos de conducción) (Richardson *et al.*, 1979). En los últimos años, aprovechando las manifestaciones o expresiones de la actividad tectónica, tales como la actividad sísmica y el rompimiento o reactivación de planos de debilidad en niveles corticales, algunos autores (Sykes y Sbar, 1973; Mckenzie, 1969; McGarr y Gay, 1978; Richardson *et al.*, 1979; Nakamura y Uyeda, 1980; Zoback y Zoback, 1980; Angelier *et al.*, 1981; Gephart, 1990; entre otros) han aplicado una serie de técnicas independientes para la determinación del estado actual de esfuerzos en la litósfera. Dentro de los métodos utilizados en la obtención de la orientación y/o magnitud de los esfuerzos, destacan la solución de mecanismos focales, las mediciones directas *in-situ* (entre las que sobresale la técnica de hidrofracturamiento) y los indicadores geológicos recientes, como las alineaciones de diques y conos cineríticos jóvenes (<5 Ma). Los indicadores geológicos, también se han usado en la caracterización de los sistemas de esfuerzos que operaron en el pasado (paleoesfuerzos), al asumir que las estructuras analizadas, son el resultado de un campo de esfuerzos específico (Angelier, 1984; Angelier *et al.*, 1985; Hardcastle, 1989; Hardcastle and Hills, 1991).

En la actualidad, la principal manifestación del proceso tectónico en la porción meridional de la margen continental oeste de Norteamérica, es la actividad sísmica del sur de California y norte de la Península de Baja California, a lo largo de fallas continentales o regionales. En Baja California,

esta actividad sísmica se encuentra confinada a cuatro regiones sismotectónicas principales: (1) la margen continental sobre el Océano Pacífico, (2) las Sierras Peninsulares, (3) el Valle Mexicali-Imperial y (4) la depresión del Golfo de California y su extensión continental (Ortega, 1988).

Los elementos estructurales mayores que pueden tener influencia en la estabilidad estructural del Bloque Santo Tomás (Fig. 1), se localizan dentro de las dos primeras regiones sismotectónicas. El sistema estructural más importante de este bloque, se relaciona con la Falla de Agua Blanca, descrita por primera vez por Allen *et al.* (1960). Esta falla forma parte de la región sismotectónica de Sierras Peninsulares, y se infiere tiene una influencia directa en el desarrollo estructural del bloque. Con base en estudios geofísicos llevados a cabo en la plataforma continental, se ha sugerido la prolongación de la Falla de Agua Blanca hacia la plataforma continental californiana (Krause, 1965; Moore, 1969; Legg y Kennedy, 1979; Legg y Wong, 1982, 1989; Legg *et al.*, 1987). Esta prolongación, se conoce actualmente como Sistema de Fallamiento de Agua Blanca (Legg y Kennedy, 1979; Legg y Wong, 1982, 1989; Legg *et al.*, 1987). Por otro lado, el Sistema de Fallamiento de San Clemente, hacia el poniente del Sistema de Fallamiento de Agua Blanca, y paralelo al mismo, viene a ser el segundo elemento estructural de influencia en la zona de estudio.

En vista de las dimensiones del patrón estructural, tanto en continente como en la plataforma continental, resulta importante el estudio de la posible actividad de cada uno de los rasgos que caracterizan a este patrón. Se sabe, por ejemplo, del peligro que representa el desplazamiento de piso oceánico en la generación de tsunamis (en el caso de fallamiento en la plataforma continental), o la actividad de las fallas en continente, con respecto al nacimiento y desarrollo de asentamientos humanos. Por consiguiente, es necesaria la implementación de programas de estudio tendientes a cuantificar el riesgo asociado a la posible actividad sísmica, tanto en continente como en la plataforma continental peninsular.

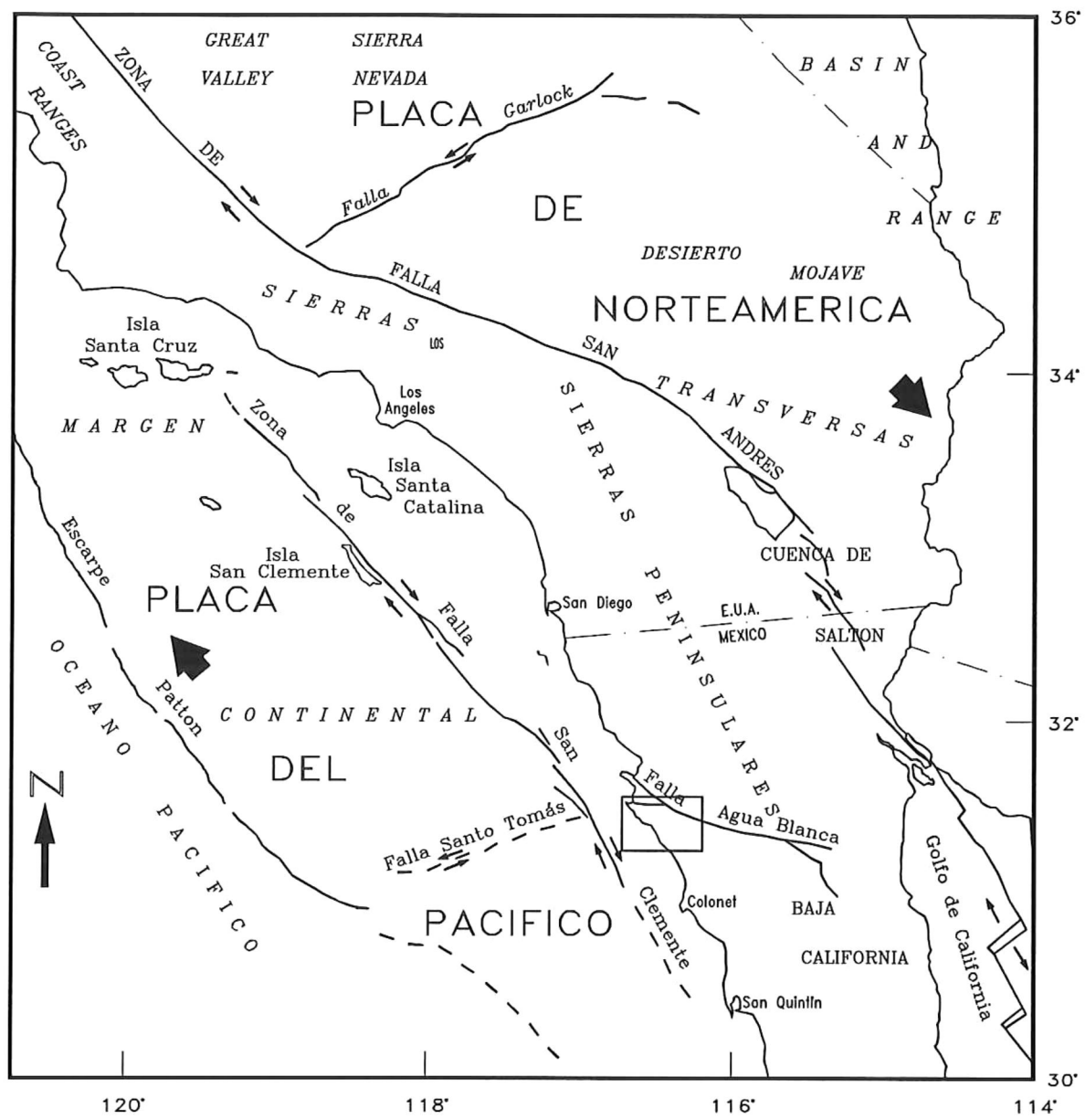


Fig. 1. Rasgos tectónicos del sur de California y norte de Baja California (tomado de Legg et al., 1991). El recuadro indica el área de este estudio.

El propósito de este estudio radica en la estimación del grado de estabilidad estructural regional y en la caracterización de estructuras de falla del Bloque Santo Tomás, inscrito entre el Cañón y Valle Santo Tomás, el Cañón Guadalupe-La Angostura, la costa del Pacífico y el Cañón San Isidro, hacia el norte, este, oeste y sur, respectivamente.

## II. ANTECEDENTES

### a) Trabajos Regionales

El número de estudios dirigido al entendimiento de la historia y evolución tectónica del oeste de Norteamérica, y en particular al origen y desarrollo del Sistema de Fallamiento Transforme de San Andrés, se ha incrementado enormemente. Por tal razón, solamente se citarán algunos de los trabajos que han contribuido de manera significativa al entendimiento de la historia tectónica de la región, y específicamente, al conocimiento sobre el origen y evolución del Sistema de Fallamiento Transforme de San Andrés. Entre estos trabajos, se encuentran los realizados por Menard (1960), Crowell (1962), Larson *et al.* (1968), Atwater (1970), Tchalenko (1970), Wilcox *et al.* (1973), Crowell (1974), Dibblee (1977), Crowell (1979), Spencer y Normark (1979), Dickinson (1981), Gastil *et al.* (1981), Atwater (1989), Spencer y Normark (1989), Lonsdale (1991), etc. Los tópicos que incluyen los trabajos mencionados, cubren la historia tectónica de la región, el origen del Sistema de Fallamiento Transforme de San Andrés, la magnitud del desplazamiento en la Falla de San Andrés, estudios relacionados con la apertura del Golfo de California, hasta trabajos experimentales en zonas de cizallamiento en dominios rotacionales.

### b) Trabajos Locales

De manera más local e incluyendo los rasgos estructurales principales que tienen influencia sobre la estabilidad estructural de la zona de estudio (Fig. 1), existen trabajos que datan desde los años sesentas. Entre éstos, se encuentra el trabajo de Allen *et al.* (1960), donde se hace la primera descripción geológica y estructural de la Falla de Agua Blanca.

Mediante estudios geofísicos, Krause (1965) observa que las isobatas que definen cuencas y dorsales en aproximadamente  $31^{\circ} 30'$  de latitud norte (hacia el poniente de Punta San José), se

encuentran desfasadas aproximadamente 15 km como consecuencia de corrimientos izquierdos a lo largo de lo que podría ser la prolongación en borde continental de la Falla de Santo Tomás. Este autor muestra cambios de orientación importantes en las líneas de isointensidad del campo magnético total, indicando estructuras que ponen en contacto dos cortezas contrastantes hacia el norte y sur de la propuesta prolongación de la Falla Santo Tomás.

Con base en estudios de perfiles de reflexión sísmica llevados a cabo en los años sesentas en la plataforma continental, se ha propuesto también la continuación de la Falla de Santo Tomás hacia la plataforma continental peninsular (20 km aproximadamente) y su cambio gradual de orientación de N80W a S60W (Moore, 1969).

Gastil *et al.* (1975) consideran a la Falla de Agua Blanca dentro del grupo de lineamientos estructurales mayores de la Península de Baja California. En este trabajo, mencionan algunas estructuras geológicas del Mesozoico truncadas por la Falla de Agua Blanca, por lo que asocian el origen de esta falla con la subducción de la Placa Farallón durante el Jurásico-Cretácico (Gastil *et al.*, 1981; González y Suárez, 1984; Suárez-Vidal *et al.*, 1991).

En un estudio sobre la deformación cuaternaria de las terrazas marinas localizadas entre Ensenada y El Rosario, Orme (1974) llega a las siguientes conclusiones: (1) que la Península de Baja California se está moviendo hacia el NW como una serie de bloques delimitados por fallas mayores de desplazamiento lateral, como las fallas de Agua Blanca, San Miguel y San Benito, (2) que el análisis de las terrazas marinas es importante en la identificación e interpretación de las estructuras de deformación impuestas por el tectonismo cuaternario, y (3) que el fallamiento con orientación NE-SW, localizado a lo largo de la costa dentro de la zona de las terrazas, puede ser

una manifestación continental de la actividad tectónica en la plataforma continental de la Península de Baja California. Asimismo, menciona que la Península de Baja California ha sido una región tectónicamente inestable en el pasado geológico reciente.

A partir del enjambre sísmico ocurrido en San Quintín en 1975, Rebollar *et al.* (1982) plantean una posible asociación entre éste y una falla transcurrente cuya orientación podría ser N40W, según lo indica una de las dos soluciones de plano de falla que obtuvieron a partir de mecanismos focales.

En años más recientes, se han llevado a cabo estudios de carácter neotectónico, basados en observaciones geológicas y sismológicas dentro de las regiones sismotectónicas que comprenden el borde continental y las sierras peninsulares. El realizado por González y Suárez (1984) plantea la posible existencia de una nueva rama de la Falla de Agua Blanca que se proyecta hacia la Bahía Todos Santos con orientación N52W. Esta propuesta se apoya en observaciones geológicas hechas por Armijo y Suárez (1981) y en la localización epicentral del enjambre sísmico ocurrido en la Bahía Todos Santos en el año de 1981.

Con base en estudios de carácter sedimentológico realizados en un sector de la Falla de Agua Blanca, Ortega (1988) concluye que la Falla de Agua Blanca, a pesar de la ausencia de una sismicidad histórica significativa, es un elemento tectónico capaz de generar sismos hasta de 7 grados de magnitud y desplazamientos de 0.5 a 1.0 metros, con intervalos de recurrencia de 75 a 200 años, por lo que se le debe considerar como un elemento tectónico activo mayor en el norte de la Península de Baja California. En la revisión que hacen de los elementos estructurales mayores en el norte de la Península de Baja California, Suárez-Vidal *et al.* (1991) apoyan esa conclusión.

A lo largo de la plataforma continental del norte de la Península de Baja California, algunos autores (Legg y Wong, 1982, 1989; Legg *et al.*, 1987) sugieren la existencia de dos sistemas mayores de fallamiento Cuaternario de tipo lateral derecho. Uno de estos sistemas, se conecta en el continente

con la Falla de Agua Blanca (Sistema de Fallamiento de Agua Blanca), en tanto que el otro sistema (Sistema de Fallamiento de San Clemente), se continúa hacia el sur a lo largo de la plataforma continental, probablemente hasta San Quintín, según las evidencias aportadas por Rebollar *et al.* (1982). Cada una de las zonas de falla que forman parte de los sistemas arriba mencionados, muestran distintas evidencias de actividad cuaternaria.

En la Península de Punta Banda, Rockwell *et al.* (1989) encontraron evidencias de actividad tectónica del Cuaternario tardío. El estilo de deformación que se observa en las terrazas marinas de esta península, indica la existencia de al menos tres fallas transpeninsulares, al parecer sintéticas a la Falla de Agua Blanca.

Por último, a partir del análisis estructural en 26 sitios de control, y tomando como base el diagrama ideal de cizalla simple (Harding, 1974), Delgado-Argote *et al.* (1990) proponen la posibilidad de que el Bloque Santo Tomás esté rotando en sentido contrario al de las manecillas del reloj. La rotación del bloque la atribuyen al dominio que presentan las estructuras de desplazamiento lateral derecho en la parte norte del Bloque Santo Tomás, contrariamente a lo que se observa en su extremo sur, donde las estructuras de desplazamiento lateral izquierdo son las que dominan.

### III. OBJETIVOS

Los objetivos que comprende el trabajo en la zona del Bloque Santo Tomás, son los siguientes:

- 1) Mostrar la correlación entre los lineamientos interpretados en imagen de satélite y las estructuras de falla medidas en campo.
- 2) Caracterizar estructuras de falla en un sistema tectónicamente activo.
- 3) Estimar la estabilidad tectónica en el Bloque Santo Tomás.

#### IV. DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO

El presente estudio se realizó en un área de aproximadamente 600 km<sup>2</sup>, conocida como "Bloque Santo Tomás" (Gastil *et al.*, 1975). Este bloque, se localiza entre los 16°15'00" y los 16°41'48" de longitud oeste y entre los 31°16'22" y los 31°34'46" de latitud norte (Fig. 2).

El Bloque Santo Tomás, se encuentra delimitado por rasgos estructurales y morfológicos bien definidos. Hacia el norte, lo limita el Cañón y Valle Santo Tomás; hacia el sur, el Cañón San Isidro; hacia el este y oeste, lo delimitan el Cañón Guadalupe-La Angostura y la costa del Pacífico, respectivamente.

La fisiografía del área de estudio es accidentada en su parte central, con desarrollo de mesas suaves al oeste del cinturón montañoso. Se encuentra flanqueada hacia el oriente, por los valles de Santo Tomás, San Jacinto y San Vicente. El patrón montañoso en la parte central del Bloque Santo Tomás, está constituido por dos segmentos rectilíneos que siguen la orientación de la costa. El segmento hacia el norte del área de estudio, tiene una longitud aproximada de 26 km, y una anchura máxima de 10 km; el segmento hacia el sur, alcanza una longitud de 21 km, y una anchura máxima de 8.5 km. La elevación máxima en ambos segmentos, es de 700 y 640 m, respectivamente.

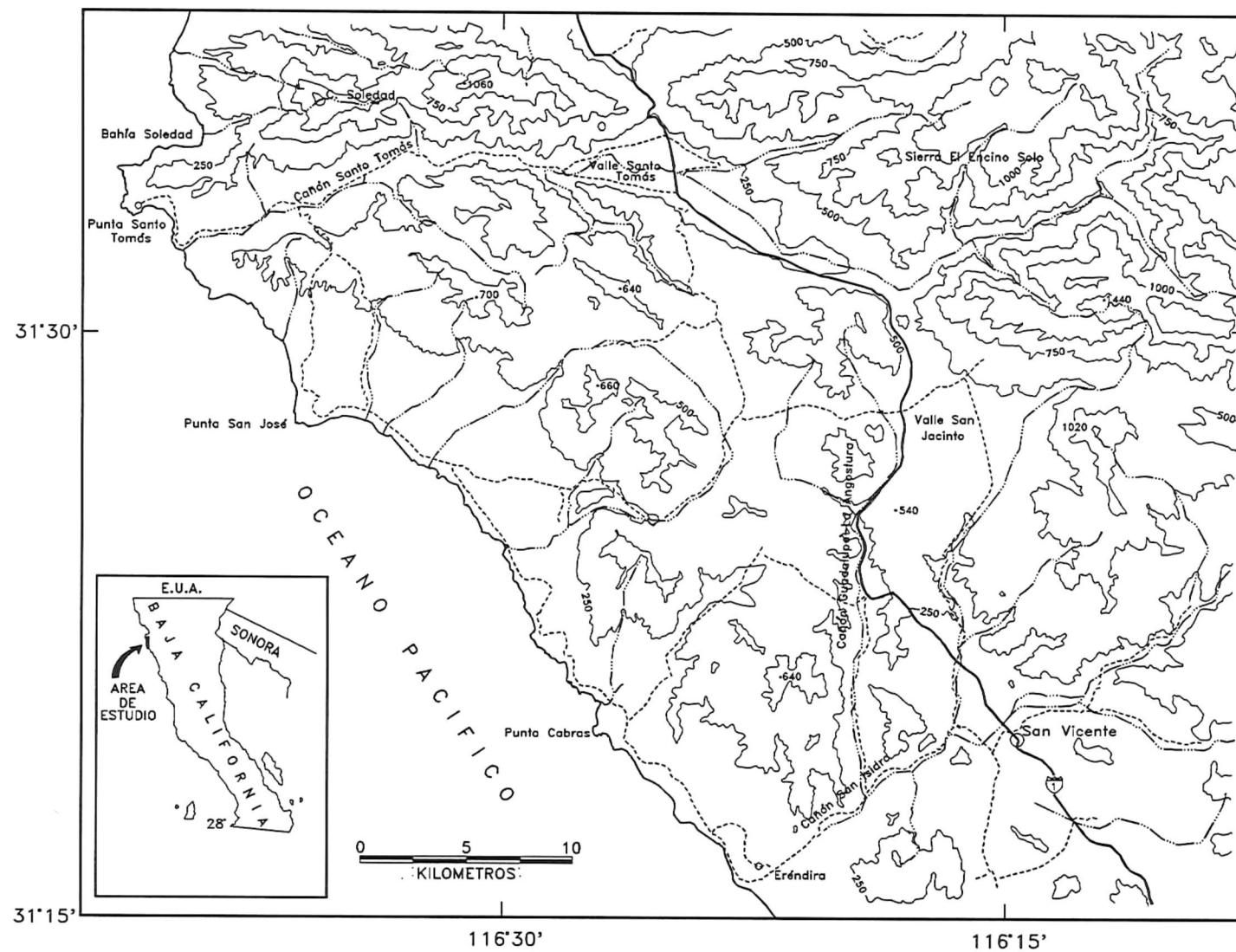


Fig. 2. Mapa de localización del área de estudio

## V. MARCO GEOLOGICO DE REFERENCIA

Litológicamente, el Bloque Santo Tomás está constituido principalmente por rocas volcanosedimentarias de la Fm. Alisitos (Santillán y Barrera, 1930), rocas plutónicas pertenecientes al Batolito Peninsular, y un cinturón de rocas sedimentarias en el extremo oeste de nuestra zona de estudio (Fig. 3).

La Fm. Alisitos descrita primeramente por Santillán y Barrera (1930), es una secuencia volcanosedimentaria constituida por brechas volcánicas, derrames andesíticos, calizas biohémicas y sedimentos tobáceos y piroclásticos (Allison, 1955; Gastil *et al.*, 1975; Beggs, 1984; en Suárez-Vidal, 1987). Esta formación, está asociada a un arco magmático insular relacionado con los procesos de subducción que se sucedieron durante el Jurásico-Cretácico, específicamente, en el tiempo correspondiente al Aptiano-Albiano (Allison, 1964; en Gastil *et al.*, 1975). Las rocas de esta formación, forman parte del terreno prebatolítico de Gastil y colaboradores (1975), y la mayor parte de nuestra zona de estudio se encuentra cubierta por las rocas volcanosedimentarias de esta formación.

Las rocas graníticas que se encuentran en el área de estudio, constituyen la frontera temporal entre el terreno metamorfozado prebatolítico de Gastil y colaboradores (1975) y las rocas de origen posterior a la intrusión de los cuerpos plutónicos. Estos cuerpos forman parte del Batolito Peninsular Bajacaliforniano, y su espectro litológico va desde gabros hasta granitos (Gastil *et al.*, 1975; Morán-Zenteno, 1984). Aunque la relación entre los cuerpos batolíticos y las rocas prebatolíticas es clara en algunos sitios, hay lugares en los que las relaciones de campo son confusas. Al parecer, el emplazamiento de los cuerpos graníticos es contemporáneo en algunos sitios y posterior en otros, a la actividad magmática que dio origen a las rocas volcánicas de la Fm. Alisitos, presentando su fase terminal hace aproximadamente 90 Ma (Gastil *et al.*, 1975). A lo largo de toda la zona de estudio,

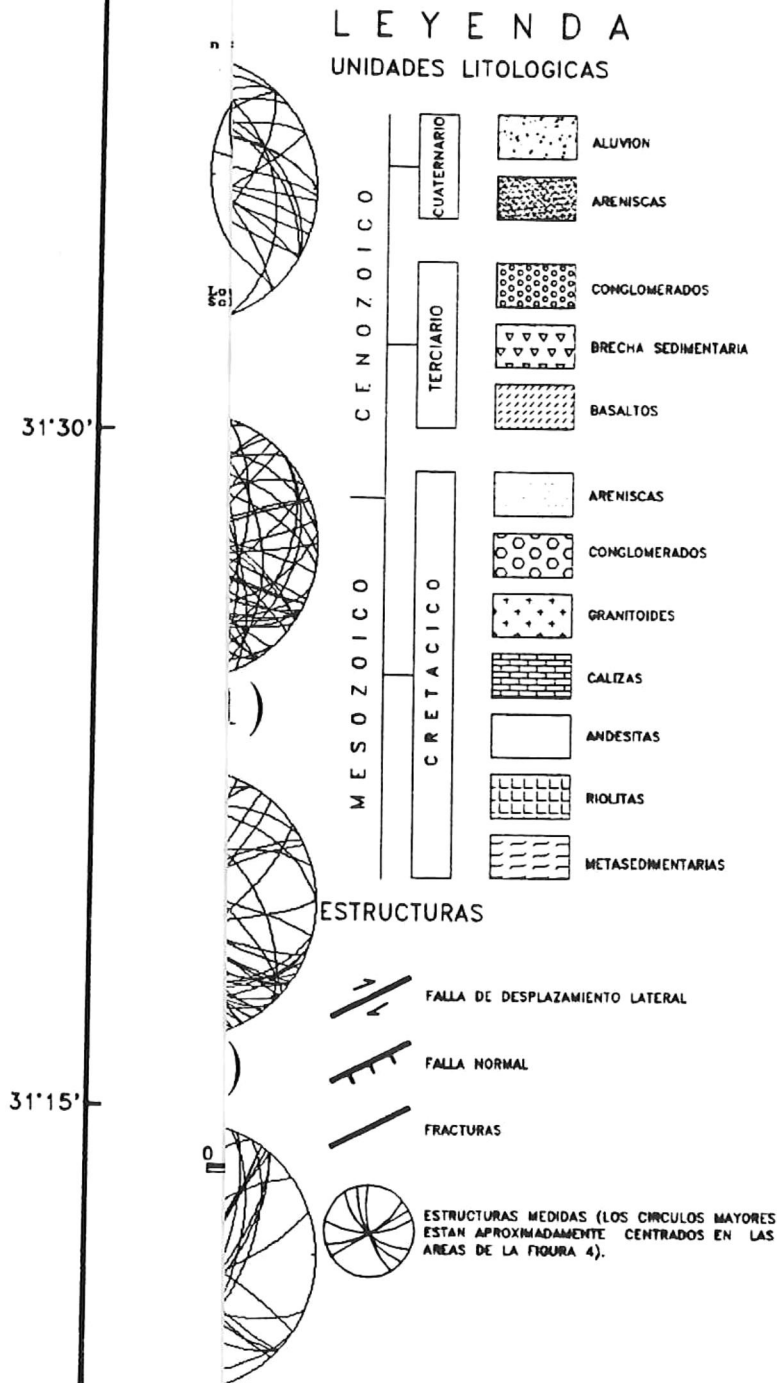


Fig. 3. Los círculos mayores representan el fallamiento normal y los números entre paréntesis representan el número de fallas normales que se encuentran en cada uno de los círculos mayores representados en la Fig. 4., y los números entre paréntesis representan el número de fracturas que se encuentran en cada uno de los círculos mayores representados en la Fig. 4.

afloran pequeños cuerpos intrusivos, siendo únicamente dos, los cuerpos que por sus dimensiones llaman la atención. El primero de ellos, es un cuerpo zonificado cuya composición varía de máfica (diorítica) a félsica (granito) del núcleo hacia la periferia del mismo. Este granitoide se encuentra en los alrededores del poblado Las Cruces, y se prolonga hacia el SE hasta el poblado de San Vicente (Fig. 3). El segundo intrusivo de importancia, es un cuerpo de menor tamaño que aflora en las proximidades al Rancho Las Minas (Fig. 3), donde se pone en contacto con las rocas sedimentarias del área.

Las rocas sedimentarias que afloran en la parte oeste de la zona de estudio, forman un cinturón sedimentario bien definido, constituido por rocas del Cretácico Superior y del Plio-Pleistoceno. Esta franja sedimentaria se encuentra delimitada al oeste por el Océano Pacífico y al este por la "Línea de Santillán y Barrera" de Gastil y colaboradores (1975); siendo esta última, el lineamiento estructural que define el alcance de la máxima transgresión marina ocurrida a partir del Cretácico Tardío (hace unos 84 Ma). Las rocas cretácicas que se observan en esta franja son parte de la Fm. Rosario, nombrada por Beal (1924; en Gastil *et al.*, 1975), y definen un período de relativa calma tectónica durante el Cretácico Tardío. Estos depósitos sedimentarios están constituidos por material detrítico que se deriva de las rocas volcánicas y graníticas de los terrenos ubicados al oriente de la "Línea de Santillán y Barrera" (Gastil *et al.*, 1975; Morán-Zenteno, 1984). La Fm. Rosario es una secuencia formada principalmente por areniscas, limolitas y lutitas, con presencia de fósiles marinos y continentales del Campaniano-Maestrichtiano.

Aunque se observan afloramientos de la Fm. Rosario en los acantilados a lo largo de la costa, son los depósitos que forman las terrazas marinas, los sedimentos que dominan el cinturón costero expuesto en la zona de estudio. De acuerdo con las fechas obtenidas, tanto relativas como absolutas, las terrazas se formaron durante el Plioceno Tardío y Pleistoceno (Emerson, 1956; Orme, 1974;

Gastil *et al.*, 1975; Rockwell, 1989), principalmente como resultado de la actividad tectónica cuaternaria (Orme, 1974; Rockwell, 1989) a lo largo de la costa oeste de Baja California. Según las relaciones de campo, tanto en la zona de estudio como en otros sitios, estos depósitos plio-pleistocénicos descansan en discordancia erosional sobre los estratos de la Fm. Rosario (Gastil *et al.*, 1975; Delgado-Argote *et al.*, 1990). Además de estos depósitos, en la zona de Punta Cabras se observa el desarrollo incipiente de un campo de dunas holocénico, parcialmente estabilizado que sobreyace de forma parcial a las terrazas marinas.

Estructuralmente, el área de estudio está influenciada por elementos activos mayores a nivel peninsular (Suárez-Vidal *et al.*, 1991). Su límite norte, corresponde a la Falla de Agua Blanca, la cual se caracteriza porque aun formando parte del Sistema de Fallamiento de San Andrés, a diferencia de las otras fallas del sistema, presenta una orientación oblicua con respecto a éste; siendo su orientación similar a la de las Cordilleras Transversales del sur de California (Fig. 1)(Allen *et al.*, 1960; González y Suárez, 1984; Suárez-Vidal *et al.*, 1991). La Falla de Agua Blanca nace al este en el Paso San Matías (no mostrado en el mapa geológico), continuándose hacia el oeste hasta el Valle Santo Tomás, donde se bifurca en una rama norte y una rama sur (Allen *et al.*, 1960). La rama norte, o más propiamente la Falla de Agua Blanca, se puede seguir hacia la plataforma continental, en donde se conecta con el sistema de fallamiento del mismo nombre (Legg y Wong, 1982, 1989; Legg *et al.*, 1987). La rama sur o Falla de Santo Tomás (Allen *et al.*, 1960; Moore, 1969) a diferencia de la rama norte, se continúa hacia el oeste hasta chocar con la costa del Pacífico en Bahía Soledad (Fig.2)(Krause, 1965). En la plataforma continental, esta falla se curva gradualmente alcanzando una orientación de S60°W, pudiéndose seguir por aproximadamente 20 km y probablemente una distancia mayor a través de la plataforma continental (Moore, 1969; Legg y

Wong, 1989). Al parecer, la prolongación norte de la Falla de Agua Blanca, es el ramal que muestra mayor actividad reciente, según evidencias geológicas y sísmicas (Allen *et al.*, 1960; Gastil *et al.*, 1975; González y Suárez, 1984).

Otro elemento estructural mayor en la zona de estudio, lo constituyen el conjunto de fallas que se encuentran en la Provincia del Borde Continental. Los estudios de geofísica marina llevados a cabo en la plataforma continental, indican que ésta se encuentra afectada por dos sistemas mayores de desplazamiento lateral: el Sistema de Fallamiento de Agua Blanca y el Sistema de Fallamiento de San Clemente. Este último, dada su ubicación con respecto al área de estudio (Figs. 1 y 2), podría tener mayor influencia en el patrón estructural observado en el Bloque Santo Tomás; en particular, la actividad tectónica que se origina en la zona de falla de San Isidro, que corre a lo largo de la plataforma continental al oeste de la misma (Legg y Wong, 1989, Fig. 1). Algunos autores (Legg y Wong, 1989; R. L. Sedlock, comunicación oral, 1991) consideran que estos sistemas de fallas son parte activa del límite actual entre la Placa Pacífico y la Placa de Norteamérica; incluso, les atribuyen parte del movimiento total que se da entre estas dos placas.

## VI. METODOLOGIA

La metodología mediante la cual se cubrieron los objetivos de estudio, consistió en tres etapas que a continuación se desarrollan:

- 1ª) Mediante el uso de una imagen de satélite LANDSAT (No. 132, INEGI) se efectuó una interpretación de lineamientos en la zona de estudio (Fig. 4) con la finalidad de obtener un patrón geométrico regional.
- 2ª) La segunda etapa, comprendió un mes de trabajo de campo, durante la cual, se verificó la existencia de las estructuras interpretadas a partir de la imagen de satélite. De las estructuras observadas, se obtuvieron los datos de actitud estructural (orientación de plano de falla, echado de plano de falla y ángulo de líneas de estrías) con los que se trabajó en el análisis de gabinete. Paralelamente a la obtención de los datos estructurales, se llevó a cabo un monitoreo sísmico durante un período de diez días. En este monitoreo, se empleó un sismógrafo MQ-800 acoplado a un sensor tipo RANGER SS1 de componente vertical. Durante el monitoreo, el equipo trabajó con una ganancia de 78 decibeles, misma que se consideró como el nivel máximo permitido de acuerdo a las condiciones de ruido ambiental en el sitio de emplazamiento.
- 3ª) El análisis de gabinete constó de tres fases. En la primera se buscó la correlación entre los lineamientos interpretados en imagen de satélite (Fig. 4) y los rasgos estructurales medidos en campo (Fig. 3). La segunda, comprendió la caracterización del tipo de fallamiento observado en el campo, con la finalidad de proponer las condiciones dinámicas que generaron dicho fallamiento en cada uno de los sitios de control, para poder proponer las condiciones de esfuerzos a las que ha estado sujeto el Bloque Santo Tomás, según el patrón estructural observado. Para lo anterior, además de considerarse las observaciones cualitativas

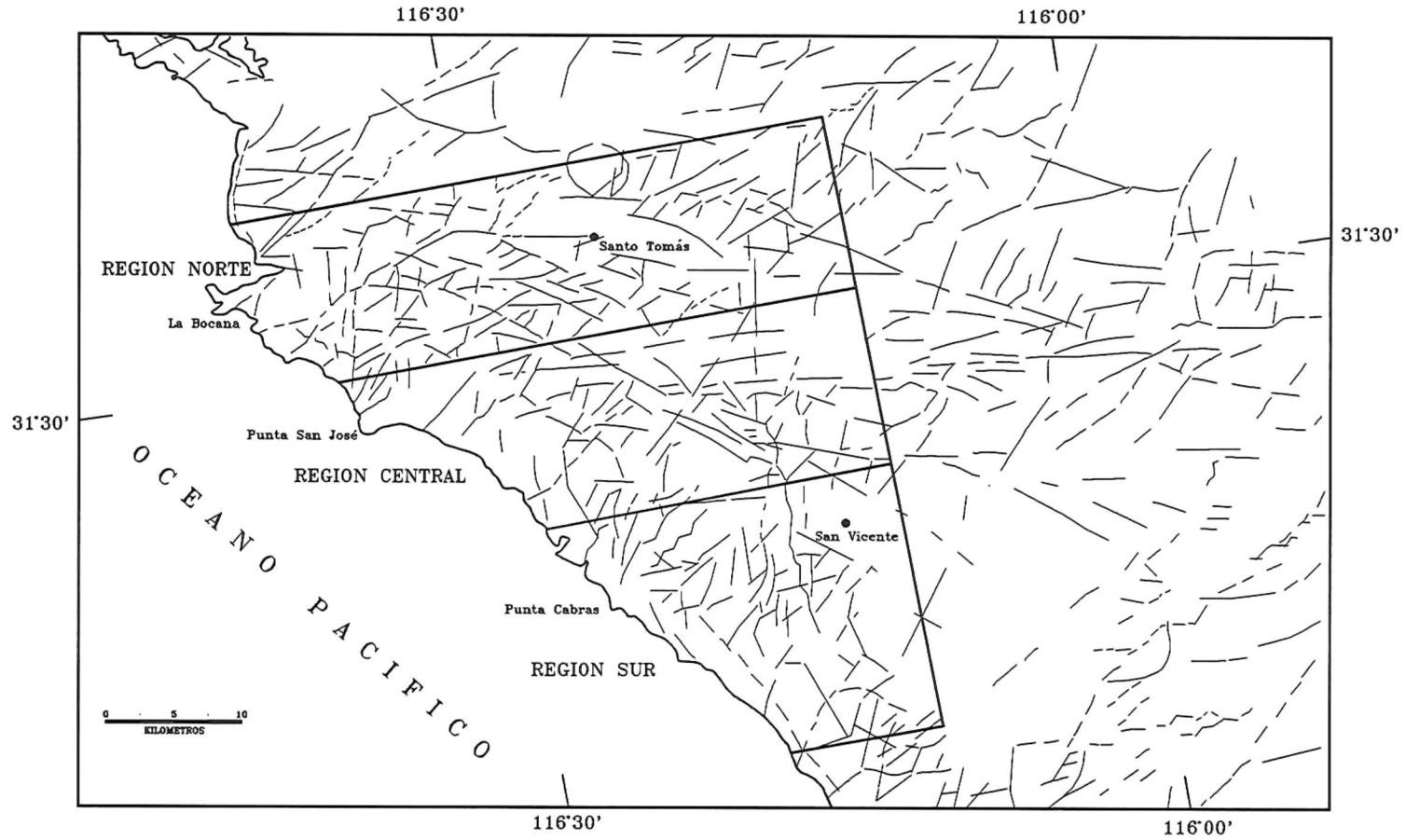


Fig. 4. Interpretación de lineamientos estructurales utilizando la imagen de satélite LANDSAT (132, INEGI) digitalizada (modificada de Delgado-Argote *et al.*, 1990).

(relaciones de campo) efectuadas en campo, se adoptó la teoría Andersoniana o modelo de fallamiento de Coulomb-Anderson [las consideraciones del modelo, se discuten en Ragan (1973) y Rowland (1986), entre otros]. En esta fase del análisis, se trabajó con la red de Schmidt o Lambert (red de áreas iguales) y con los programas MICRONET y GEOPAL1. Finalmente, en la tercera fase, se estimó la estabilidad tectónica de la zona de estudio, integrando los resultados que arrojó el análisis estructural y el monitoreo sísmico.

## VII. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### VII.1. Aspectos Generales

Con base en la interpretación preliminar de lineamientos en la imagen de satélite (Fig. 4), se eligieron las áreas para realizar la verificación de rasgos estructurales y medición de actitud estructural.

El Bloque Santo Tomás (Fig. 2) se dividió en doce áreas para fines de caracterización estructural (Fig. 5), considerando primeramente las características fisiográficas y estilo estructural, y en menor grado, su composición litológica.

La extensión del área de muestreo estructural es de aproximadamente 600 km<sup>2</sup>. Se llevó a cabo la toma de datos estructurales en 80 sitios de control, lo cual da una densidad de muestreo de un sitio cada 7.5 km<sup>2</sup>. En la región de Punta Cabras (áreas XI y XII) la metodología de trabajo varía un poco, debido a que algunos de los objetivos iniciales del trabajo se encuentran ligados con ciertos aspectos de interés que la C.F.E. tiene sobre la región, y a partir de los cuales se origina el presente trabajo. En esta región, se realizó un trabajo estructural de detalle. Para lo anterior, la región de Punta Cabras se dividió en Punta Cabras Norte (Area XI) y Punta Cabras Sur (Area XII), tomando como límite estructural entre éstas, al Cañón Santa Cruz.

### VII.2. Correlación Estructural

Con la finalidad de establecer la correlación entre los lineamientos interpretados en la imagen de satélite y los rasgos estructurales medidos en campo, el Bloque Santo Tomás se dividió en tres regiones: Región Norte, Región Central y Región Sur (Fig. 4). La orientación E-W y la extensión de las regiones mencionadas obedece a varias razones. La primera de ellas, y la más importante, toma en cuenta que las zonas de muestreo son pequeñas en relación al tamaño del bloque, por lo que

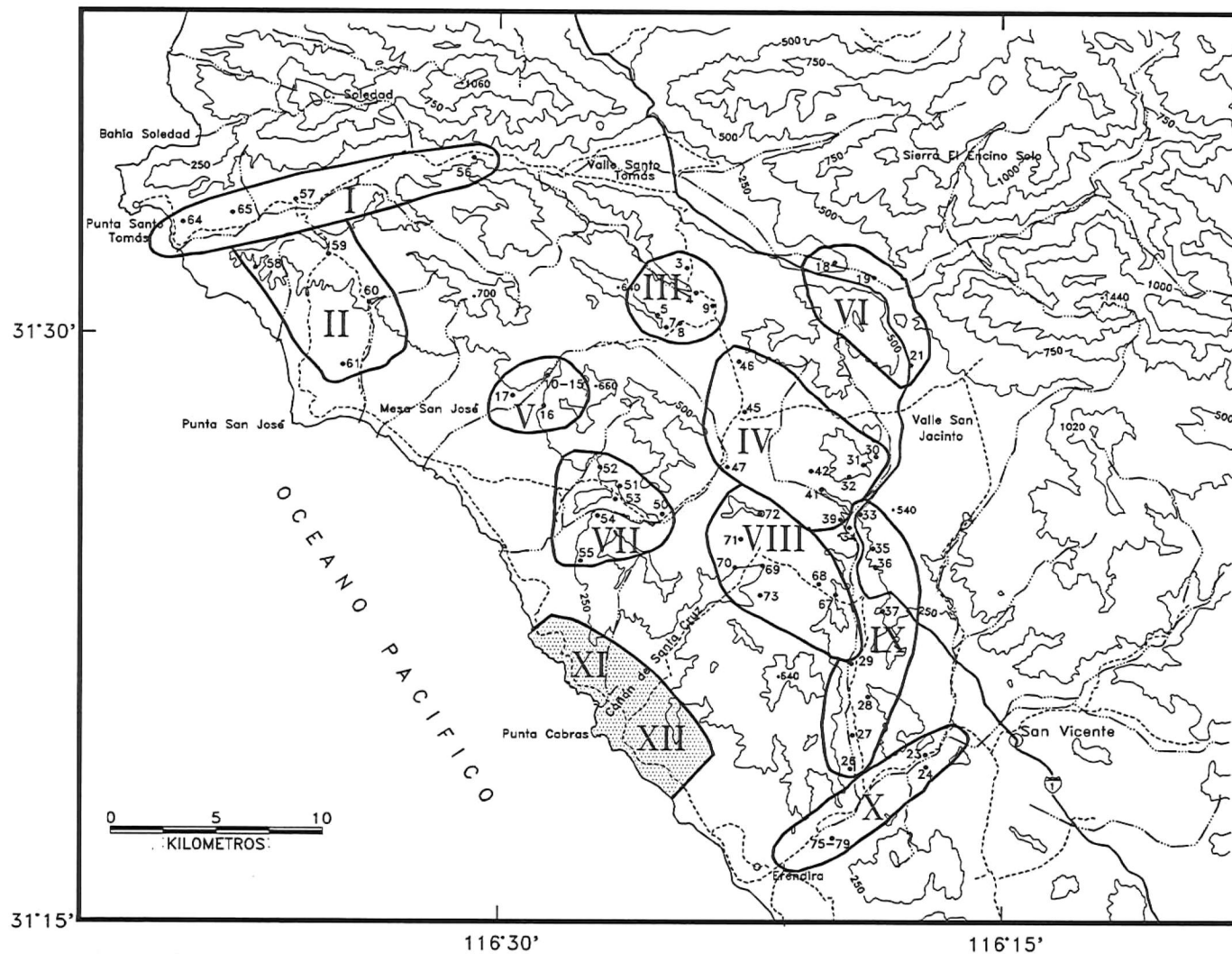


Fig. 5. Mapa de localización de los sitios de control estructural y su agrupamiento en áreas. Las áreas XI y XII no tienen sitios de control en vista de que fueron medidas con detalle de campo (modificado de Delgado-Argote *et al.*, 1990).

se buscó que la orientación de las regiones definidas, correspondiera con el mayor traslape posible entre los dos conjuntos de datos, y que la correlación resultara representativa. Asimismo, cada una de las regiones se subdividió en cuadrantes de medición de aproximadamente  $80 \text{ km}^2$ , buscando darle un significado estadístico a la información obtenida a partir de la imagen de satélite. La mecánica del conteo fue la siguiente: los lineamientos curvos se midieron más de una vez, utilizando tangentes que difirieran en más de  $10^\circ$ , y los lineamientos que cruzan los cuadrantes de medición ( $80 \text{ km}^2$ ), fueron contados por duplicado.

En las figuras 6a y 7a se puede observar la orientación del conjunto de datos obtenido a partir de la imagen de satélite (589 lineamientos) y el conjunto de rasgos estructurales medidos en campo (380 planos de falla), respectivamente. En ambas figuras, se observa *grosso modo* que las estructuras se orientan principalmente en dos direcciones: en la Figura 6a se puede ver una tendencia hacia el WNW y otra hacia el NE, mientras que en la Figura 7a, las estructuras de falla tienden a orientarse principalmente hacia el NW y NE. También se observa que las estructuras medidas en campo hacia el NE (Fig. 7a), presentan una dispersión menor, que la mostrada por los lineamientos de satélite (Fig. 6a) en esa misma dirección. Además, es notable la escasez de lineamientos con dirección NNW, mientras que las fallas medidas muestran una abundancia relativamente alta.

En el análisis de correlación estructural, se consideró la división regional de la Figura 4, lo cual significa, que los rasgos estructurales interpretados en la imagen de satélite en cada una de las regiones, se correlacionarán solamente con los datos de campo obtenidos en las áreas estructurales que se encuentren en cada una de éstas (Figs. 4 y 5). Al final, se hará una correlación global.

En la Figura 6b, se muestra la orientación de los lineamientos estructurales de la imagen de satélite (257 lineamientos) en la Región Norte de la zona de estudio (Fig. 4). En esta figura, se puede

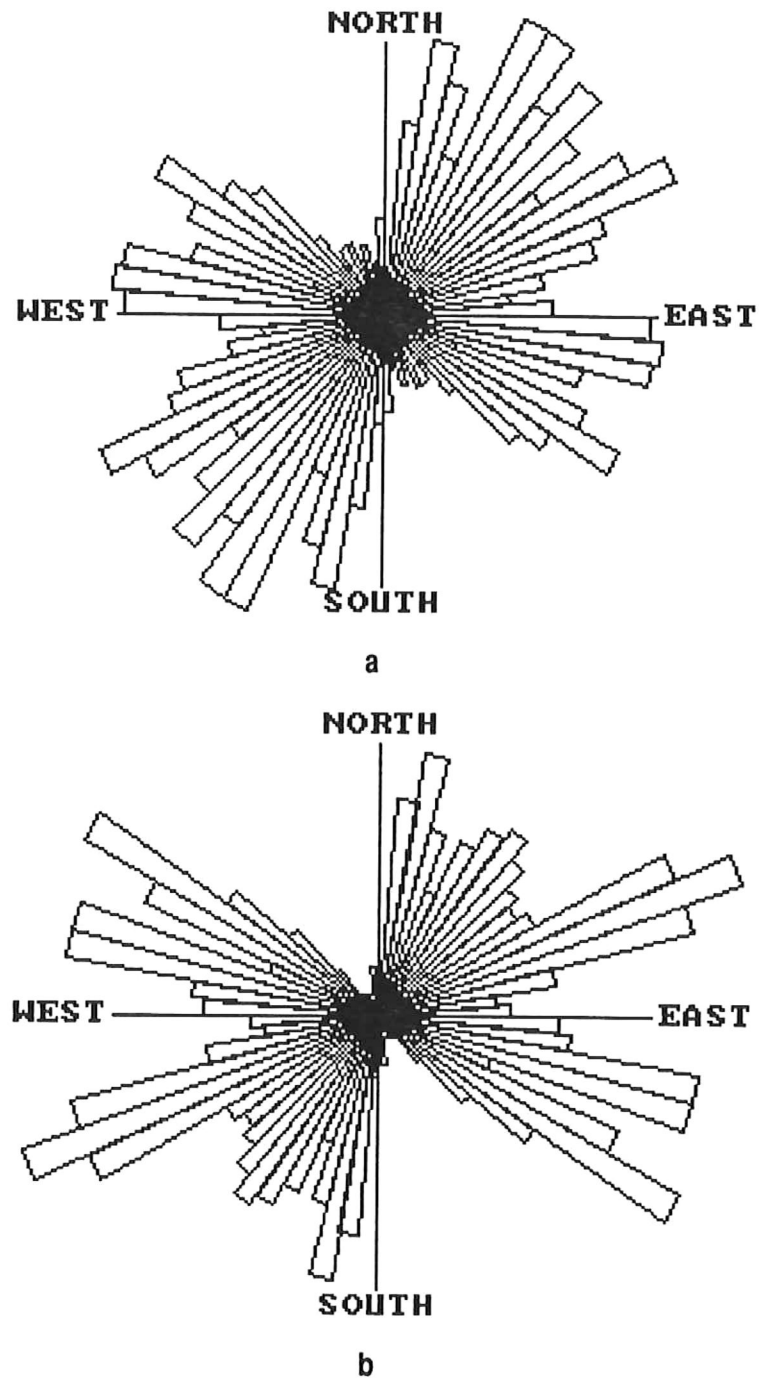


Fig. 6. Rosas de fallamiento construidas con base en el conteo de lineamientos en imagen de satélite, con intervalos de clase de 5°. a) Total de lineamientos en el Bloque Santo Tomás (589). b) Lineamientos en la Región Norte del Bloque Santo Tomás (257).

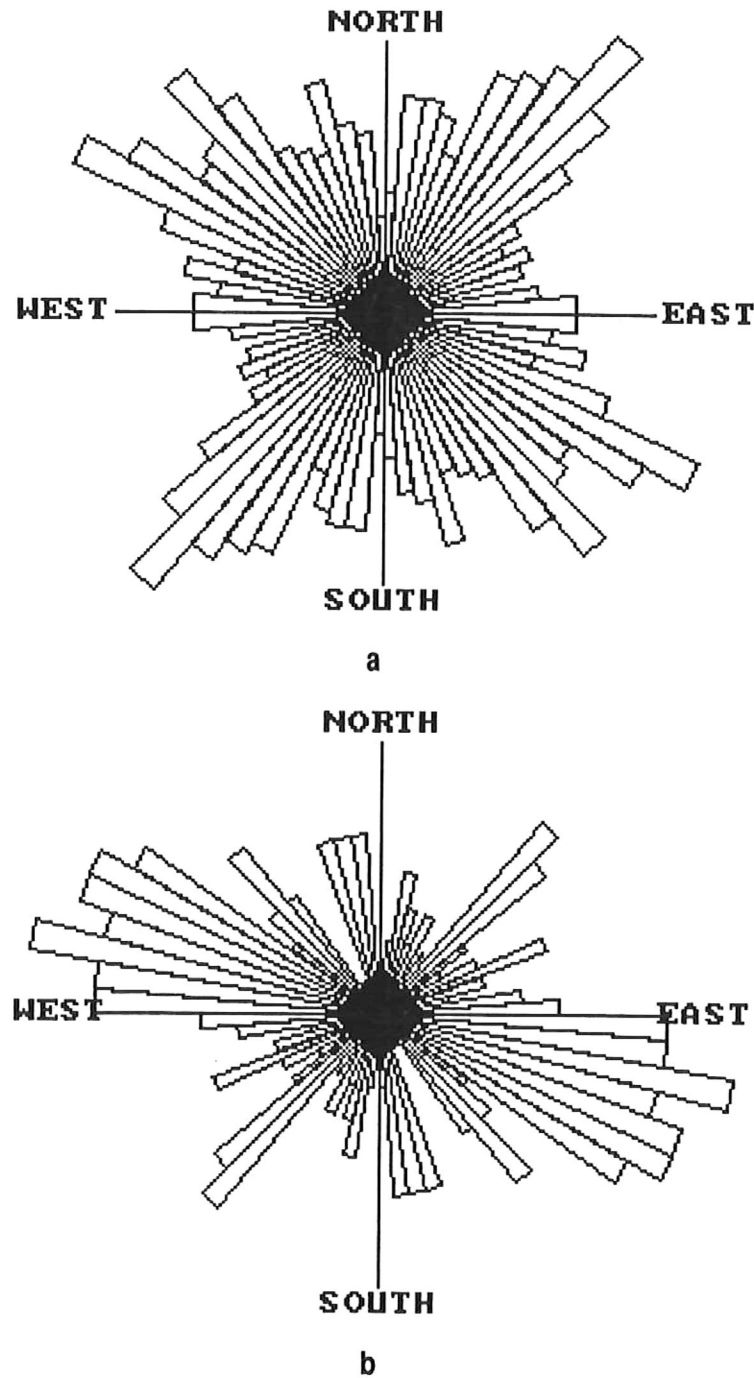


Fig. 7. Rosas de fallamiento construidas con base en las estructuras medidas en campo, con intervalos de clase de 5°. a) Total de estructuras en el Bloque Santo Tomás (380). b) Estructuras en la Región Norte del Bloque Santo Tomás (96).

ver que los rasgos estructurales en la región, se orientan principalmente hacia el WNW (entre N50W y N80W) y hacia el ENE (entre N60E y N75E); también, se pueden identificar dos tendencias secundarias con orientación promedio en N12E y N35E. Las tendencias principales (WNW y ENE), se correlacionan de manera favorable con la orientación de los rasgos estructurales mayores dentro de la zona de estudio (Sistema Santo Tomás-Agua Blanca) y con las estructuras menores paralelas a éstos. Por otro lado, los lineamientos con orientación ENE, representan el cambio de orientación que experimenta la Falla de Santo Tomás conforme ésta se aproxima a la costa (Fig.4). Llama la atención que en la imagen de satélite no se observen estructuras hacia el NNW, lo cual se manifiesta en el diagrama de rosas de la Figura 6b, en el intervalo entre N40W y N-S. De igual forma, es evidente el reducido número de lineamientos con orientación E-W.

En el diagrama de la Figura 7b, se presenta la orientación de las estructuras de falla medidas en el campo en la Región Norte del Bloque Santo Tomás (Fig. 4). El diagrama se construyó a partir de la orientación de 96 planos de falla, obtenidos en las áreas estructurales I, II, III y VI (Fig. 5). Es evidente, según se desprende de la Figura 7b, que el fallamiento en la región se orienta principalmente hacia el W-WNW (entre N55W y N90W); no obstante, es posible observar tres tendencias menores hacia el NE, con orientaciones promedio en N15E, N45E y N67E. Al igual que en la Figura 6b, las tendencias que se orientan hacia el W-WNW y ENE (N67E), son congruentes con la orientación de los rasgos estructurales mayores descritos en el párrafo anterior y con el cambio de orientación que experimenta la Falla de Santo Tomás.

El análisis detallado de las figuras 6b y 7b permite ver, que en ambos casos las tendencias descritas representan los mismos rasgos estructurales. Las cuatro tendencias identificadas en cada una de las figuras presentan la misma orientación, lo cual significa que el fallamiento medido en el campo responde a los lineamientos de la imagen satélite. En general, las diferencias que se observan

entre las dos figuras, son mínimas. La tendencia principal con orientación WNW en la Figura 6b, se extiende en diez grados en la Figura 7b hacia W-WNW, debido a que el número de estructuras con orientación E-W medidas en el campo, es relativamente mayor que el número de lineamientos de satélite observados en esta misma dirección. Esto explica la frecuencia comparativamente alta de las estructuras orientadas entre N85W y N90W en la Figura 7b. La mayor diferencia entre ambas figuras se observa en el número de estructuras hacia el NNW; es evidente que en los datos de la imagen de satélite no se presentan estructuras orientadas en esta dirección, contrariamente a lo que sucede con los datos de campo.

En la Figura 8a, se muestra la orientación que presentan los lineamientos de satélite (187 lineamientos) en la Región Central del Bloque Santo Tomás (Fig. 4). En la misma, se observa como estos lineamientos se agrupan principalmente hacia el NE (entre N25E y N65E), E-W y NW (entre N40W y N65W), constituyendo tres tendencias bien definidas. A diferencia de la Región Norte, en esta región se observa el desarrollo de una tendencia con orientación E-W, así como la presencia, aunque pequeña, de lineamientos en el intervalo entre N40W y N-S. Además de las diferencias anteriores, también se observa que los lineamientos hacia el NE se definen mejor que en la Región Norte, presentando una orientación promedio en N45E (Fig. 8a). La mayor parte de los lineamientos en la región, se orienta en la dirección anterior.

Por su parte, la orientación de las estructuras de falla medidas en campo en la Región Central (Fig. 4), se muestra en la Figura 9a. El diagrama de rosa correspondiente a la misma, se construyó con base en los datos (190 planos de falla) obtenidos en las áreas estructurales IV, V, VII, VIII y IX (Fig. 5). De acuerdo con este diagrama, el fallamiento en la región se orienta principalmente en direcciones NW (entre N35W y N65W), NE (entre N25E y N65E) y E-W. De las tres tendencias observadas, la que mayor número de estructuras presenta es la NW. En esta región, el número de

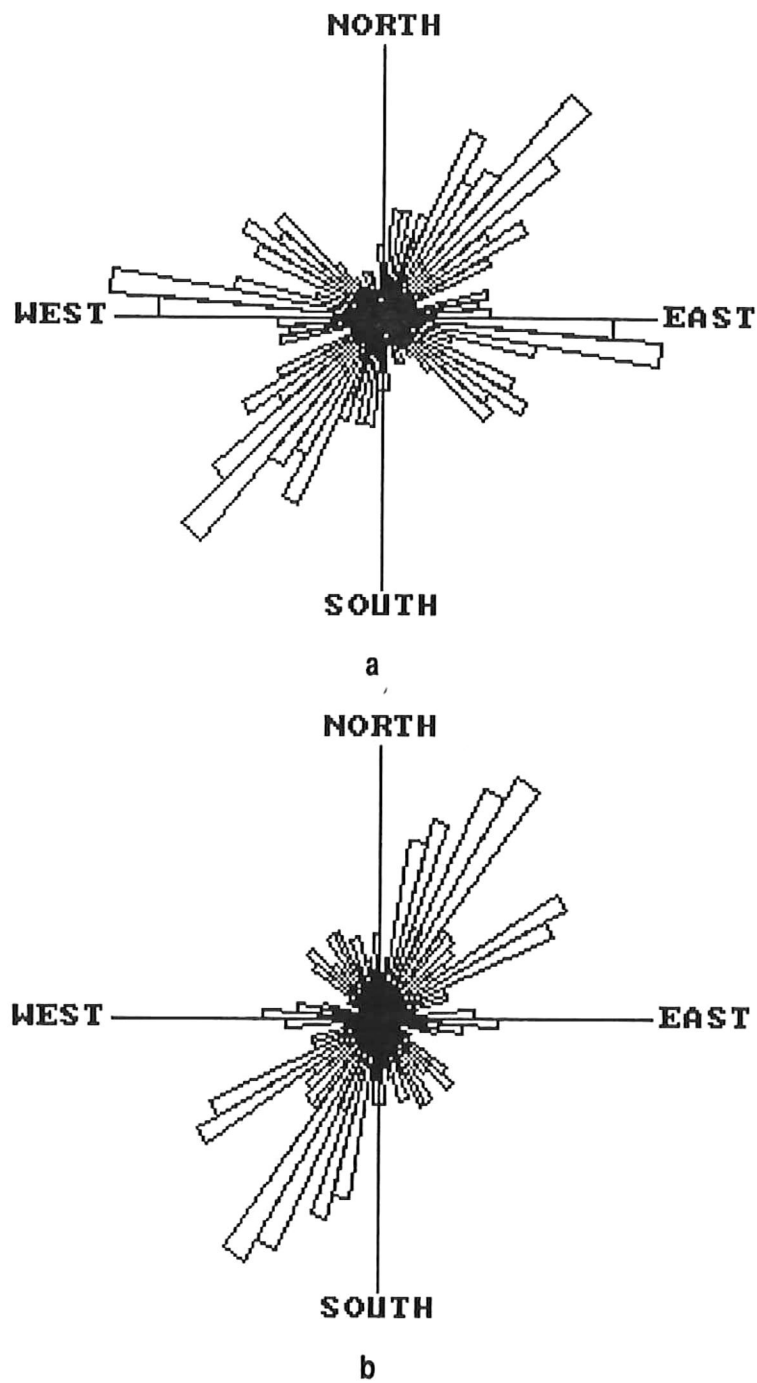


Fig. 8. Rosas de fallamiento construidas con base en el conteo de lineamientos en imagen de satélite, con intervalos de clase de 5°. a) Lineamientos en la Región Central del Bloque Santo Tomás (187). b) Lineamientos en la Región Sur del Bloque Santo Tomás (145).

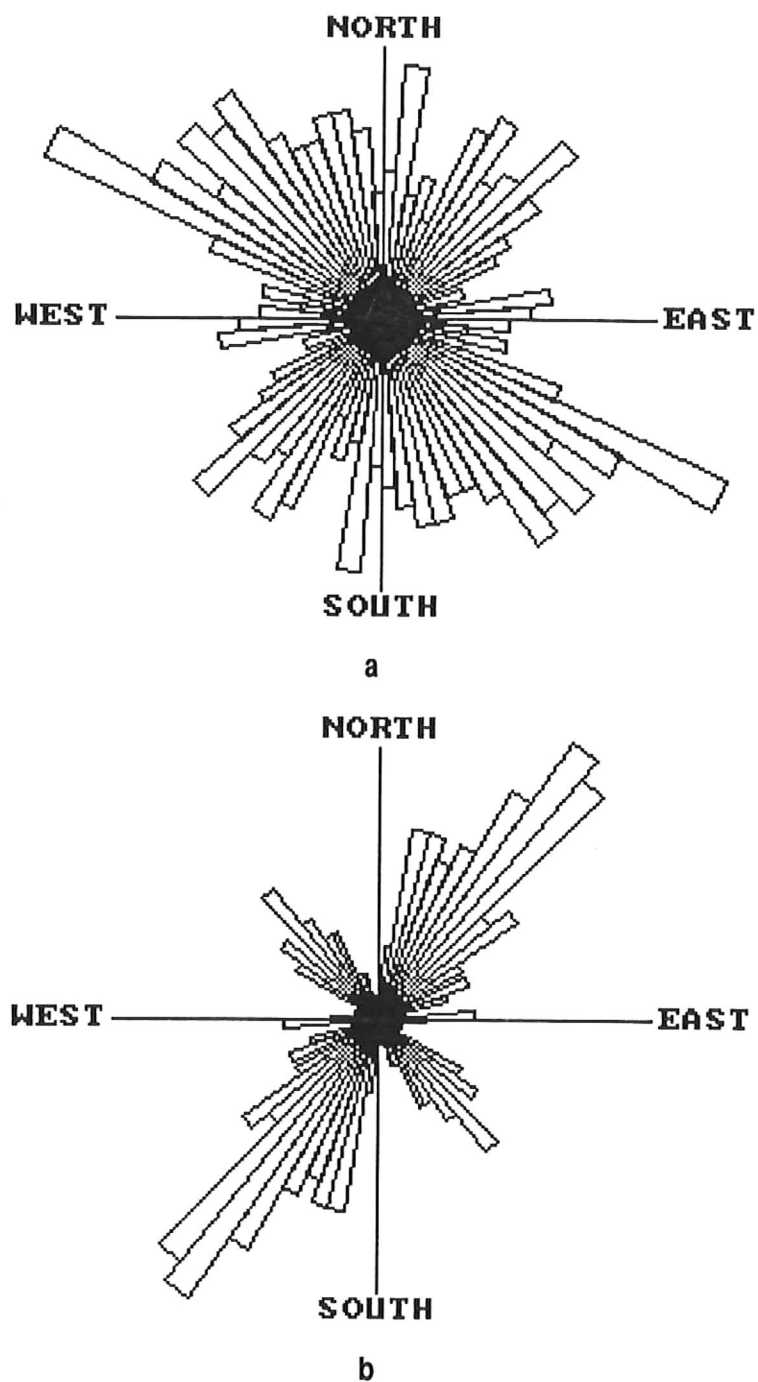


Fig. 9. Rosas de fallamiento construidas con base en las estructuras medidas en campo, con intervalos de clase de 5°. a) Estructuras en la Región Central del Bloque Santo Tomás (190). b) Estructuras en la Región Sur del Bloque Santo Tomás (94).

estructuras de falla con orientación NNW es mayor que el observado en la Región Norte.

Comparando las figuras 8a y 9a, se puede ver que en ambos casos, las tres tendencias principales se encuentran bien definidas. Además, en su mayor parte, tanto los datos de satélite como los datos de campo, corresponden a los mismos rasgos estructurales. Si se analiza detenidamente las figuras, se verá que una corresponde a la imagen especular de la otra. Mientras que la tendencia que más claramente se manifiesta en el diagrama de los lineamientos de satélite, se orienta hacia el NE (entre N25E y N65E); en el diagrama que comprende los datos de campo, el mayor número de estructuras se orienta hacia el NW (entre N35W y N65W). La misma situación se puede observar con el grupo de estructuras cuya orientación promedio es E-W. La mayor diferencia entre los dos diagramas, la constituye el mayor número de datos con orientación NNW, que se observa en la Figura 9a. Aunque sí se observan estructuras con esta orientación (a diferencia de la Región Norte) en el diagrama que corresponde a los lineamientos de satélite (Fig. 8a), sigue siendo manifiesto el número tan reducido de éstas en el conjunto de datos de satélite. Por último, se observa una similitud mayor en las gráficas anteriores (Figs. 8a y 9a), que la correlación que presentaron las figuras de la Región Norte.

En la Figura 8b, se puede ver la orientación del conjunto de lineamientos de satélite (145 datos) en la Región Sur de la zona de estudio (Fig. 4). En esta región, los lineamientos se orientan en cuatro direcciones principales: NNE (entre N10E y N35E), ENE (entre N55E y N65E), NW (entre N25W y N55W) y E-W. En general, se observa el dominio de las estructuras hacia el NE; sin embargo, la tendencia principal la constituyen los rasgos estructurales hacia el NNE. De las tres regiones analizadas, es en esta última, en la que se observa el mayor número de lineamientos con orientación NNW.

En la Figura 9b, se presentan los datos de campo (94 planos de falla) obtenidos en las áreas estructurales X, XI y XII (Fig. 5) ubicadas en la Región Sur (Fig. 4). De acuerdo con el diagrama de rosa de la Figura 9b, el fallamiento en la región se orienta en direcciones NNE (entre N10E y N55E), NW (entre N25W y N60W) y E-W. Es evidente, el dominio de las estructuras de campo con orientación NE, así como el número tan reducido de estructuras con orientación E-W que se observan en campo. Llama la atención, por otra parte, que a diferencia de las dos regiones anteriores, en ésta se presentan muy pocas estructuras con orientación NNW.

La correlación existente entre los lineamientos de satélite y los rasgos estructurales medidos en campo en la Región Sur, es clara. De las cuatro tendencias principales identificadas en la Figura 8b, tres de ellas (E-W, NW y NNE) se vuelven a presentar en la Figura 9b. Las estructuras que no se manifiestan en el conjunto de datos de campo, son los lineamientos con orientación ENE que se observan en la Figura 8b. Es posible que lo anterior se deba a que el número de fallas medidas en campo, es considerablemente menor al número de lineamientos de satélite. Contrario a lo que se observa en las dos regiones anteriores, el número de lineamientos de satélite con orientación NNW, supera a las estructuras de campo en esa misma dirección. Si se considera que el número de estructuras con orientación ENE y NNW (Fig. 8b) no es grande, se tiene que la mayor parte de los lineamientos de satélite, responden al fallamiento medido en campo.

Después de haber discutido en cada una de las regiones, la posible correlación entre los lineamientos interpretados en imagen de satélite y las estructuras de falla medidas en campo, se pueden establecer algunas observaciones adicionales a nivel de área de estudio.

De acuerdo con las figuras 6a (principalmente) y 7a, el número de estructuras hacia el NE, supera al número de estructuras que se orientan hacia el NW; sin embargo, este dominio varía de región en región a través de la zona de estudio. En el análisis regional, se observó que en cada una

de las regiones analizadas, se presentan dos tendencias principales (por ejemplo, en la Región Norte, las estructuras con orientación WNW y ENE), cuya orientación se ve afectada por los rasgos estructurales mayores (Sistema Santo Tomás-Agua Blanca). Como se vio en el análisis previo, en la Región Norte (Figs. 6b y 7b), estas tendencias (WNW-ENE) se orientan paralelamente al Sistema Santo Tomás-Agua Blanca, pero conforme la influencia de este sistema disminuye al alejarnos de la Región Norte, hacia el sur, las tendencias en cuestión se van orientando de forma oblicua con respecto al Sistema Santo Tomás-Agua Blanca, cada vez con un ángulo mayor. Lo anterior provoca una rotación de las tendencias principales, dando lugar a un cambio de orientación de WNW-ENE en la Región Norte, a NNW-NNE en la Región Sur (Figs. 8b y 9b). El sentido de rotación de estas dos tendencias es contrario entre sí, lo cual hace que la relación angular entre ellas, disminuya de norte a sur. El ángulo de rotación en ambos casos, es de aproximadamente  $30^\circ$ .

El análisis por separado de cada una de las regiones permite ver que las estructuras presentan una distribución más definida en la Región Sur (Figs. 8 y 9). Probablemente, esto se debe a la mayor complejidad estructural que se observa en la Región Norte, como consecuencia de la influencia del Sistema Santo Tomás-Agua Blanca. Es factible que en esta región, no solamente se tengan rasgos estructurales que se originaron asociados a las etapas de mayor actividad del Sistema Santo Tomás-Agua Blanca, sino también, que se presenten estructuras cuyo origen se asocie a otros eventos de deformación. En otras palabras, se puede tener una sobreposición de estructuras. Cabe resaltar la mayor similitud entre los diagramas de las regiones Central (principalmente) y Sur. Es posible que ésta se deba a que el número de datos en la Figura 6b, es mucho mayor que los datos graficados en la Figura 7b. Si se observan detenidamente ambas figuras, se pueden identificar las mismas cuatro tendencias, con la diferencia de que en la Figura 7b se manifiestan en menor grado, debido al número tan reducido de datos de campo obtenidos en la zona. De hecho, las figuras que

mayor correlación manifiestan, son aquellas en las que el número de lineamientos de satélite y el número de fallas medidas en campo, es similar (Figs. 8a y 9a). En otras palabras, la Región Central, fue la zona en donde se presentó el mayor traslape entre ambos conjuntos de datos.

Otra observación se refiere al claro predominio de las estructuras con orientación NE en la Región Sur (Figs. 8b y 9b). Previamente, Delgado-Argote *et al.* (1990), tomando en consideración esta observación conjuntamente con el análisis estructural basado en el modelo de Harding (1974), propusieron que el Bloque Santo Tomás se encuentra rotando en sentido contrario al de las manecillas del reloj.

La única diferencia significativa entre los diagramas obtenidos a partir de los lineamientos de satélite y los obtenidos a partir de los datos de campo, la constituye el escaso número de lineamientos con orientación NNW que se presenta en la Figura 6a, contrario a lo que se observa en la Figura 7a. Esta diferencia significa, que en la zona de estudio, hay rasgos estructurales con orientación NNW que no se alcanzan a observar en la imagen de satélite, debido a sus dimensiones (estructuras menores). Aunque no se incluyen diagramas con los datos de orientación de los fotolineamientos (1029 datos) interpretados por INEGI, éstos se generaron, y en ellos se observan las estructuras hacia el NNW que se presentan en la Figura 7a.

Con base en lo discutido región por región y en las observaciones adicionales sobre el area de estudio en su conjunto, se puede afirmar que a pesar de que los dos conjuntos de datos (lineamientos de satélite y estructuras medidas en campo) se traslapan sólo de forma parcial y además, que siendo el número de datos de campo inferior a los datos interpretados en imagen de satélite, se observa una buena correlación entre ambos conjuntos de datos. Esto significa que el análisis estructural de los datos de campo que a continuación se presenta, corresponde al patrón geométrico que se obtuvo a partir de la imagen de satélite.

### VII.3. Análisis Estructural

En el presente estudio, los tres esfuerzos principales se denotan por  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$ , donde  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ . Los esfuerzos principales con una inclinación menor o igual a  $35^\circ$ , se consideran como esfuerzos horizontales (ver, por ejemplo, a McGarr y Gay, 1978). Siguiendo la convención adoptada por la mayoría de los geólogos, los esfuerzos principales se consideran compresivos, dada su naturaleza a niveles corticales (Price, 1966, p. 5).

El análisis dinámico del sistema de fallas observado en el campo en cada uno de los sitios de control (Fig. 5), se muestra en las figuras contenidas en el apéndice estructural. De los 80 sitios de control iniciales en los que se midieron datos estructurales, se analizaron 63, además de las dos zonas de trabajo de detalle (áreas XI y XII). Lo anterior se debe, a que los sitios de control restantes no presentaron sistemas conjugados de fallas (solamente planos únicos), lo cual es un requerimiento para el análisis dinámico a partir del modelo de fallamiento de Coulomb-Anderson.

Los resultados del análisis estructural en los 63 sitios de control, se presentan en las tablas I-V agrupados por áreas, según la división estructural en el Bloque Santo Tomás (Fig. 5). En las mismas se puede apreciar, que del total de soluciones obtenidas (73), el 67% de éstas corresponden a soluciones de desplazamiento lateral, el 26% a soluciones de fallamiento normal y únicamente el 7% (5 fallas) a sistemas de fallamiento inverso. Aunado a lo anterior, se tiene que las soluciones que se obtuvieron en las zonas de detalle (áreas XI y XII, Fig. 5), responden a soluciones de desplazamiento lateral.

A continuación se presentan los resultados del análisis estructural (ver apéndice estructural y tablas I-V) graficados sobre el hemisferio inferior de la red de Schmidt. En las figuras subsecuentes, se puede observar la orientación de los esfuerzos principales ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$ ) resultantes en cada una

de las áreas estructurales mostradas en la Figura 5. La orientación de dichos esfuerzos, corresponde a una media aritmética, obtenida al integrar las soluciones de cada uno de los sitios de control en su respectiva área estructural. En algunas áreas, dada la dispersión de los esfuerzos principales de intermedia y mínima compresión ( $\sigma_2$  y  $\sigma_3$ ), solamente se obtuvo la orientación promedio del esfuerzo principal de máxima compresión. El número de estructuras analizadas por área, se muestra en cada una de las figuras.

### **AREA I (Cañón y Valle Santo Tomás)**

En la Figura 10 se presentan los resultados del análisis de esfuerzos para la zona del Cañón y Valle Santo Tomás (Fig. 5). En esta zona, se analizaron los datos estructurales de cuatro sitios de control, a partir de los cuales se generaron cinco soluciones probables. De las soluciones obtenidas, tres de éstas responden a fallamiento lateral y dos a fallamiento normal (Tabla I). En la Figura 10, se observan tres conjuntos de datos, cada uno de éstos definido por uno de los tres esfuerzos principales. A partir de esta distribución, se tiene que el esfuerzo principal resultante de máxima compresión ( $\sigma_1$ ) presenta una orientación promedio hacia el WNW (N66W) y una inclinación de 34° correspondiéndole, dada la relación de ortogonalidad entre los esfuerzos principales, y debido a que el sistema está dominado por deformación extensional, una orientación promedio hacia el NNE (N21E) y una inclinación de 22° al esfuerzo principal de mínima compresión ( $\sigma_3$ ).

El tensor de esfuerzos para el Area I, se puede representar de la siguiente manera:

$$\sigma_1 \approx \sigma_2 \gg \sigma_3$$

$$0$$

$$\sigma_{WNW-ESE} \approx \sigma_v \gg \sigma_{NNE-SSW}$$

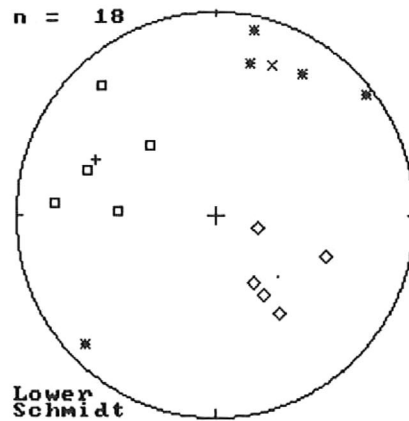


Fig. 10. Orientación de los esfuerzos principales de máxima (cuadros), intermedia (diamantes) y mínima (asteriscos) compresión de cuatro sitios de control en el Area I (ver la tabla respectiva y el apéndice estructural). La orientación promedio resultante de cada uno de los esfuerzos principales, se representa por la cruz ( $\sigma_1=34/N66W$ ), el punto ( $\sigma_2=54/S46E$ ) y la equis ( $\sigma_3=22/N21E$ ), respectivamente. El número de fallas analizadas en el Area I, es de 19.

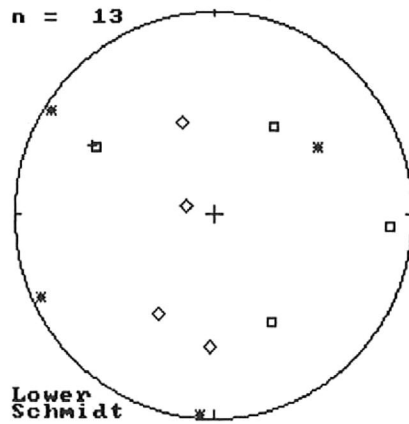


Fig. 11. Orientación de los esfuerzos principales de máxima, intermedia y mínima compresión de cuatro sitios de control en el Area II (ver la tabla respectiva y el apéndice estructural). La simbología usada es la misma que en la Figura 10. Dada la dispersión del conjunto de datos, únicamente se obtuvo la orientación promedio resultante del vector de máxima compresión ( $\sigma_1= 30/N61W$ ). Este valor, se obtuvo considerando solamente los esfuerzos principales horizontales de máxima compresión. El número de fallas analizadas en el Area II, es de 9.

TABLA I. RESULTADOS DEL ANALISIS DE ESFUERZOS EN LAS AREAS I Y II

ESFUERZOS PRINCIPALES				
AREA I	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	FALLAMIENTO
SITIO 56	49/N88W	41/S70E	08/N12E	N
SITIO 57	50/N44W	41/S34E	04/N52E	N
SITIO 64	15/N42W	72/S74E	09/S46W	L
SITIO 65	32/N71W 20/N86W	52/S32E 58/S30E	19/N32E 24/N13E	L L
AREA II	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	FALLAMIENTO
SITIO 58	46/N35E	43/S30W	04/N58W	N
SITIO 59	12/S86E	78/N76W	02/S04W	L
SITIO 60	32/N61W	36/S02W	38/N58E	I
SITIO 61	40/S29E	50/N19W	05/S65W	L

El tensor anterior, soluciona favorablemente las estructuras normales presentes en cada uno de los sitios de control del Area I (ver apéndice estructural). Estas estructuras se orientan casi de forma paralela al  $\sigma_1$  resultante; esto es, con una orientación entre N50W y N70W. Asimismo, el tensor resuelve las estructuras laterales en los sitios 57 y 64 hacia el NNW (N15-16W) y ENE; y el fallamiento inverso en el Sitio 64 orientado hacia N76E/37S.

Una de las estructuras que llama la atención por su buena correlación con la configuración del tensor de esfuerzos obtenido y con las estructuras esperadas a partir de éste, es la Falla de Santo Tomás. Este rasgo estructural corresponde a una falla mayor de desplazamiento lateral derecho, según la solución que se deriva a partir del mismo tensor. Cabe mencionar, que la interpretación anterior sobre el sentido de desplazamiento de la Falla de Santo Tomás, coincide con las observaciones hechas por Allen y colaboradores (1960), pero entra en contradicción con la interpretación que Krause (1965) hace sobre la misma estructura en borde continental. Según Gastil *et al.* (1975), el trabajo realizado por Acosta (1970) en la zona de Bahía Soledad-Punta China, no aporta evidencias que apoyen o contradigan las observaciones que Allen *et al.* (1960) hacen sobre la Falla de Santo Tomás en continente.

Desde el punto de vista dinámico, la mezcla de estilos de fallamiento contemporáneo en la zona, se puede explicar con base en las magnitudes relativas de los esfuerzos principales, en este caso  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$ . Si las magnitudes de  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  son aproximadas entre sí, aunado a variaciones locales (menores) en el campo de esfuerzos regional, entonces se da una permutación en el tensor de esfuerzos. Esto es, debido a que  $\sigma_1 \approx \sigma_2$  y como resultado de las variaciones locales en el campo de esfuerzos,  $\sigma_1$  pasa a la vertical y  $\sigma_2$  a la horizontal (una información más detallada sobre el intercambio de los esfuerzos principales en el tensor de esfuerzos, se puede encontrar en: Zoback y Zoback, 1980; Zoback *et al.*, 1981; Nakamura y Uyeda, 1980; entre otros).

## AREA II

En la Figura 11 se presentan los resultados del análisis de esfuerzos para el Area II (Fig. 5). Estos resultados muestran que de los cuatro sitios de control analizados, dos responden a fallamiento lateral, uno a fallamiento normal y otro a fallamiento inverso (Tabla I). A diferencia de la buena definición que presentaron los datos de la Figura 10, en esta figura se observa una gran dispersión en la orientación de cada uno de los esfuerzos principales. Es probable que la dispersión observada se deba (1) al número tan reducido de estructuras analizadas en el área, o (2) a una mayor complejidad estructural, lo cual parece menos probable. No obstante lo anterior, se tiene que el esfuerzo principal resultante de máxima compresión ( $\sigma_1$ ) presenta una orientación promedio hacia N66W y una inclinación de  $30^\circ$  (esta orientación promedio no considera al  $\sigma_1$  que define el fallamiento normal en el Sitio 58). En esta ocasión, no se obtuvo la orientación promedio de los esfuerzos resultantes de intermedia y mínima compresión. Sin embargo, debido al dominio del fallamiento de desplazamiento lateral en la zona, se infiere que el  $\sigma_2$  resultante se encuentra sobre la vertical; por lo que el esfuerzo principal resultante de mínima compresión ( $\sigma_3$ ) se encuentra hacia el NNE, cerca de la horizontal. La relación de ortogonalidad entre el  $\sigma_1$  resultante y el  $\sigma_3$  inferido, es evidente en la Figura 11, a pesar de la dispersión de los datos.

El tensor de esfuerzos en el Area II, se puede representar de la siguiente manera:

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$$

$$0$$

$$\sigma_{WNW-ESE} > \sigma_v > \sigma_{NNE-SSW}$$

De acuerdo a la configuración del tensor de esfuerzos en la zona, se tiene que las estructuras esperadas, en el caso del fallamiento lateral, deben orientarse hacia el NNW (en el caso de las

estructuras izquierdas) y hacia el WSW (en el caso de las estructuras derechas), lo cual corresponde con la orientación (N07W) que presenta la estructura de desplazamiento lateral izquierda en el Sitio 61. El fallamiento normal con orientación WNW en el Sitio 58 (ver apéndice estructural), es congruente con la orientación promedio del  $\sigma_1$  resultante; sin embargo, las estructuras normales hacia el **NE** (en el mismo sitio), quedan sin solución. En la Figura 11, se observa un  $\sigma_1$  vertical en el cuadrante NE (Sitio 58, Tabla I); este  $\sigma_1$  vertical representa a todas las estructuras normales con orientación WNW en los sitios analizados.

Las variaciones locales en las magnitudes relativas de los esfuerzos principales, justifican el fallamiento normal e inverso que se analizó en los sitios 58 y 60.

### **AREA III**

En la Figura 12 se presentan los resultados del análisis de esfuerzos para el Area III (Fig. 5). En esta área, se analizaron los datos estructurales de seis sitios de control, a partir de los cuales se obtuvieron nueve soluciones probables. Los resultados muestran que de las soluciones obtenidas, seis responden a fallamiento de desplazamiento lateral y tres a fallamiento inverso (Tabla II). En esta figura, se observa que los esfuerzos principales de máxima compresión ( $\sigma_1$ ) se orientan en dos direcciones preferenciales, definiendo dos conjuntos de vectores horizontales, orientados casi perpendicularmente entre sí. Esta situación no se había presentado en las dos áreas anteriores, donde sólo se obtuvo la orientación promedio de un vector de máxima compresión resultante para cada zona.

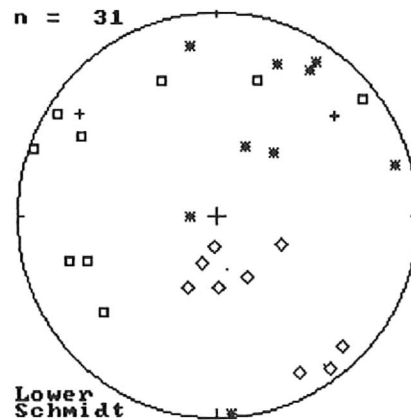


Fig. 12. Orientación de los esfuerzos principales de máxima, intermedia y mínima compresión de seis sitios de control en el Area III (ver la tabla respectiva y el apéndice estructural). La simbología usada es la misma que en la Figura 10. Las orientaciones promedio resultantes que se obtuvieron, dada la distribución de los esfuerzos principales, corresponden a los esfuerzos principales de máxima ( $\sigma_1=16/N54W$  y  $\sigma_1=24/N50E$ ) e intermedia ( $\sigma_2=68/S10E$  y  $\sigma_2=10/S36E$ ) compresión (lo referente a los dos valores promedio para el mismo esfuerzo principal, se discute en el texto). El número de fallas analizadas en el Area III, es de 34.

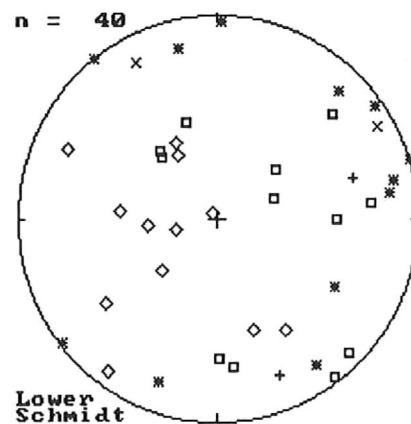


Fig. 13. Orientación de los esfuerzos principales de máxima, intermedia y mínima compresión de once sitios de control en el Area IV (ver la tabla respectiva y el apéndice estructural). La simbología usada es la misma que en la Figura 10. Las orientaciones promedio resultantes que se obtuvieron, dada la distribución de los esfuerzos principales, corresponden a los esfuerzos principales de máxima ( $\sigma_1=18/S22E$  y  $\sigma_1=30/N73E$ ) y mínima ( $\sigma_3=09/N60E$  y  $\sigma_3=14/N28W$ ) compresión (para lo referente a los dos valores promedio para el mismo esfuerzo principal, ver el texto). El número de fallas analizadas en el Area IV, es de 50.

TABLA II. RESULTADOS DEL ANALISIS DE ESFUERZOS EN LAS AREAS III Y IV

ESFUERZOS PRINCIPALES				
AREA III	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	FALLAMIENTO
SITIO 3	03/N70W	70/S16W	20/N22E	L
SITIO 4	06/N58W 23/N60W	78/S02W 62/S26E	10/N33E 16/N33E	L L
SITIO 5	24/S73W 31/N17E	61/S67E 59/S22W	16/N09W 02/S04E	L L
SITIO 7	08/N52E	06/S37E	79/N90W	I
SITIO 8	32/S71W 27/S50W	13/S28E 11/S44E	55/N42E 60/N22E	I I
SITIO 9	29/N22W	61/S02E	08/N74E	L
AREA IV	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	FALLAMIENTO
SITIO 30	32/S00E 56/N42W	55/N29W 08/S36W	14/N81E 33/S60E	L N
SITIO 31	40/S90E	50/N85W	03/N-S	L
SITIO 32	24/N84E	60/S47W	15/N13W	L
SITIO 39	49/N18W	42/S18E	00/N73E	N
SITIO 41	08/S45E	73/S75W	14/N44E	L
SITIO 42	65/N70E	19/N65W	16/S20W	N
SITIO 45	59/N51E	31/S53W	00/N38W	N
SITIO 46	28/S06E	60/N32W	11/N78E	L
SITIO 47	24/N48E	62/S85W	14/S35E	L
SITIO 48	03/S37E	87/N28W	01/S52W	L
SITIO 49	54/N40W	36/S32E	04/N55E	N

La presencia de dos conjuntos de  $\sigma_1$  horizontales en el Area III, permite inferir que los sistemas conjugados de fallas analizados, son el resultado de dos regímenes regionales de esfuerzos, diferentes tanto en tiempo como con relación al arreglo y magnitud que los esfuerzos principales guardan en el tensor.

La relación en tiempo entre los regímenes de esfuerzos que dieron lugar a la deformación observada en la zona no se conoce, por lo que nos referiremos a éstos de forma arbitraria, como el primero y el segundo régimen.

En el primer régimen, se tiene que el  $\sigma_1$  resultante presenta una inclinación de  $16^\circ$  y una orientación promedio de N54W; en tanto que, el  $\sigma_3$  resultante (aunque no se obtuvo) debe de orientarse hacia el NE, ya que el  $\sigma_2$  resultante que se asocia a los esfuerzos principales anteriores, se encuentra sobre la vertical ( $\sigma_2 = 68/S10E$ ) (ver Tabla II, sitios 3,4 y 5).

El régimen de esfuerzos al que se ha hecho mención, se puede representar como sigue:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &> \sigma_2 > \sigma_3 \\ &0 \\ \sigma_{NW} &> \sigma_v > \sigma_{NE} \end{aligned}$$

De acuerdo con el tensor anterior, las estructuras de rompimiento lateral esperadas deben orientarse hacia el NNW y WNW-EW, las estructuras normales presentar una orientación paralela al  $\sigma_1$  resultante y las estructuras inversas orientarse hacia el NE. Estas inferencias se cumplen para cada uno de los tipos de estructuras en los sitios 3, 4 y 9 (ver apéndice estructural).

En el segundo régimen de esfuerzos, el  $\sigma_1$  resultante se mantiene sobre la horizontal, presentando una orientación promedio de N50E y una inclinación de  $24^\circ$ . En la Figura 12, se observa

que además de la rotación del tensor de esfuerzos necesaria para fundamentar los dos regímenes propuestos; en este segundo estado de esfuerzos, se da una permutación o intercambio entre los esfuerzos principales de intermedia y mínima compresión en el tensor de esfuerzos con respecto a un eje horizontal: el  $\sigma_2$  resultante que se asocia al fallamiento lateral en el segundo régimen de esfuerzos ( $\sigma_2 = 68/S10E$ ), pasa a la horizontal ( $\sigma_2 = 10/S36E$ ; Fig. 12, cuadrante SE) y el  $\sigma_3$  a la vertical, lo cual explica el fallamiento inverso en el área (Tabla II, sitios 7 y 8).

La mezcla de estilos de fallamiento de desplazamiento lateral e inverso, asociada a la permutación de los esfuerzos principales de intermedia y mínima compresión en el tensor de esfuerzos, se debe a las causas ya explicadas en el Area I (ver párrafo... " Desde el punto de vista dinámico..."). De acuerdo con lo anterior, el tensor de esfuerzos para el segundo régimen, se puede representar de la siguiente manera:

$$\sigma_1 \gg \sigma_2 \approx \sigma_3$$

$$0$$

$$\sigma_{NE} \gg \sigma_{SE} \approx \sigma_v$$

Los sistemas de fallas laterales, normales e inversas en los sitios de control 3 (estructura al NE), 5, 7 y 8, se resuelven con la orientación promedio del esfuerzo principal resultante de máxima compresión obtenido en el segundo tensor.

Como se puede apreciar, esta nueva orientación del  $\sigma_1$  resultante se puede explicar en términos de una rotación de aproximadamente  $100^\circ$  del tensor de esfuerzos con respecto a un eje vertical, de tal forma que cada uno de los esfuerzos principales mantienen su posición en el tensor. El sentido de rotación del campo de esfuerzos no se puede determinar, ya que se carece de control cronológico de los eventos de deformación.

#### AREA IV

El análisis de esfuerzos en el Area IV comprende 11 sitios de control, a partir de los cuales se obtuvieron doce soluciones. De éstas, siete responden a fallamiento lateral y cinco a fallamiento normal (Tabla II). En la Figura 13, se observa que los esfuerzos principales de máxima compresión ( $\sigma_1$ ) se orientan hacia el NNW y ENE, definiendo dos familias de vectores cerca de la horizontal. Cada una de estas familias presenta  $\sigma_1$  verticales que representan al fallamiento normal analizado en el área (Tabla II), que se asocia al sistema de desplazamiento lateral dominante. La relación angular de los esfuerzos principales de intermedia y mínima compresión, con respecto a cada una de las familias de  $\sigma_1$  identificadas, es de  $90^\circ$  aproximadamente. Considerando la distribución anterior, se obtienen dos tensores de esfuerzos: uno, en el que el esfuerzo principal resultante de máxima compresión ( $\sigma_1$ ) presenta una orientación promedio de N22W y una inclinación de  $18^\circ$ , y otro, en el que el esfuerzo principal resultante de máxima compresión ( $\sigma_1$ ), se orienta hacia el ENE (N74E), manteniéndose sobre la horizontal.

Los resultados anteriores, permiten interpretar el fallamiento analizado en esta área, como sistemas conjugados producto de dos estados de esfuerzos diferentes, de manera similar que en el Area III. Para lo anterior, se requiere de una rotación del tensor de esfuerzos de aproximadamente  $90^\circ$ .

En ambos regímenes de esfuerzos, el esfuerzo principal de mínima compresión resultante ( $\sigma_3 = 09/N60E$  y  $\sigma_3 = 14/N28W$ ) se mantiene invariante sobre la horizontal, siendo las magnitudes relativas de  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  aproximadamente iguales, lo que permite que con variaciones locales en el campo de esfuerzos, haya un intercambio de posiciones en el tensor entre  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$ , resultando en un estilo combinado de fallamiento. Esto explica el fallamiento lateral y normal analizado en la zona (Tabla II).

## AREA V

En la Figura 14 se presentan los resultados del análisis de esfuerzos para el Area V (Fig. 5). En esta área, se analizaron los datos estructurales de siete sitios de control. De las soluciones obtenidas, cuatro responden a fallamiento lateral y cinco a fallamiento normal (Tabla III). Los resultados de la Figura 14, muestran que algunos de los esfuerzos principales de máxima compresión que se obtuvieron, presentan inclinaciones mayores a los  $50^\circ$  (ver Tabla III; sitios 10, 14, 15 y 17), lo que los asocia a fallamiento normal. Por otro lado, los  $\sigma_1$  que se encuentran sobre la horizontal, se orientan en dos direcciones preferenciales, constituyendo dos conjuntos de  $\sigma_1$  horizontales; a partir de los cuales, se obtienen dos esfuerzos principales resultantes de máxima compresión ( $\sigma_1$ ): uno, con una inclinación de  $33^\circ$  y una orientación promedio de N67W; y el otro, con una inclinación de  $21^\circ$  y una orientación promedio N-S. La relación angular que guardan los esfuerzos principales  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$  con respecto al primero de los  $\sigma_1$  resultantes ( $\sigma_1 = 33^\circ/\text{N67W}$ ) es de aproximadamente  $90^\circ$ . Esta misma relación se observa, aunque es menos evidente, en el tensor de esfuerzos que representa el  $\sigma_1$  resultante con orientación N-S, principalmente en lo que se refiere a la orientación que presentan los esfuerzos principales de mínima compresión.

El cambio de orientación del  $\sigma_1$  resultante se interpreta de manera similar que en áreas anteriores (áreas III y IV). En esta ocasión, las estructuras de deformación analizadas, se originaron bajo dos regímenes de esfuerzos en los que la orientación del  $\sigma_1$  difiere en aproximadamente  $60^\circ$ . Este cambio de orientación implica la rotación del tensor de esfuerzos con respecto a un eje vertical, donde la posición del  $\sigma_3$  se mantiene invariante sobre la horizontal. Además, en cada uno de los regímenes de esfuerzos se da un intercambio de posición con respecto a un eje horizontal de los esfuerzos principales  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  en el tensor, lo que explica la combinación de fallamiento normal y fallamiento de desplazamiento lateral en la zona, según se manifiesta a través de los  $\sigma_1$  horizontales

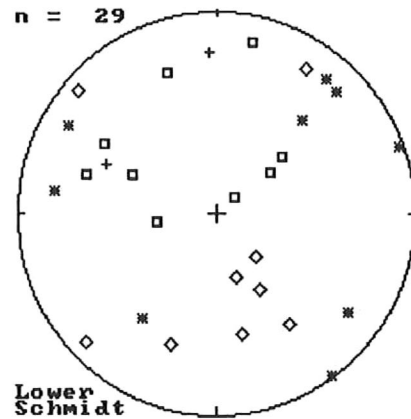


Fig. 14. Orientación de los esfuerzos principales de máxima, intermedia y mínima compresión de siete sitios de control en el Area V (ver la tabla respectiva y el apéndice estructural). La simbología usada es la misma que en la Figura 10. Las orientaciones promedio resultantes que se obtuvieron, corresponden al esfuerzo principal de máxima compresión:  $\sigma_1=33/N67W$  y  $\sigma_2=21/N03W$ . El número de fallas analizadas en el Area V, es de 26.

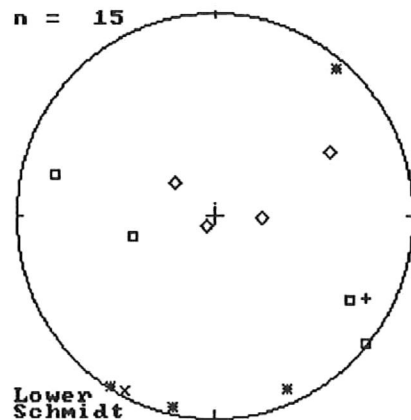


Fig. 15. Orientación de los esfuerzos principales de máxima, intermedia y mínima compresión de tres sitios de control en el Area VI (ver la tabla respectiva y el apéndice estructural). La simbología usada es la misma que en la Figura 10. La orientación promedio resultante de cada uno de los esfuerzos principales, es:  $\sigma_1=14/S62E$ ,  $\sigma_2=87/N02E$  y  $\sigma_3=03/S28W$ . El número de fallas analizadas en el Area VI, es de 20.

TABLA III. RESULTADOS DEL ANALISIS DE ESFUERZOS EN LAS AREAS V Y VI

ESFUERZOS PRINCIPALES				
AREA V	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	FALLAMIENTO
SITIO 10	80/N50E 65/S82W	09/S46W 16/N32E	01/S36E 19/S54E	N N
SITIO 12	27/N20W	63/S17E	02/N70E	L
SITIO 13	34/N59W 14/N12E	54/S30E 66/S43E	14/N40E 18/N82W	L L
SITIO 14	62/N53E	08/N49W	37/S36W	N
SITIO 15	54/N49E	32/S20W	15/N60W	N
SITIO 16	32/N74W	39/S12E	36/N43E	L
SITIO 17	52/N66W	34/S34E	16/N45E	N
AREA VI	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	FALLAMIENTO
SITIO 18	01/S51E 21/S59E	85/S39W 69/N52W	05/N40E 01/S32W	L L
SITIO 19	55/S76W	34/N62E	01/S24E	N
SITIO 21	18/N76W	70/S87E	04/S13W	L

y verticales que se observan en la Figura 14. Las causas y condiciones que favorecen esta permutación de esfuerzos, ya han sido discutidas en las primeras áreas analizadas. Al igual que en éstas, no se sabe cual de los dos estados de esfuerzo prevaleció primero.

De acuerdo con la teoría de Coulomb-Anderson, se debe de esperar una serie de estructuras de falla con cierta relación angular con respecto a la orientación de los esfuerzos principales en el tensor de esfuerzos. Tomando en cuenta lo anterior, a continuación se corroboran las estructuras esperadas con las observadas para cada uno de los regímenes de esfuerzos identificados en la zona.

El tensor de esfuerzos que considera la orientación promedio del  $\sigma_1$  resultante hacia N66W, se puede representar de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &\approx \sigma_2 \gg \sigma_3 \\ &0 \\ \sigma_{WNW} &\approx \sigma_v \gg \sigma_{NNE} \end{aligned}$$

Este sistema de esfuerzos, resuelve el fallamiento inverso (?) orientado hacia N55E/42E, en el Sitio 10; las estructuras normales que se orientan de forma casi paralela a la orientación promedio del  $\sigma_1$  resultante, en los sitios 16 (entre N35W y N63W) y 17 (entre N37W y N52W) (ver apéndice estructural).

La configuración del tensor de esfuerzos cuyo  $\sigma_1$  resultante se encuentra orientado aproximadamente N-S (N03W), se define como sigue:

$$\sigma_1 \approx \sigma_2 \gg \sigma_3$$

$$0$$

$$\sigma_{N-S} \approx \sigma_v \gg \sigma_{E-W}$$

Este segundo sistema de esfuerzos, soluciona el fallamiento normal con orientación N-S y N16E en los sitios de control 12 y 15, respectivamente (ver apéndice estructural).

En los sitios 13 y 14, los rasgos estructurales se resuelven con base en la combinación de los  $\sigma_1$  resultantes; esto es, en los sitios mencionados, se encontraron estructuras producto de uno y de otro régimen de esfuerzos.

En el Sitio 13, el fallamiento lateral orientado hacia N85E/55S/165 y N12W/77E/013; el fallamiento normal en N45W y N55W; y la solución parcial del fallamiento normal hacia N48W en el Sitio 14, los resuelve el  $\sigma_1$  resultante cuya orientación promedio es N66W. Por otro lado, la estructura lateral con orientación N27E, la estructura inversa con orientación N65W/26N/067 y el fallamiento normal en N05E, los soluciona el  $\sigma_1$  resultante con orientación promedio N-S.

## AREA VI

En la Figura 15 se presentan los resultados del análisis de esfuerzos en el Area VI (Fig. 5). En esta área, se analizaron los datos estructurales de tres sitios de control, a partir de los cuales se obtuvieron cuatro soluciones. De éstas, tres responden a fallamiento lateral y una a fallamiento normal (Tabla III). En la Figura 15, se puede ver que los esfuerzos principales  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  se encuentran cerca de la horizontal, con excepción del  $\sigma_1$  que se obtuvo en el Sitio 19, y que se encuentra asociado a fallamiento normal (Tabla III), orientándose preferencialmente hacia el WNW-ESE y NNE-SSW, respectivamente. Es evidente también, que los esfuerzos principales de compresión intermedia ( $\sigma_2$ ) se encuentran en la vertical, con excepción del  $\sigma_2$  ( $\sigma_2 = 34/N62E$ ) que se asocia a

las estructuras normales analizadas en el Sitio 19.

Considerando la distribución de los esfuerzos principales en la Figura 15, se obtiene un tensor de esfuerzos en el que la orientación promedio del  $\sigma_1$  resultante es N62W, y su inclinación  $14^\circ$ . La relación angular que guardan los esfuerzos principales resultantes de intermedia ( $\sigma_2 = 87/N02E$ ) y mínima ( $\sigma_3 = 03/N28W$ ) compresión, con respecto al  $\sigma_1$  resultante, es de  $90^\circ$ .

El régimen de esfuerzos que generó las estructuras de deformación en el Area VI, se puede representar de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &\approx \sigma_2 \gg \sigma_3 \\ &0 \\ \sigma_{N60W} &\approx \sigma_v \gg \sigma_{N30E} \end{aligned}$$

De acuerdo con el tensor anterior, el fallamiento normal observado en el Area VI (Tabla III, Sitio 19) se explica con base en la permutación de los esfuerzos principales  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$ . Esto justifica al  $\sigma_1$  vertical y al  $\sigma_2$  horizontal de Figura 15.

Como se puede observar, en esta área únicamente se obtuvo un esfuerzo principal resultante de máxima compresión ( $\sigma_1$ ), lo cual significa que todas las estructuras de falla analizadas responden al mismo sistema de esfuerzos.

La orientación promedio del  $\sigma_1$  resultante, resuelve el fallamiento normal hacia el NW y las estructuras inversas en N45E/21N y N60W/38N, en el Sitio 18; el fallamiento lateral con orientación E-W, las estructuras normales hacia el WNW y de forma parcial el fallamiento inverso con orientación N18W/35N, en el Sitio 19; y por ultimo, las estructuras normales paralelas al  $\sigma_1$  resultante y las estructuras de rumbo con orientación NW y E-W, en el sitio 21 (ver apéndice estructural).

## AREA VII

Los resultados del análisis de esfuerzos en el Area VII (Fig. 5), muestran que a partir de los seis sitios de control analizados, se obtuvieron seis soluciones probables. De estas soluciones, cinco responden a fallamiento de desplazamiento lateral y una a fallamiento normal (Fig. 16, Tabla IV). En la Figura 16, se observa que tanto los esfuerzos principales de máxima ( $\sigma_1$ ) como de mínima compresión ( $\sigma_3$ ), se orientan en dos direcciones preferenciales: hacia el NW-SE y hacia el NE-SW. Por otro lado, se puede ver que los esfuerzos principales de compresión intermedia ( $\sigma_2$ ) se ubican cerca de la vertical, con excepción del  $\sigma_2$  que se asocia al fallamiento normal analizado en el Sitio 54 (Tabla IV). De lo anterior se desprende, que solamente uno de los  $\sigma_1$  obtenidos no se encuentra sobre la horizontal (Sitio 54).

Considerando la distribución de los esfuerzos principales en la Figura 16, se obtienen dos tensores de esfuerzos en el Area VII. En el primero, el  $\sigma_1$  resultante presenta una orientación promedio de N46W y una inclinación de 31°. En el segundo, la orientación promedio del  $\sigma_1$  resultante es N54E y su inclinación 24°. La relación angular de los esfuerzos principales  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$ , con respecto al  $\sigma_1$  resultante en cada uno de los tensores, es de aproximadamente 90°.

El cambio de orientación del  $\sigma_1$  resultante tiene la misma interpretación que en áreas anteriores. Las estructuras de deformación analizadas en esta zona, son el resultado de dos sistemas de esfuerzos en los que la orientación del  $\sigma_1$  difiere aproximadamente 100°. Esta diferencia en la orientación del  $\sigma_1$  resultante, requiere de la rotación del tensor de esfuerzos inicial con respecto a un eje vertical, en aproximadamente 100°. Además de la rotación referida, en cada uno de los regímenes de esfuerzos se observa la permutación de los esfuerzos principales  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  en el tensor de esfuerzos, lo cual explica la presencia del fallamiento normal en la zona (Sitio 54). Como ya se dijo, el sentido de rotación del campo de esfuerzos no se puede determinar.

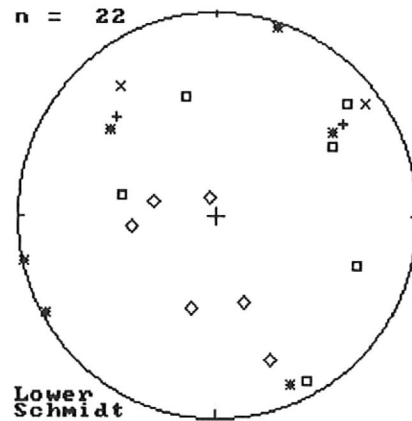


Fig. 16. Orientación de los esfuerzos principales de máxima, intermedia y mínima compresión de seis sitios de control en el Area VII (ver la tabla respectiva y el apéndice estructural). La simbología usada es la misma que en la Figura 10. Las orientaciones promedio resultantes de cada uno de los esfuerzos principales, son:  $\sigma_1=31/N46W$  y  $\sigma_1=24/N54E$ ;  $\sigma_2=71/S45W$ ;  $\sigma_3=09/N53E$  y  $\sigma_3=21/N37W$ . El número de fallas analizadas en el Area VII, es de 27.

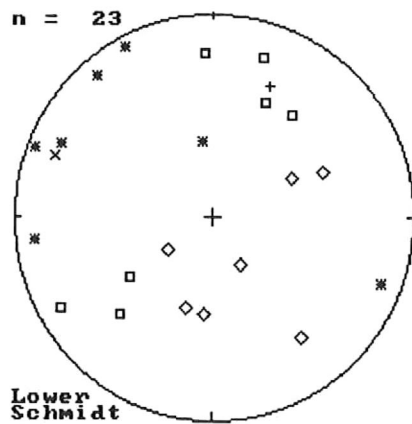


Fig. 17. Orientación de los esfuerzos principales de máxima, intermedia y mínima compresión de siete sitios de control en el Area VIII (ver la tabla respectiva y el apéndice estructural). La simbología usada es la misma que en la Figura 10. La orientación promedio resultante de los esfuerzos principales de máxima y mínima compresión, es:  $\sigma_1=30/N24E$  y  $\sigma_3=16/N69W$ , respectivamente. El número de fallas analizadas en el Area VIII, es de 31.

TABLA IV. RESULTADOS DEL ANALISIS DE ESFUERZOS EN LAS AREAS VII Y VIII

ESFUERZOS PRINCIPALES				
AREA VII	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	FALLAMIENTO
SITIO 50	16/N49E	53/S18E	32/N52W	L
SITIO 51	33/N59E	55/S83W	10/S24E	L
SITIO 52	39/N14W	51/S15W	01/S77W	L
SITIO 53	27/S71E	64/N78W	02/N18E	L
SITIO 54	50/N78W	25/S21E	30/N54E	N
SITIO 55	08/S29E	82/N19W	02/S61W	L
AREA VIII	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	FALLAMIENTO
SITIO 67	34/S44W	54/N64E	10/N40W	L
SITIO 68	20/N03W	68/S32E	10/S83W	L
SITIO 69	48/S55W	41/N68E	06/N28W	N
SITIO 70	38/N25E	52/S17W	04/N69W	L
SITIO 71	12/S60W	27/S37E	59/N08W	I
SITIO 72	36/N38E	51/S05W	16/N65W	L
SITIO 73	18/N18E	68/S54W	11/S69E	L

Tomando como referencia al  $\sigma_1$  resultante con orientación promedio de N46W, se tiene que el tensor de esfuerzos para este régimen, se representa de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &\approx \sigma_2 \gg \sigma_3 \\ 0 \\ \sigma_{NW-SE} &\approx \sigma_v \gg \sigma_{NE-SW} \end{aligned}$$

Este tensor de esfuerzos resuelve el fallamiento normal con orientación NW en el Sitio 51; las estructuras inversas con orientación NE (N50E y N80E) y WNW (N70W) en el Sitio 52; el fallamiento normal al NW en el Sitio 54; y las estructuras laterales con orientación NNW en el Sitio 55 (ver apéndice estructural).

Una observación importante, es que la orientación del  $\sigma_1$  resultante en este tensor, soluciona las estructuras mayores de fallamiento normal interpretadas por DETENAL (ver mapa topográfico, escala 1:50,000).

El otro régimen de esfuerzos, cuyo  $\sigma_1$  resultante se orienta hacia N54E, puede representarse de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &\approx \sigma_2 \gg \sigma_3 \\ 0 \\ \sigma_{NE-SW} &\approx \sigma_v \gg \sigma_{NNW-SSE} \end{aligned}$$

Este tensor soluciona de manera favorable el fallamiento normal en el Sitio 50, y de manera parcial, las estructuras de desplazamiento lateral en el Sitio 53 (ver apéndice estructural).

Como se puede ver, la mayoría de los rasgos estructurales en el Area VII, los resuelve el  $\sigma_1$  resultante con orientación promedio de N46W.

### AREA VIII

En la Figura 17 se presentan los resultados del análisis de esfuerzos del Area VIII (Fig. 5). En esta área, se analizaron los datos estructurales de siete sitios de control. De éstos, cinco responden a fallamiento lateral, uno a fallamiento normal y otro a fallamiento inverso (Tabla IV). En la Figura 17, se observa que los esfuerzos principales de máxima compresión se orientan hacia el NNE-SSW, manteniéndose cerca de la horizontal. Únicamente uno de los  $\sigma_1$  obtenidos, no cumple con la inclinación anterior, ya que se encuentra en la vertical, asociado al fallamiento normal analizado en el Sitio 69. Por otro lado, los esfuerzos principales de mínima compresión se orientan hacia el WNW-ESE, presentando inclinaciones menores a los 20°. Al igual que con los  $\sigma_1$  obtenidos, solo uno de los  $\sigma_3$  no cumple con la inclinación referida, ya que se asocia al fallamiento inverso analizado en el Sitio 71. En lo que respecta al conjunto de esfuerzos principales de compresión intermedia ( $\sigma_2$ ), éstos se concentran cerca de la vertical, salvo en los dos sitios de control ya mencionados (sitios 69 y 71), en donde se encuentran en la horizontal, asociados al fallamiento normal e inverso analizado

Considerando que los esfuerzos principales que se encuentran sobre la horizontal ( $\sigma_1$  y  $\sigma_3$ ), se orientan en una sola dirección, se obtiene un tensor de esfuerzos en el que las orientaciones promedio del  $\sigma_1$  resultante y  $\sigma_3$  resultante, son: N24E y N69W, respectivamente (Fig. 17). La orientación promedio del esfuerzo principal de compresión intermedia ( $\sigma_2$ ) no se determinó, pero se observa, como ya se mencionó, que estos esfuerzos se localizan cerca de la vertical. La relación angular entre cada uno de los esfuerzos principales, es de aproximadamente 90°.

El régimen de esfuerzos bajo el cual se originaron las estructuras de deformación en el Area VIII, se puede representar de la siguiente manera:

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$$

$$0$$

$$\sigma_{NNE-SSW} > \sigma_v > \sigma_{WNW-ESE}$$

De acuerdo con el tensor anterior, el estilo de deformación dominante en el Area VIII corresponde al fallamiento de desplazamiento lateral (Tabla IV, Fig. 17); sin embargo, se obtuvieron dos soluciones (sitios 69 y 71) que no corresponden a este estilo de deformación. Esto se explica, como anteriormente se ha hecho, con base en la permutación de los esfuerzos principales en el tensor de esfuerzos. En esta ocasión, al igual que en el Area II, el intercambio de posiciones en el tensor de esfuerzos, se da entre los tres esfuerzos principales, sin permanecer alguno de éstos invariante sobre la horizontal. La orientación de las fallas normales e inversas en los sitios mencionados, es consistente con la orientación promedio del  $\sigma_1$  resultante.

El sistema de esfuerzos soluciona el fallamiento lateral con orientación de N05W, y las estructuras inversas orientadas hacia N84W y N21W en el Sitio 67; las estructuras normales con orientación de N30E, y el fallamiento inverso hacia N88W en el Sitio 68; las estructuras inversas hacia N65W, N60W y N18E en los sitios 70 y 71; las estructuras laterales y normales en el Sitio 73; y también, algunas de las estructuras en los sitios 69 y 72 (ver apéndice estructural).

## AREA IX

Los resultados del análisis de esfuerzos en el Area IX (Fig. 5) se presentan en la Figura 18. A partir del análisis de los datos estructurales de diez sitios de control, se obtuvieron once soluciones

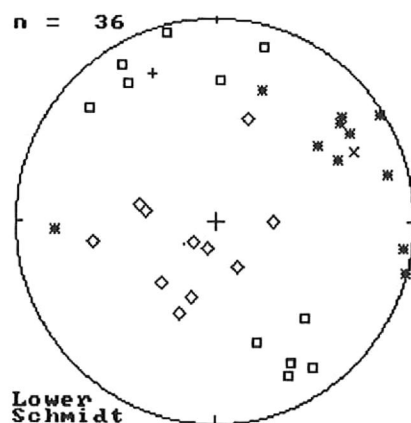


Fig. 18. Orientación de los esfuerzos principales de máxima, intermedia y mínima compresión de diez sitios de control en el Area IX (ver la tabla respectiva y el apéndice estructural). La simbología usada es la misma que en la Figura 10. La orientación promedio resultante de cada uno de los esfuerzos principales, es:  $\sigma_1=21/N24W$ ,  $\sigma_2=75/S54W$  y  $\sigma_3=24/N62E$ . El número de fallas analizadas en el Area IX, es de 50.

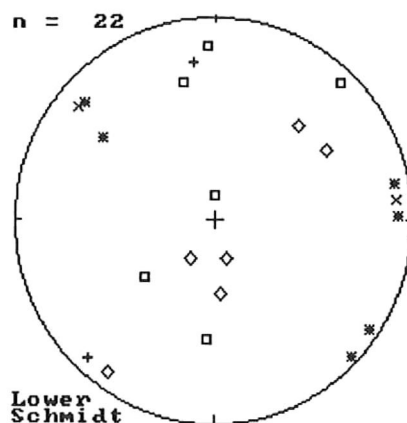


Fig. 19. Orientación de los esfuerzos principales de máxima, intermedia y mínima compresión de cinco sitios de control en el Area X (ver la tabla respectiva y el apéndice estructural). La simbología usada es la misma que en la Figura 10. Dada la distribución de los esfuerzos principales, se obtuvieron dos orientaciones promedio resultantes de máxima compresión ( $\sigma_1=23/N08W$  y  $\sigma_1=08/S43W$ ) y dos de mínima compresión ( $\sigma_3=08/N84E$  y  $\sigma_3=13/N51W$ ). El número de fallas analizadas en el Area X, es de 21.

probables, respondiendo en su totalidad, a soluciones de desplazamiento lateral (Tabla V). En la Figura 18 se observan tres familias de datos, cada una de ellas definida por uno de los esfuerzos principales. Los esfuerzos principales de máxima y mínima compresión ( $\sigma_1$  y  $\sigma_3$ ) se orientan hacia el NNW-SSE y ENE-WSW, respectivamente, manteniéndose prácticamente en la horizontal. Por su parte, los esfuerzos principales de compresión intermedia ( $\sigma_2$ ) se agrupan cerca de la vertical.

La distribución de los esfuerzos principales en la Figura 18 indica que las estructuras de deformación analizadas en el Area IX, se originaron bajo un régimen de esfuerzos en el cual, la orientación promedio del  $\sigma_1$  resultante corresponde a N24W, y su inclinación a 21°. Como se observa en esta figura, la relación angular entre los esfuerzos principales resultantes ( $\sigma_1 = 21/N24W$ ,  $\sigma_2 = 75/S54W$  y  $\sigma_3 = 24/N62E$ ) es de aproximadamente 90°.

El campo de esfuerzos que dio lugar a las estructuras de deformación en el Area IX se puede representar por el siguiente tensor:

$$\begin{array}{c} \sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 \\ 0 \\ \sigma_{NNW-SSE} > \sigma_v > \sigma_{ENE-WSW} \end{array}$$

La orientación promedio de los esfuerzos principales resultantes en la zona IX, resuelve las estructuras normales paralelas al  $\sigma_1$  resultante en cinco sitios de control (sitios 27, 29, 33, 34 y 38). También, el mismo tensor soluciona el fallamiento inverso que se observa en toda el área (sitios 27, 29, 33, 36 y 37), siendo su orientación casi perpendicular a la orientación del esfuerzo principal resultante de máxima compresión ( $\sigma_1$ ). Por último, de acuerdo con la orientación promedio del  $\sigma_1$  resultante, cabe esperar estructuras de desplazamiento lateral con una relación angular menor a

TABLA V. RESULTADOS DEL ANALISIS DE ESFUERZOS EN LAS AREAS IX Y X

ESFUERZOS PRINCIPALES				
AREA IX	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	FALLAMIENTO
SITIO 26	12/N16E	79/S16W	01/S75E	L
SITIO 27	21/S29E	58/N78W	22/N52E	L
SITIO 28	04/N15W	78/S48W	11/N75E	L
SITIO 29	37/S20E	46/N18E	20/S87W	L
SITIO 33	17/S26E	61/N81W	21/N57E	L
SITIO 34	11/N32W	56/S42W	32/N64E	L
SITIO 35	31/N02E	58/S18W	05/S82E	L
SITIO 36	14/S35E	66/N90E	19/N51E	L
SITIO 37	35/S44E 20/N33W	38S81W 70S26E	32/N20E 02/N58E	L L
SITIO 38	17/N49W	49/S22W	36/N54E	L
AREA X	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	FALLAMIENTO
SITIO 23	08/N43E	74/S17E	14/N49W	L
SITIO 24	41/S04W	34/N59E	31/N55W	N
SITIO 75	15/N03W	72/S32W	08/N89E	L
SITIO 77	53/S51W	37/N42E	04/S46E	N
SITIO 79	31/N13W 80/N00E	60/S05E 09/S36W	08/N79E 05/S56E	L N

los  $45^\circ$ , con respecto al mismo  $\sigma_1$  resultante. Dichos planos de rompimiento teórico, se correlacionan de manera favorable con la orientación de las estructuras de desplazamiento lateral observadas en los sitios 27, 29, 33 y 36 (ver apéndice estructural).

De acuerdo a la orientación promedio del  $\sigma_1$  resultante, en los sitios 26, 28 y 35 no se dio una solución satisfactoria a las estructuras presentes. El fallamiento lateral hacia el NNW en el Sitio 28, y la estructura inversa con orientación de N75W/40S/106 en el Sitio 26, se resuelven de manera parcial. En el Sitio 35, no se resuelve alguna de las estructuras.

Como se ha visto, la orientación promedio de los esfuerzos principales resultantes da solución a la gran mayoría de las estructuras observadas en los sitios de control del Area IX.

## **AREA X**

Los resultados del análisis de esfuerzos en el Area X (Fig. 5) se presentan en la Figura 19. En esta área, se analizaron los datos estructurales de cinco sitios de control, a partir de los cuales, se obtuvieron seis soluciones probables. De estas soluciones, tres responden a fallamiento de desplazamiento lateral y tres a fallamiento normal (Tabla V). En la Figura 19, se puede ver que los esfuerzos principales de máxima compresión ( $\sigma_1$ ) que se asocian con el fallamiento de desplazamiento lateral analizado (sitios 23, 75 y 79), se orientan en dos direcciones: N-S y NE-SW. Lo mismo se observa con respecto a la orientación (NW-SE y ENE-WSW) de los esfuerzos principales de mínima compresión ( $\sigma_3$ ) que se encuentran relacionados, tanto a las soluciones de desplazamiento lateral, como a las soluciones normales obtenidas en el Area X (Tabla V). Es importante hacer notar, que los esfuerzos principales de mínima compresión que se asocian al fallamiento normal (sitios 24, 77 y 79), se orientan en una sola dirección (NW-SE); también, que los esfuerzos principales de compresión intermedia ( $\sigma_2$ ) que se encuentran en la horizontal, se orientan

paralelamente al  $\sigma_1$  con orientación NE. Por otro lado, en la Figura 19, cerca de la vertical se encuentran los esfuerzos principales  $\sigma_2$  y  $\sigma_1$ , relacionados con el fallamiento lateral y normal ya referido, respectivamente.

La distribución de los esfuerzos principales ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$ ) en la Figura 19 puede tener dos posibles interpretaciones, basadas principalmente en la orientación que presentan los esfuerzos principales de máxima compresión horizontales:

1) La dispersión que se observa entre los  $\sigma_1$  horizontales (aproximadamente  $45^\circ$ ) es aparente, y se debe a que fueron muy pocos los sitios de control analizados, lo que no permite obtener un conjunto bien definido de  $\sigma_1$  horizontales. Bajo esta interpretación, el fallamiento en el Area X es el resultado de un solo sistema de esfuerzos.

2) La deformación observada en el Area X es el resultado de dos regímenes de esfuerzos. Ciertamente, es necesario llevar a cabo el análisis de esfuerzos en más sitios de control, lo que permitiría darle un valor estadístico y un significado geológico mayor a los resultados obtenidos.

Hay dos elementos de análisis que permiten inclinarse por la segunda interpretación. Primero, el ángulo de aproximadamente  $45^\circ$  entre los  $\sigma_1$  horizontales que se orientan casi N-S y el  $\sigma_1$  con orientación NE-SW es muy grande como para considerar que el análisis de esfuerzos en un número mayor de sitios de control, pueda definir un conjunto único de  $\sigma_1$  horizontales. Segundo, la ortogonalidad entre los esfuerzos principales de máxima compresión con orientación N-S y NE-SW, y los esfuerzos principales de mínima compresión con orientación ENE-WSW y NW-SE, respectivamente, favorece la segunda interpretación. Además, la misma orientación que presentan los  $\sigma_2$  horizontales, apoyan la segunda interpretación. Al considerar un solo sistema de esfuerzos, estas relaciones angulares no se mantienen.

A partir de las observaciones del parrafo anterior, se obtienen dos tensores de esfuerzos en los que las orientaciones promedio de los  $\sigma_1$  resultantes corresponden a N08W y N43E (Fig. 19). Como ya se mencionó, la relación angular que guardan estos esfuerzos con respecto a los esfuerzos principales resultantes de mínima compresión ( $\sigma_3 = 08/N84E$  y  $\sigma_3 = 13/N51W$ ), es de aproximadamente  $90^\circ$ .

El sistema de esfuerzos en el que la orientación promedio del  $\sigma_1$  corresponde a N08W, se puede representar por el siguiente tensor:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &> \sigma_2 > \sigma_3 \\ 0 \\ \sigma_{=N-S} &> \sigma_v > \sigma_{=E-W} \end{aligned}$$

Este tensor soluciona de manera favorable el fallamiento normal en el Sitio 75, y las estructuras laterales orientadas hacia N40-45W en el Sitio 79 (ver apéndice estructural). Nótese que ninguna de las soluciones de fallamiento normal en los sitios 24, 27 y 79 se ha asociado a este sistema de esfuerzos. Las razones de esta omisión, se verán más adelante.

El otro sistema de esfuerzos que ha generado estructuras de deformación en el Area X y en el cual la dirección del  $\sigma_1$  corresponde a N43E, se puede representar por el siguiente tensor:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &\approx \sigma_2 \gg \sigma_3 \\ 0 \\ \sigma_{NE-SW} &\approx \sigma_v \gg \sigma_{NW-SE} \end{aligned}$$

El cambio de orientación del  $\sigma_1$  resultante implica una rotación del campo de esfuerzos de aproximadamente  $50^\circ$  con respecto al sistema de esfuerzos anterior. Además de la rotación

mencionada, los esfuerzos principales  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  intercambiaron posiciones en el tensor de esfuerzos, lo que explica las soluciones de fallamiento normal en los sitios 24, 77 y 79 (Tabla V, Fig. 19). En la Figura 19 se observa que las soluciones de fallamiento normal en los sitios mencionados, se encuentran asociadas únicamente a este segundo tensor de esfuerzos. Esto se puede ver a partir de la orientación que presentan los esfuerzos principales de intermedia y mínima compresión que se asocian a las estructuras normales analizadas. Si se considera que las soluciones normales que se obtuvieron, se asocian a ambos regímenes de esfuerzos, entonces se debería esperar que alguno de los  $\sigma_2$  que se encuentran sobre la horizontal se orientaran paralelamente a los  $\sigma_1$  con orientación N-S. Por otro lado, algún  $\sigma_3$  asociado a las soluciones normales, se orientaría en dirección ENE-WSW. Ninguna de las dos cosas sucede.

La orientación de los esfuerzos principales en el tensor de esfuerzos, resuelve satisfactoriamente el fallamiento normal hacia el NE en los sitios 24, 75, 77 y 79, y las estructuras lateral (N71E) e inversa (N55W) en el Sitio 23 (ver apéndice estructural).

Como se puede ver, casi todo el fallamiento en el Area X lo resuelve este último tensor.

#### **AREA XI (Punta Cabras Norte).**

En la Figura 20 se presentan los datos de los rasgos estructurales medidos en campo en el Area XI. En esta figura se muestran los polos de los planos de falla, la orientación y echado de las estructuras, y el ángulo de las estrías sobre el plano de falla. Con base en estas observaciones y con la construcción misma de la gráfica, se pudo determinar que de los 29 planos de falla de la Figura 20, el 83% corresponde a fallamiento lateral, el 10% a fallas normales y el 7% a fallamiento inverso.

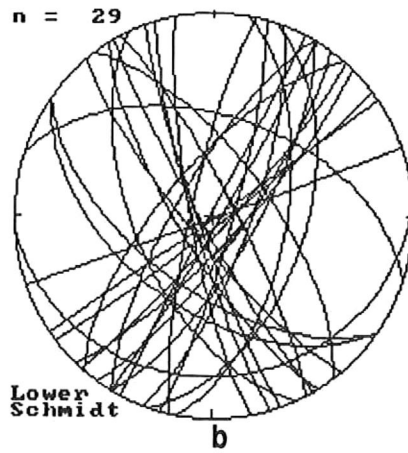
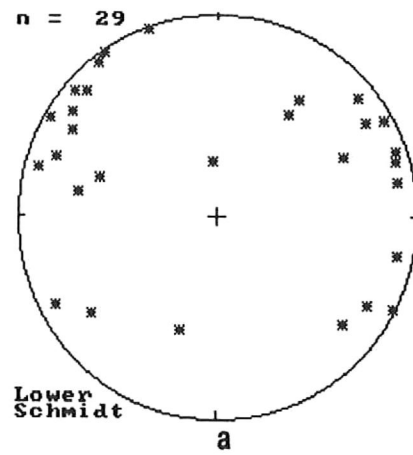


Fig. 20. Datos de fallamiento de la Región de Punta Cabras Norte (Area XI). (a) Los polos de los planos de falla y (b) los círculos mayores, muestran el dominio de las estructuras verticales con orientación NNW y NNE, con echados hacia el SW y SE, respectivamente. También se observan algunas estructuras inversas con orientación E-W y algunas estructuras normales con orientación N-S. El número de fallas medidas en campo para el Area XI, es de 29.

En la Figura 20 se observan dos tendencias claras en la orientación de los rasgos estructurales: una hacia el NNW, que se interpreta como fallamiento lateral derecho, y otra con orientación NNE, que se interpreta como fallamiento lateral izquierdo. Se observan también, dos estructuras inversas con orientación E-W y algunas estructuras normales orientadas aproximadamente N-S. El sentido del desplazamiento de las estructuras laterales, se infiere a partir de la relación angular entre los dos grupos de fallas; la presencia de fallas inversas con orientación E-W, y fallas normales con orientación N-S.

Dada la homogeneidad de la población de datos de la Figura 20, la relación angular de las estructuras, y los datos de campo reunidos en el análisis estructural del área, se puede inferir que el fallamiento presente en Punta Cabras Norte, obedece a un solo sistema de esfuerzos cuyo  $\sigma_1$  se encuentra sobre la horizontal y con una orientación aproximada N-S. Las magnitudes relativas de los esfuerzos principales que originaron el fallamiento en el área, se pueden representar de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &> \sigma_2 > \sigma_3 \\ &0 \\ \sigma_{N-S} &> \sigma_v > \sigma_{E-W} \end{aligned}$$

Aunque el estilo de fallamiento dominante en el Area XI es de tipo lateral, hay sitios en los que se observó (Fig. 20) fallamiento normal e inverso, asociado a estructuras con orientación N-S y E-W, respectivamente. Esta combinación de fallas se debe a la permutación de dos de los esfuerzos principales en el tensor de esfuerzos. En ambos casos, la orientación de las estructuras normales e inversas es congruente con la orientación del  $\sigma_1$  en el Area XI.

## AREA XII (Punta Cabras Sur)

En la Figura 21, se muestran los datos de falla medidos en campo en el Area XII. Esta figura es similar y presenta la misma información que la Figura 20. En esta área, se midieron un total de 28 estructuras de las cuales, el 64% responde a estructuras de desplazamiento lateral, el 25% a fallamiento normal y el 11% a fallas inversas. En la discriminación anterior, se procedió de manera similar que en el área de Punta Cabras Norte.

Aparentemente, la población de datos que se muestra en la Figura 21 es más heterogénea que la del Area XI (Figura 20). Sin embargo, una revisión detallada de estos datos, indica que ambos conjuntos de estructuras representan sistemas de esfuerzos similares, tanto en orientación, como en las magnitudes relativas de los esfuerzos principales en el tensor de esfuerzos. En el área de Punta Cabras Sur (Figura 21), se observa un dominio casi total de las estructuras con orientación NE que corresponden, según la interpretación de la Figura 21, con fallamiento de desplazamiento lateral izquierdo (aproximadamente el 84% del total de las fallas de desplazamiento lateral presentes en el área). Lo anterior coincide con la observación hecha por Delgado-Argote *et al.* (1990), relativo a que las estructuras de desplazamiento lateral izquierdo, es el tipo de fallamiento más importante en la Región de Punta Cabras (áreas XI y XII).

De acuerdo con lo anterior, las magnitudes relativas de los esfuerzos principales, se representan:

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$$

$$0$$

$$\sigma_{N-S} > \sigma_v > \sigma_{E-W}$$

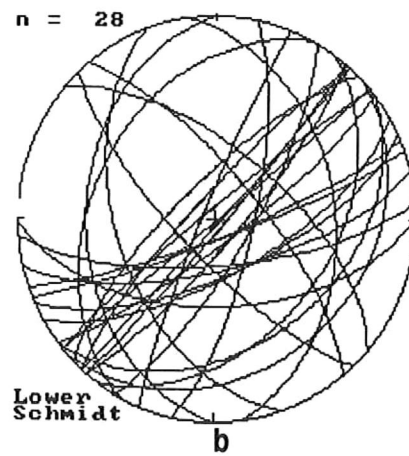
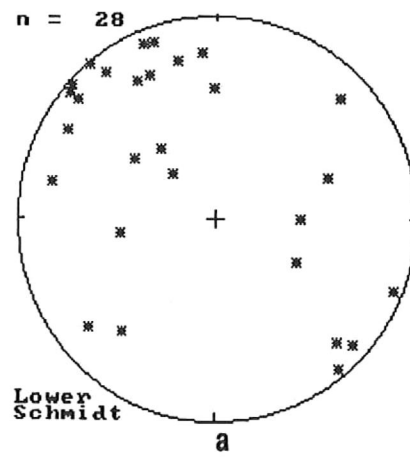


Fig. 21. Datos de fallamiento de la Región de Punta Cabras Sur (Area XII). (a) Los polos de los planos de falla y (b) los círculos mayores, muestran el dominio de las estructuras verticales con orientación NE y echado SE. Las estructuras verticales hacia el NW, las normales y las inversas, son mínimas. El número de fallas medidas en campo para el Area XII, es de 28.

La orientación de las estructuras normales e inversas que se observan en la Figura 21, sigue siendo consistente con la orientación que presenta el  $\sigma_1$  en esta área y en el área anterior.

### VII.3.1. Implicaciones Regionales

La integración de los resultados del análisis de esfuerzos realizado en cada una de las áreas estructurales (Fig. 5), nos conduce al mapa de esfuerzos de la Figura 22. En este mapa se muestra la dirección de los esfuerzos principales horizontales de máxima compresión que generaron el fallamiento en cada una de las áreas estructurales. En el mapa de la Figura 22, se pudo haber presentado la dirección del esfuerzo principal de mínima compresión, en vez de la dirección del esfuerzo principal de máxima compresión, ya que dada la combinación de estilos de fallamiento observada (tablas I-V), el esfuerzo principal que generalmente permaneció invariante sobre la horizontal, fue el esfuerzo principal de mínima compresión. Sin embargo, se optó por mostrar la dirección del  $\sigma_1$ , por considerarla más relevante, en vista de la magnitud de este esfuerzo. Como se puede ver, en algunas áreas el esfuerzo principal horizontal de máxima compresión ( $\sigma_1$ ) se orienta en dos direcciones, lo que indica que las estructuras analizadas en estas áreas, se originaron bajo dos sistemas de esfuerzos. También se observa que en varias áreas el  $\sigma_1$  resultante presenta la misma orientación, lo que sugiere que las estructuras de deformación en éstas responden al mismo campo de esfuerzos, al mismo tiempo que le da un carácter regional a los esfuerzos obtenidos.

Considerando lo anterior, y con el fin de integrar los resultados obtenidos a una escala mayor y encontrar la relación con la geología regional, se graficaron los esfuerzos principales horizontales de máxima compresión que se obtuvieron a lo largo del Bloque Santo Tomás sobre la red de áreas iguales. En la Figura 23, se observa que estos esfuerzos se agrupan en tres direcciones principales: WNW, N-S y NE. La orientación promedio de cada conjunto de esfuerzos principales corresponde a:  $\sigma_1 = 28/N59W$ ,  $\sigma_1 = 19/N11W$  y  $\sigma_1 = 31/N45E$ .

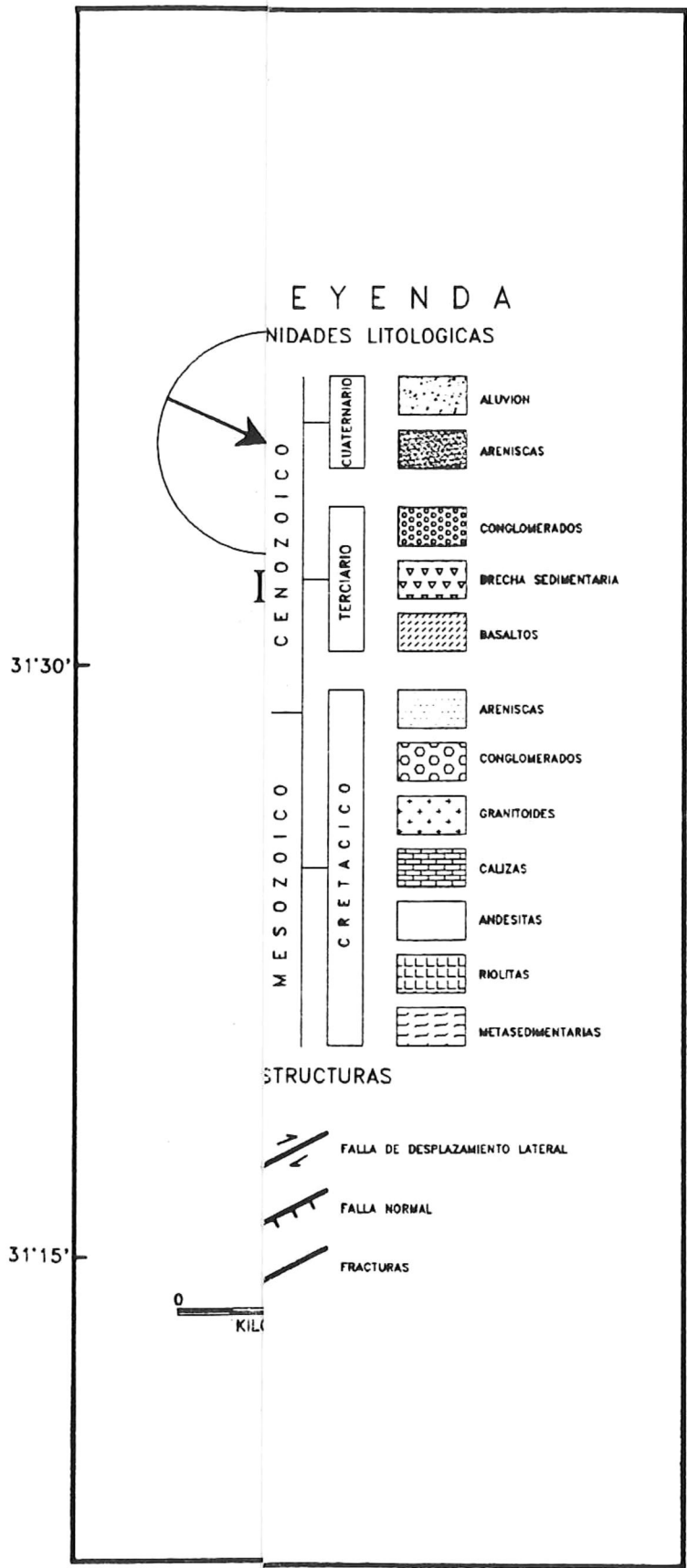


Fig. 22. Principales horizontales de máxima c... la Fig. 4.

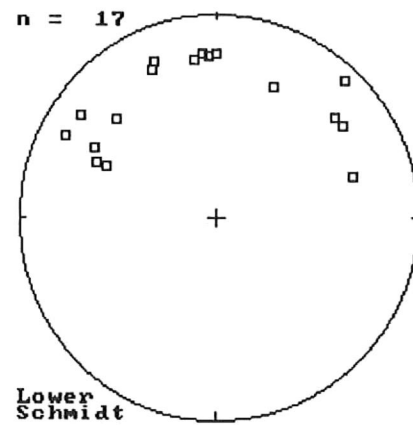


Fig. 23. Orientación de los esfuerzos principales de máxima compresión ( $\sigma_1$ ) en el Bloque Santo Tomás, obtenida a partir del análisis de 344 planos de falla. En la figura se observan tres conjuntos de vectores de máxima compresión: 1º) con orientación NW, 2º) con orientación N-S y 3º) con orientación NE. Los valores promedio resultantes, son:  $\sigma_1=28/N59W$ ,  $\sigma_1=19/N11W$  y  $\sigma_1=31/N45E$ , respectivamente.

La distribución de los esfuerzos principales horizontales de máxima compresión ( $\sigma_1$ ) en la Figura 23, indica que el área de estudio ha estado sujeta a por lo menos tres sistemas o campos de esfuerzos regionales a partir del Cretácico Temprano (edad de las rocas más viejas que se encuentran deformadas en el área de estudio). Lo anterior se desprende del hecho de que el esfuerzo principal horizontal de máxima compresión, no puede orientarse en dos direcciones al mismo tiempo y en el mismo lugar. Bajo esta premisa, los cambios de orientación que experimenta el  $\sigma_1$  resultante, se explican con base en una rotación del campo o tensor de esfuerzos con respecto a un eje vertical. Cuando se discutieron los resultados del análisis de esfuerzos área por área, se hizo alusión a la rotación del campo de esfuerzos para justificar el cambio de orientación que presentaba el  $\sigma_1$  resultante (áreas III, IV, V, VII y X); sin embargo, en ninguna de las ocasiones anteriores, se establecieron las posibles causas o mecanismos que pudiesen dar origen a esta rotación. Al parecer, las rotaciones del campo de esfuerzos las determinan los cambios o reorganizaciones en los regímenes tectónicos, ya que se considera que la mayor parte del campo de esfuerzos tiene su origen en las fuerzas de conducción de las placas litosféricas (Richardson *et al.*, 1979; Zoback y Zoback, 1980). Como consecuencia de lo anterior, se puede decir que los campos de esfuerzos son consistentes a través de grandes áreas y que permanecen fijos por períodos similares al tiempo comprendido entre cada reorganización mayor de placas (Sykes y Sbar, 1973; Richardson *et al.*, 1979; Zoback y Zoback, 1980; Nakamura y Uyeda, 1980). De acuerdo con lo anterior, resulta interesante revisar cuales han sido los procesos tectónicos que han afectado la región. Se sabe que a partir del Mesozoico medio hasta el Cenozoico temprano, dominó el tectonismo convergente asociado con los procesos de subducción en la margen oeste de Norteamérica (Atwater, 1970, 1989; Dickinson, 1981). Por otro lado, el estudio de las anomalías magnéticas en piso oceánico, muestran el inicio del cambio de régimen tectónico en la región, como consecuencia del encuentro

dorsal-trinchera hace aproximadamente 30 Ma (Atwater, 1970, 1989; Spencer y Normark, 1979, 1989; Dickinson, 1981). Pero no solamente de esa revolución han quedado registros, durante el mismo proceso de subducción se dieron reorganizaciones en la interacción de placas (Menard, 1978; Mammerickx y Klitgord, 1982; Atwater, 1989; Fowler, 1990), según se manifiesta en los cambios de orientación de las zonas de fractura y anomalías magnéticas en piso oceánico. Asimismo, durante el desarrollo del Sistema Transforme de San Andrés, se han producido cambios que han afectado el estado de esfuerzos en grandes áreas continentales (Zoback y Zoback, 1980; Zoback *et al.*, 1981). Desgraciadamente, los efectos que tienen en continente los cambios en los movimientos relativos entre placas no son fáciles de identificar, menos aún, si estos cambios son **pequeños** (Menard, 1978; Atwater, 1989).

Además de los argumentos que se presentan en el párrafo anterior, hay otras líneas de evidencia basadas en estudios geológicos y sísmicos que indican que algunas de las estructuras analizadas, principalmente en la Región Norte del Bloque Santo Tomás (Figs. 4 y 5), son estructuras viejas que probablemente se originaron en respuesta a campos de esfuerzos asociados a otros procesos tectónicos diferentes al actual. Basándose en las relaciones de campo que presentan las rocas de las formaciones Rosario y Alisitos en la localidad de Bahía Soledad, Acosta (1970) sugiere que el rompimiento en la Falla de Santo Tomás probablemente ocurrió antes y durante la depositación de los sedimentos del Cretácico Superior, sin descartar la actividad post-cretácica. De acuerdo con Gastil *et al.* (1975, 1981), el origen de la Falla de Agua Blanca está relacionado con la subducción de la Placa Farallón bajo la margen occidental de la Placa de Norteamérica. Bajo esta interpretación, la falla fue originalmente una estructura transforme oceánica de desplazamiento lateral izquierdo del tipo trinchera-trinchera durante el Jurásico-Cretácico. La interpretación se basa (1) en la ausencia de las facies calcáreas de la Formación Alisitos hacia el norte de la Falla de Agua Blanca, y (2) en

la terminación abrupta de una anomalía gravimétrica positiva, la cual se puede seguir más o menos a partir del paralelo 28°N hasta la Falla de Agua Blanca, donde termina. El truncamiento de estos rasgos geológicos se puede explicar mediante grandes desplazamientos siniestros a lo largo de la Falla de Santo Tomás, o por medio de fallamiento normal regional, donde el bloque que sube corresponde al área que se encuentra al norte de la Falla de Agua Blanca. Aunque ninguno de los dos argumentos es completamente convincente (Gastil *et al.*, 1975, p. 126), algunas observaciones de campo más recientes (Armijo y Suárez, 1981) asociadas con los rasgos geométricos a lo largo de la falla, apoyan la hipótesis que Gastil *et al.* (1975, 1981) proponen. Independientemente del origen oceánico que pudiese tener la Falla de Agua Blanca, es evidente, de acuerdo a los dos argumentos en que basan Gastil *et al.* (1975, 1981) su hipótesis, que esta falla ha actuado como una barrera estructural posiblemente desde tiempos mesozoicos (F. Suárez, comunicación personal, 1992). Hay otras observaciones que son consistentes con lo hasta ahora dicho. De acuerdo con O'Connor y Chase (1989), la actividad sísmica en la Falla de Agua Blanca, hace suponer que esta estructura se encuentra relacionada con el actual límite entre placas (Sistema de Fallamiento Transforme de San Andrés); sin embargo, no descartan la posibilidad de que los desplazamientos mayores en esta estructura se hayan dado antes de la apertura del Golfo de California (prior 5.5 Ma). De ser así, estos desplazamientos tuvieron lugar bajo un régimen tectónico diferente al actual e incluso, O'Connor y Chase (1989) entreven la posibilidad de que la actividad sísmica en la falla represente la reactivación de una estructura transforme acrecionada (hipótesis manejada por Gastil *et al.*, 1981). Nosotros estamos de acuerdo en que la actividad sísmica en la Falla de Agua Blanca de cierta manera la relaciona con el sistema tectónico actual (Rockwell *et al.*, 1987; Suárez-Vidal *et al.*, 1991); pero pensamos que el patrón sísmico que presenta la falla (considerando su rama sur), apoya la segunda posibilidad planteada por O'Connor y Chase (1989), en vez de un origen relacionado al régimen tectónico actual. El hecho de que la estructura sea activa, no implica que

ésta tenga su origen en el régimen tectónico imperante; como tampoco, el haberse originado bajo otro sistema de esfuerzos, impide su relación con el sistema tectónico actual. La posible reactivación de la Falla de Agua Blanca se puede fundamentar un poco más, si se observa de cerca la actividad sísmica que registra, y se consideran las evidencias geológicas con que se cuentan. De acuerdo con estas últimas y la actividad sísmica monitoreada (Allen *et al.*, 1960; Gastil *et al.*, 1975; Johnson *et al.*, 1976), la rama norte de la Falla de Agua Blanca es la estructura que muestra mayores evidencias de desplazamientos recientes; y en tiempos históricos, la rama que muestra mayor actividad (aunque mínima) sísmica. Recientemente, González y Suárez (1984) han propuesto la posibilidad de que la Falla de Agua Blanca esté desarrollando otra rama más al norte, con una orientación similar a la orientación que presentan las estructuras de desplazamiento lateral derecho asociadas al Sistema de Fallamiento de San Andrés, en cuyo caso, sería más activa que la ramas norte y sur de la misma falla. Esta propuesta nace a partir de la ubicación epicentral del enjambre sísmico ocurrido en la Bahía Todos Santos en 1981, y de las observaciones que Armijo y Suárez (1981) reportan sobre la existencia de un lineamiento estructural con orientación N52W que aparentemente muestra evidencias de desplazamientos recientes en continente. De ser así, todo parece indicar que la hipótesis que inicialmente sugieren Allen *et al.* (1960) y posteriormente Gastil *et al.* (1975), en el sentido de que la estructura original del Sistema Santo Tomás-Agua Blanca fue la Falla de Santo Tomás; y que a partir de ésta se desarrolla la Falla de Agua Blanca, misma que retoma el movimiento que inicialmente se daba en la ancestral Falla de Santo Tomás, es consistente con las observaciones geológicas y sísmicas con que se cuenta. Desde el punto de vista mecánico, lo anterior significa que al haber un cambio en el sistema de esfuerzos que dio origen a la Falla de Santo Tomás, se desarrolló la Falla de Agua Blanca (su parte oeste) en respuesta a este cambio, dado que la Falla de Santo Tomás dejó de presentar una orientación favorable con respecto al nuevo régimen de esfuerzos, que le permitiera seguir llevando a cabo los desplazamientos bajo el nuevo

régimen. Al respecto, Raleigh *et al.* (1972) establecen que se generarán nuevas fallas en donde ya existen fallas previas, cuando la orientación de estas últimas no resulte favorable con respecto al nuevo sistema de esfuerzos. Lo anterior, nos permite pensar que las diferentes ramas de la Falla de Agua Blanca (incluyendo la que proponen González y Suárez en 1984), se han originado como resultado de cambios en el campo de esfuerzos regional a través del tiempo; en donde el movimiento ha venido siendo transferido a las estructuras que presentan una orientación más favorable, con respecto al campo de esfuerzos regional imperante. Lo anterior podría explicar, dadas las condiciones regionales de esfuerzos en la actualidad, la mayor actividad sísmica registrada en la rama norte de la Falla de Agua Blanca; y favorecería aún más esta actividad en la rama que proponen González y Suárez (1984).

Por otro lado, hay argumentos adicionales que son consistentes con la hipótesis que se propone. Durante la campaña de campo, se observó el desarrollo de milonitas en algunos sitios de control en los que se obtuvieron datos estructurales. En el área del Cerro Colorado, específicamente, la zona de milonitización alcanza un espesor de aproximadamente 100 m. La presencia de rocas miloníticas en zonas de falla sugiere que éstas se desarrollaron a unos 10 km de profundidad durante el fallamiento (Sibson, 1977; Hardcastle, 1989). De ser así, el hecho de que actualmente afloren implica una remoción de material por procesos de erosión del orden de 10 km. Considerando lo anterior, resultaría interesante conocer el tiempo que transcurrió a partir de la formación de las milonitas hasta su exposición en la superficie. Quizás sea difícil establecer una razón de erosión que nos permita saber el tiempo en el que fue removido el paquete de rocas que sobreyacía a las milonitas; sin embargo, lo que sí parece evidente es que las estructuras que dieron origen a estas milonitas, son lo suficientemente viejas como para hacer viable su exposición en superficie de acuerdo a las razones de erosión que se conocen. Como se puede ver, la presencia de las rocas

miloníticas en la zona de estudio, es un elemento más que apoya la idea de que en el Bloque Santo Tomás hay estructuras de deformación que tienen su origen bajo sistemas de esfuerzos y/o procesos tectónicos diferentes al actual.

Finalmente, si se observa la distribución de los esfuerzos principales horizontales de máxima compresión en la Figura 23, se ve en términos generales que cada uno de los sistemas de esfuerzos regionales identificados, se relacionan con una área específica de la zona de estudio. El conjunto de  $\sigma_1$  con orientación promedio de N59W está constituido por los  $\sigma_1$  resultantes que se obtuvieron a partir del análisis de las estructuras de deformación en la Región Norte del Bloque Santo Tomás (salvo los  $\sigma_1$  resultantes que se asocian a las áreas 5 y 7, y que se encuentran en este grupo). El conjunto de  $\sigma_1$  con orientación promedio de N45E está constituido por los  $\sigma_1$  resultantes que se obtuvieron a partir del análisis de las estructuras de deformación en la Región Central del bloque (con excepción de los  $\sigma_1$  resultantes que se asocian a las áreas 3 y 10). Por último, el conjunto de  $\sigma_1$  con orientación promedio de N11W, se encuentra principalmente asociado a las estructuras de deformación analizadas en la Región Sur del Bloque Santo Tomás (específicamente en las áreas IX, X, XI Y XII). Lo anterior muestra la relación que hay, aunque no exacta, sí significativa, entre cada uno de los campos de esfuerzos identificados, y una área específica de la zona de estudio. De acuerdo con esto, se puede decir que la deformación observada en la Región Norte del Bloque Santo Tomás (Figs. 4 y 5), resulta principalmente de un sistema de esfuerzos regional, en el que el esfuerzo principal horizontal de máxima compresión ( $\sigma_1$ ) se orienta hacia N59W. Las regiones Central y Sur del mismo bloque (Figs. 4 y 5) se ven mayormente afectadas por el sistema de esfuerzos regional, en el que el esfuerzo principal horizontal de máxima compresión ( $\sigma_1$ ) se orienta hacia N45E y N11W, respectivamente. Si se considera que bajo el sistema actual de esfuerzos a nivel regional, el  $\sigma_1$  se encuentra sobre la horizontal, y se orienta aproximadamente N-S (Zoback y Zoback, 1980;

Angelier, 1981), la región que muestra mayores evidencias de deformación bajo este sistema, es la Región Sur del Bloque Santo Tomás. Como se puede ver, la misma relación que se establece entre los sistemas de esfuerzos identificados en la Figura 23, y cada una de las regiones del Bloque Santo Tomás, es consistente con los argumentos geológicos, sísmicos y mecánicos que se han presentado en favor de la hipótesis, que nace a raíz de la interpretación de la Figura 23.

Considerando que la hipótesis que se maneja es correcta, aunque no se tiene control de tiempo sobre los tres sistemas de esfuerzos regionales identificados (Fig. 23), el estilo de deformación observado (tablas I-V) nos ubica en un ambiente tectónico específico. La deformación extensional que domina el área de estudio (fallamiento de desplazamiento lateral y fallamiento normal) se asocia a un campo de esfuerzos tectónico tensional ( $\sigma_1 \approx \sigma_2 \gg \sigma_3$ ), que nos ubica en un ambiente transforme neogénico y de intra-arco. Dado que el fallamiento de desplazamiento lateral, es el estilo principal de deformación que se observa en el Bloque Santo Tomás, el sistema de esfuerzos que en términos generales la representa, es:

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$$

ó

$$\sigma_1 > \sigma_v > \sigma_3.$$

Hasta el momento, se han presentado una serie de argumentos en favor de la hipótesis que plantea que el Bloque Santo Tomás ha estado sujeto a por lo menos tres sistemas o campos de esfuerzos regionales a partir del Cretácico Temprano. Sin embargo, la distribución de los esfuerzos principales horizontales de máxima compresión ( $\sigma_1$ ) en la Figura 23, puede tener una segunda interpretación. Bajo ésta, todas las estructuras analizadas en el Bloque Santo Tomás se han originado bajo la influencia del sistema de esfuerzos regional, que se asocia con el proceso tectónico que actualmente se observa en la región. De acuerdo con esta interpretación, el conjunto de  $\sigma_1$  con

orientación promedio de N11W (Fig. 23) representa al sistema actual de esfuerzos. Los  $\sigma_1$  que se orientan hacia el NW ( $\sigma_1 = 28/N59W$ ) y NE ( $\sigma_1 = 31/N45E$ ), responden a estructuras secundarias que se asocian con este último sistema. Como se puede ver, esta segunda interpretación entra en contradicción con todos los elementos geológicos, sísmicos y mecánicos que se aportaron en favor de la primera hipótesis presentada; además, no satisface los modelos geométricos que pueden explicar las estructuras secundarias a que se hace referencia (Moody y Hill, 1956; Harding, 1974; Groshong, 1988).

De acuerdo con los argumentos presentados, la primera interpretación que se obtiene de la Figura 23 es congruente con los resultados que se tienen de estudios previos; sin embargo, se requiere de estudios adicionales que confirmen los resultados aquí obtenidos, o en su defecto, que apoyen alguna otra interpretación.

#### **VII.4. Estabilidad Tectónica del Bloque Santo Tomás**

Durante la campaña de verificación y obtención de los datos estructurales, se observaron planos de falla estriados en materiales poco consolidados, lo que hizo suponer que dichas estructuras respondían a eventos de deformación recientes.

Con el propósito de corroborar esta inferencia, se instaló en el Rancho El Coyote, ubicado en la parte central del área de estudio, un sismógrafo MQ-800 acoplado a un sensor tipo RANGER SS1 de componente vertical. Este sismógrafo estuvo operando del 24 de julio al 1° de agosto de 1990. Durante este período, se registraron 12 eventos sísmicos, 9 de los cuales se ubicaron en un radio menor a los 50 km (Tabla VI). La actividad sísmica registrada quedó inscrita en el área limitada hacia el norte por la Península de Punta Banda, hacia el sur por Colonet, hacia el oriente por el Cañón Jones (traza de la falla de Agua Blanca) y hacia el poniente por la plataforma continental peninsular. En la Figura 24, se pueden apreciar las distancias máximas de localización de 7 de los 9 eventos

TABLA VI. CRONOLOGIA DE LA SISMICIDAD EN EL BLOQUE SANTO TOMAS  
(TOMADA DE DELGADO-ARGOTE ET AL., 1990).

# de evento	Día. (julio 90)	Hora GMT.	t de P t de S	S-P	Distancia
1	25	17:17	21.65 27.75	6.10	48.8
2	27	13:43	7.40 9.86	2.46	17.2
3	27	15:44	30.20 32.20	2.00	14.0
4	27	17:55	17.50 20.75	3.25	22.7
5	28	8:04	18.70 19.05	0.35	2.4
6	28	17:37	37.40 39.90	2.50	17.5
7	30	21:20	9.30 12.35	3.05	21.3
8	31	23:46	19.40 21.50	2.10	14.7
9	1 (agosto 90)	00:11	34.15 41.35	7.20	43.4

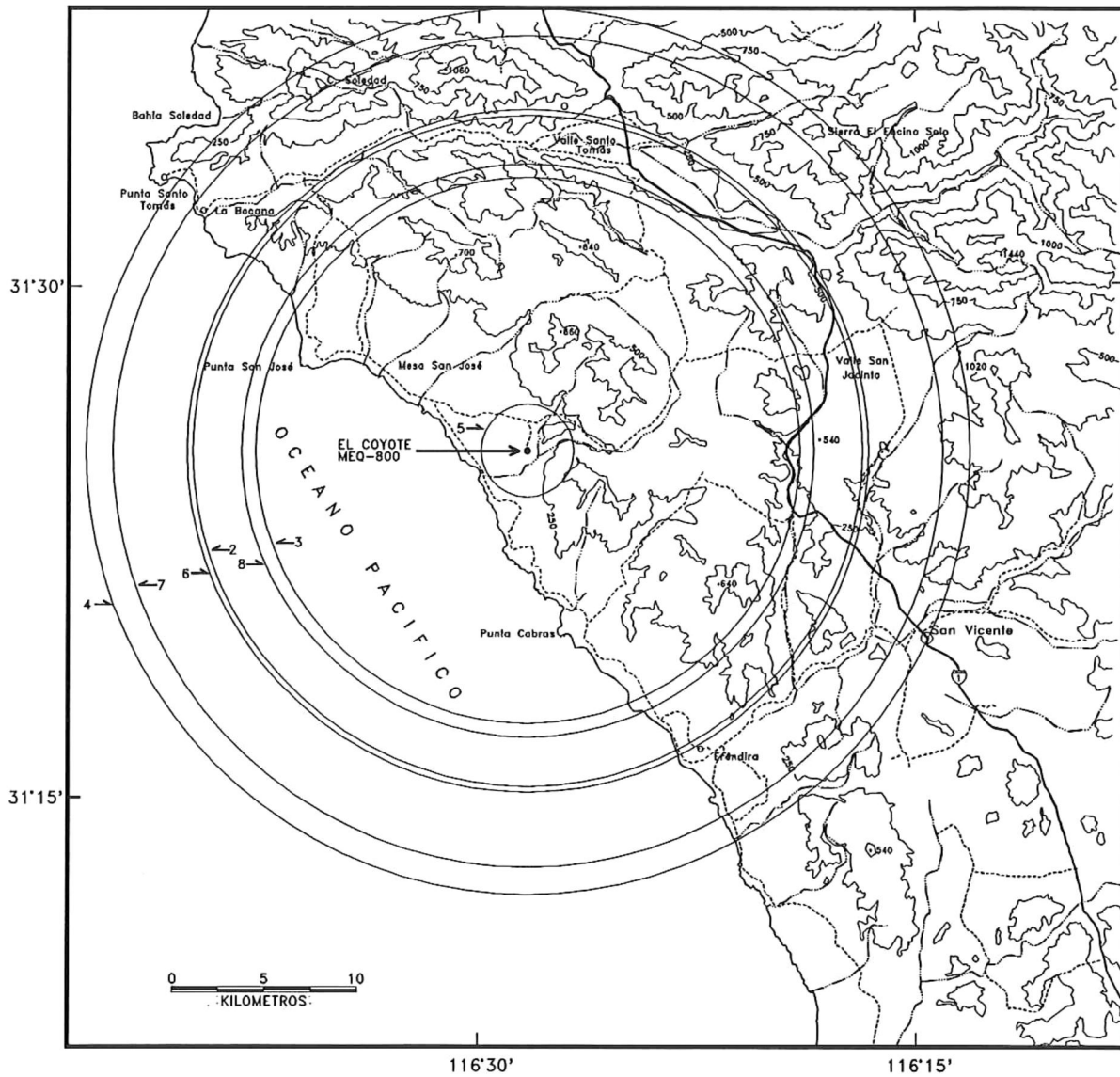


Fig. 24. Distancias máximas de localización de eventos sísmicos con una estación en el Rancho El Coyote. Las distancias fueron calculadas a partir de los tiempos de arribo de las ondas S y P (S-P) para una velocidad de propagación de onda de 7 km/s (ver Tabla VI)(modificada de Delgado-Argote *et al.*, 1990).

sísmicos cuyo radio es menor a los 50 km. En esta figura, se observa que el radio de estos eventos varía entre 2.4 y 22.7 km, quedando comprendidos dentro de la zona de estudio los eventos 8, 6, 2, 3 y principalmente, el evento 5, que prácticamente se encuentra bajo el sensor sísmico.

Además de la actividad sísmica que se presenta en la Tabla VI y en la Figura 24, son varias las evidencias que muestran que la zona de estudio se encuentra sujeta a procesos de deformación que se asocian con el proceso tectónico regional actual. Estudios geológicos y sísmicos han identificado distintas evidencias de actividad cuaternaria en diferentes elementos estructurales en los límites y dentro del Bloque Santo Tomás (Allen *et al.*, 1960; Orme, 1974; Legg y Wong, 1982, 1989; Legg *et al.*, 1987; Rockwell *et al.*, 1989). Algunos de estos elementos, como la Falla de Agua Blanca (Hatch y Rockwell, 1976) y los sistemas de fallamiento de Agua Blanca y San Clemente en borde continental (Legg y Wong, 1989; R. L. Sedlock, comunicación oral, 1991), son parte activa del límite actual entre la Placa Pacífico y la Placa de Norteamérica e incluso, se les atribuye parte del movimiento total entre estas dos placas. Por otro lado, en el análisis de esfuerzos se identificaron estructuras de deformación producto del sistema de esfuerzos regional actual (Fig. 23;  $\sigma_1 = 19/N11W$ ).

Todas las evidencias anteriores permiten afirmar que el Bloque Santo Tomás es tectónicamente activo. Ciertamente, en un contexto regional, el área de estudio es una de las zonas sísmicas que presenta menor actividad (Johnson *et al.*, 1976); sin embargo, no hay que olvidar que en ella se tienen elementos estructurales mayores activos que pueden generar sismos hasta de 7° de magnitud (Ortega, 1988).

## VIII. CONCLUSIONES

Las conclusiones que se derivan de este trabajo, son las siguientes:

- 1) La correlación entre los lineamientos interpretados en imagen de satélite y las estructuras medidas en campo, muestra que a pesar de que los dos conjuntos de datos se traslapan sólo de forma parcial; y además, que siendo el número de datos de campo inferior a los datos en imagen de satélite, existe una buena correlación entre ambos conjuntos de datos. De acuerdo con lo anterior, es de esperarse que al aumentar el número de estructuras medidas en campo, y conforme el muestreo se haga más sistemático, esta correlación será cada vez mayor. Por otro lado, la misma correlación le da validez al análisis de esfuerzos en un contexto regional.
- 2) En la correlación estructural entre los lineamientos interpretados en imagen de satélite y las estructuras de falla medidas en campo, se observa que la orientación de las estructuras de deformación dentro del Bloque Santo Tomás se ve influenciada por los elementos estructurales mayores que se encuentran en la zona de estudio (Sistema Santo Tomás-Agua Blanca).
- 3) Los resultados del análisis de esfuerzos muestran que el Bloque Santo Tomás ha estado sujeto a por lo menos tres sistemas o campos de esfuerzos regionales desde el Cretácico Temprano; siendo su parte sur, la que se ha visto mayormente afectada por el campo de esfuerzos regional actual ( $\sigma_1$  H  $\approx$  N-S).
- 4) El estilo de deformación observado, se asocia a un campo de esfuerzos tectónico tensional con predominio de estructuras de desplazamiento lateral, que nos ubica en un ambiente transforme neogénico y de intra-arco.

5) Con base en los resultados que arroja el presente estudio, aunados a las evidencias geológicas y sísmicas con que se cuenta, se concluye que el Bloque Santo Tomás es una región tectónicamente activa, que actualmente se encuentra sujeta a procesos de deformación que se asocian con el Sistema de Fallamiento Transforme de San Andrés-Golfo de California.

## IX. LITERATURA CITADA

- ACOSTA, M. G., 1970, Upper Cretaceous geology of the Bahia Soledad-Punta China area, *in* Pacific Slope Geology of Northern Baja California and Adjacent Alta California: American Association of Petroleum Geologists, and Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Pacific Section, p. 30-36.
- ALLEN, C. R., L.T. Silver, and F.G. Stehli, 1960, Agua Blanca fault-A major transverse structure of northern Baja California, Mexico: Geological Society of America Bulletin, v. 71, p. 457-482.
- ANGELIER, J., 1984, Tectonic analysis of fault slip data sets: Journal of Geophysical Research, v. 89 (B7), p. 5835-5848.
- ANGELIER, J., B. Colletta, and R. E. Anderson, 1985, Neogene paleostress changes in the Basin and Range-A case study at Hoover Dam, Nevada-Arizona: Geological Society of American Bulletin, v. 96, p. 347-361.
- ANGELIER, J., B. Colletta, J. Chorowicz, L. Ortelieb, and C. Ranging, 1981, Fault tectonics of the Baja California peninsula and the opening of the Sea of Cortez, Mexico: Journal of Structural Geology, v. 3 (4), p. 347-357.
- ARMIJO, R. F., and F. Suárez, 1981, Neotectonics of northern Baja California: Geological Society of America Abstracts with Programs, Cordilleran Section meeting, Hermosillo, Mexico, p. 42.
- ATWATER, T., 1970, Implications of plate tectonics for the Cenozoic tectonic evolution of western North America: Geological Society of America Bulletin, v. 81, p. 3513- 3536.
- 1989, Plate tectonic history of the northeast Pacific and western North America, *in* Winterer, E. L., Hussong, D. M., and Decker, R. W., eds., The Eastern Pacific Ocean and Hawaii: Boulder, Colorado, Geological Society of America, The Geology of North America, v. N, p. 21-72.

- CROWELL, J. C., 1962, Displacement along the San Andres fault, California: Geological Society of America Special Paper 71, 61 p.
- 1974, Sedimentation along the San Andres fault, California, *in* Dott, R. H., Jr., and Shaver, R. H., eds., Modern and Ancient Geosynclinal Sedimentation: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication No. 19, p. 292-303.
- 1979, The San Andres fault system through time: Geological Society of London Quaterly Journal, v. 136, p. 293-302.
- DELGADO-ARGOTE, L. A., A. Martín-Barajas, R. Mendoza-Borunda, y Frías-Camacho, V. M., 1990, Estudio de riesgo geológico-Informe técnico: estudio de protección al ambiente y a la C.T. Ensenada (Punta Cabras): Comunicaciones Académicas, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
- DIBBLEE, T. W., Jr., 1977, Strike-slip tectonics of the San Andres fault and its role in Cenozoic basin evolvment, *in* Nilsen, T. H., ed., Late Mesozoic and Cenozoic Sedimentation and Tectonics in California: Bakersfield, California, San Joaquin Geological Society, p. 26-28.
- DICKINSON, W. R., 1981, Plate tectonics and the continental margin of California, *in* Ernst, W. G., ed., The Geotectonic Development of California, Ruby Volume 1: Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall, Inc., p. 1-28.
- EMERSON, W. K., 1956, Pleistocene invertebrates from Punta China, Baja California, Mexico: American Museum of Natural History Bulletin, v. 111, p. 313-342.
- FOWLER, C. M. R., 1990, The Solid Earth-An Introduction to Global Geophysics: Cambridge, Cambridge University Press, 472 p.

- GASTIL, R. G., R. P. Phillips, and E. C. Allison, 1975, Reconnaissance geology of the State of Baja California: Geological Society of America Memoir 140, 170 p.
- GASTIL, R. G., G. J. Morgan, and D. Krummenacher, 1981, The tectonic history of peninsular California and adjacent Mexico, *in* Ernst, W. G., ed., *The Geotectonic Development of California*, Ruby Volume 1: Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall, Inc., p. 284-306.
- GEPHART, J. W., 1990, FMSI-A foltram program for inverting fault/slickenside and earthquake focal mechanism data to obtain the regional stress tensor: *Computers and Geosciences*, v. 16 (7), p. 953-989.
- GONZALEZ, J. J., and F. Suárez, 1984, Geological and seismic evidence of a new branch of the Agua Blanca fault: *Geophysical Research Letters*, v. 11 (1), p. 42-45.
- GROSHONG, R. H., Jr., 1988, Low-temperature deformation mechanisms and their interpretation: *Geological Society of America Bulletin*, v. 100, p. 1329-1360.
- HARDCASTLE, K. C., 1989, Possible paleostress tensor configuration derived from fault-slip data in eastern Vermont and western New Hampshire: *Tectonics*, v. 8 (2), p. 265-284.
- HARDCASTLE, K. C., and L. S. Hills, 1991, Brute and Select-Quickbasic 4 programs for determination of stress tensor configurations and separation of heterogeneous populations of fault-slip data: *Computers and Geosciences*, v. 17 (1), p. 23-43.
- HARDING, T. P., 1974, Petroleum tramps associated with wrench faults: *American Association of Petroleum Geologist Bulletin*, v. 58, p. 1290-1304.
- HATCH, M. E., and T. K. Rockwell, 1986, Neotectonics of Agua Blanca fault, Agua Blanca Valley, northern Baja California, Mexico [abs.]: *Geological Society of America Abstracts with programs*, Cordilleran Section meeting, Los Angeles, p. 114.

- JOHNSON, T. L., J. Madrid, and T. Koczyński, 1976, A study of microseismicity in northern Baja California, Mexico: *Seismological Society of America Bulletin*, v. 66, p. 1921-1929.
- KRAUSE, D. C., 1965, Tectonics, bathymetry, and geomagnetism of the southern continental borderland west of Baja California, Mexico: *Geological Society of America Bulletin*, v. 76, p. 617-650.
- LARSON, R. L., H. W. Menard, and S. M. Smith, 1968, Gulf of California- A result of ocean-floor spreading and transform faulting: *Science*, v. 161, p. 781-784.
- LEGG, M. R., and M. P. Kennedy, 1979, Faulting offshore San Diego and northern Baja California, *in* Abbott, P. L., and Elliot, W. S., eds., *Earthquakes and Other Perils, San Diego Region*: San Diego Association of Geologists, p. 24-46.
- LEGG, M. R., and V. Wong, 1982, Seismicity, faulting and tectonics of inner continental borderland offshore northern Baja California, Mexico [abs.]: *American Association of Petroleum Geologist Bulletin*, v. 66, p. 974.
- 1989, Geology and seismotectonics of the inner continental borderland of northern Baja California, Mexico, *in* Farreras, S. F., and Pararas-Carayannis, G., eds., *Natural and Man-Made Coastal Hazards*, p. 30-34.
- LEGG, M. R., V. Wong, and F. Suárez, 1987, Geologic structure and tectonics of the inner continental borderland of northern Baja California, Mexico [abs.]: *American Association of Petroleum Geologist Annual Convention*.
- LONSDALE, P., 1991, Structural patterns of the Pacific floor offshore of Peninsular California, *in* Dauphin, J. P., and Simoneit, B. R. T., eds., *The Gulf and Peninsular Province of the Californias*: *American Association of Petroleum Geologist Memoir* 47, p. 87-125.

- MAMMERICKX, J., and K. D. Klitgord, 1982, Northern East Pacific Rise; Evolution from 25 m.y. B.P. to present: *Journal of Geophysical Research*, v. 87, p. 6751-6759.
- McGARR, A., and N. C. Gay, 1978, State of stress in the earth's crust: *Annual Reviews of Earth Planetary Science*, v. 6, p. 405-436.
- McKENZIE, D. P., 1969, The relationship between fault plane solutions for earthquakes and the directions of the principal stresses: *Seismological Society of America Bulletin*, v. 59, p. 591-601.
- MENARD, H. W., Jr., 1960, The East Pacific Rise: *Science*, v. 132, p. 1737-1746.
- 1978, Fragmentation of the Farallon Plate by pivoting subduction: *Journal of Geology*, v. 86, p. 99-110.
- MOODY, J. D., and M. J. Hill, 1956, Wrench-fault tectonics: *Geological Society of America Bulletin*, v. 67, p. 1207-1246.
- MOORE, D. G., 1969, Reflection profiling studies of the California continental borderland: Structure and Quaternary turbidite basins: *Geological Society of America Special Paper 107*, 142 p.
- MORAN-ZENTENO, D. J., 1984, *Geología de la República Mexicana: 2da Edición*, México, D. F., Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, 88 p.
- NAKAMURA, K., and S. Uyeda, 1980, Stress gradient in arc-back arc regions and plate subduction: *Journal of Geophysical Research*, v. 85, p. 6419-6428.
- O'CONNOR, J. E., and C. G. Chase, 1989, Uplift of the Sierra San Pedro Martir, Baja California, Mexico: *Tectonics*, v. 8, no. 4, p. 833-844.

- ORME, A. R., 1974, Quaternary deformation of marine terraces between Ensenada and El Rosario, Baja California, Mexico, *in* Gastil R. G., and Lillegraven, J., eds., *Geology of Peninsular California: American Association of Petroleum Geologist Pacific Section, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, and Society of Economic Geologists*, p. 67-79.
- ORTEGA, R. M. A., 1988. Neotectónica de un sector de la Falla de Agua Blanca, Valle de Agua Blanca (Rancho La Cocina-Rancho Agua Blanca), Baja California, Mexico: Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, División de Ciencias de la Tierra, Ensenada, México, 146 p.
- PRICE, N. J., 1966, *Fault and Joint Development in Brittle and Semi-Brittle Rocks*: Oxford, Pergamon, 176 p.
- RAGAN, D. M., 1973, *Structural Geology -An Introduction to Geometrical Techniques*: 2nd edn., New York, Wiley, 208 p.
- RALEIGH, C. B., J. H. Healy, and J. D. Bredehoeft, 1972, Faulting and crustal stress at Rangely, Colorado, *in* Heard H. C., and others, eds., *Flow and Fracture of Rocks*: Washington, D. C., Geophys. Monogr. Ser., v. 16, p. 275-284.
- ROWLAND, S. M., 1986, *Structural Analysis and Synthesis -A Laboratory Course in Structural Geology*: Palo Alto, California, Blackwell Scientific Publications, 195 p.
- REBOLLAR, C. J., A. Reyes, and M. Reichle, 1982, Estudio del enjambre de San Quintín, Baja California, México, ocurrido durante 1975: *Geofísica Internacional*, v. 21, p. 331-358.
- RICHARDSON, R. M., S. C. Solomon, and N. H. Sleep, 1979, Tectonic stress in the plates: *Reviews of Geophysics and Space Physics*, v. 17, p. 981-1019.

- ROCKWELL, T.K., D. R. Muhs, G. L. Kennedy, M. E. Hatch, S. H. Wilson, R.E. Kingler, 1989, Uranium-series ages, faunal correlations and tectonics deformation of marine terraces within the Agua Blanca fault zone at Punta Banda, northern Baja California, Mexico, *in* Abbott, P. L., ed., *Geologic Studies in Baja California: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Pacific Section*, Los Angeles, California, p. 1-16.
- SANTILLAN, M., y T. Barrera, 1930, Las posibilidades petrolíferas en la costa occidental de Baja California, entre los paralelos 30 y 32 de latitud norte: *Anales del Instituto de Geología, México*, v. 5, p. 1-37.
- SIBSON, R. H., 1977, Fault rocks and fault mechanisms: *J. Geol. Soc. Lond.*, v. 133, p. 191-213.
- SPENCER, J. E., and W. R. Normark, 1979, Tosco-Abreojos fault zone-A Neogene transform plate boundary with in the Pacific margin of southern Baja California, Mexico: *Geology*, v. 7, p. 554-557.
- 1989, Neogene plate tectonic evolution of the Baja California Sur continental margin and the southern Gulf of California, Mexico, *in* Winterer, E. L., Hussong, D. M., and Decker, R. W., eds., *The Eastern Pacific Ocean and Hawaii: Boulder, Colorado, Geological Society of America, The Geology of North America*, v. N.
- SUAREZ-VIDAL, F., 1987, Las facies calcareas de la Formación Alisitos, evidencia de calma tectónica en el Cretácico temprano: *Ciencias Marinas*, v. 13 (3), p. 131-154.
- SUAREZ-VIDAL, F., R. Armijo, G. Morgan, P. Bodin, and R. G. Gastil, 1991, Framework of the recent and active faulting in northern Baja California, *in* Dauphin, J. P., and Simoneit, B. R. T., eds., *The Gulf and Peninsular Province of the Californias: American Association of Petroleum Geologists Memoir 47*, p. 285-300.

- SYKES, L. R., and M. Sbar, 1973, Intraplate earthquakes, lithospheric stress and driving mechanism of plate tectonics: *Nature*, v. 245, p. 298-302.
- SYLVESTER, A. G., 1984, Wrench fault tectonics-Introduction, *in* *Wrench Fault Tectonics*, American Association of Petroleum Geologists Reprint Series No.28, Arthur G. Sylvester, Compiler, p. V - IX.
- TCHALENKO, J. S., 1970, Similarities between shears zones of different magnitudes: *Geological Society of America Bulletin*, v. 81, p. 1625-1640.
- WILCOX, R. E., T.P. Harding, and D.R. Seely, 1973, Basic wrench tectonics: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 57, p. 74-96.
- ZOBACK, M. L., and M. Zoback, 1980, State of stress in the conterminous United States: *Journal of Geophysical Research*, v. 85, p. 6113-6156.
- ZOBACK, M. L., R. E. Anderson, and G. A. Thompson, 1981, Cainozoic evolution of the state of stress and style of tectonism of the Basin and Range province of the western United States: *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, A300, p. 407-434.

# **APENDICE ESTRUCTURAL**

## SIMBOLOGIA



Angulo de las estrías en el plano de falla con respecto a la horizontal y el movimiento relativo de bloques en fallas normales e inversas. La parte sombreada representa al bloque que baja.



Angulo de las estrías en el plano de falla con respecto a la horizontal en fallas de desplazamiento lateral.



Angulo del movimiento relativo inferido en fallas de desplazamiento lateral.



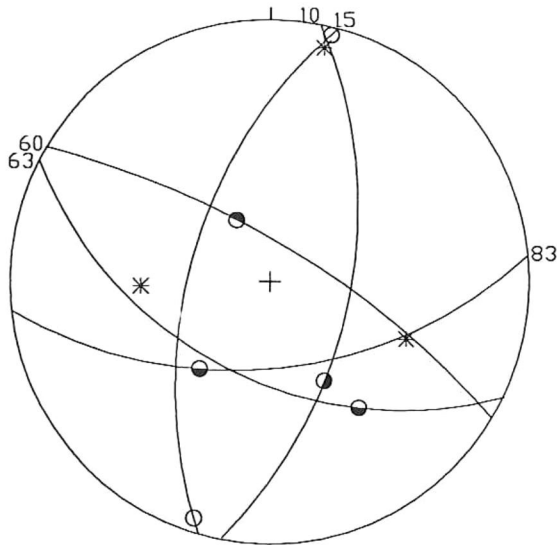
Angulo del movimiento relativo inferido en fallas normales e inversas, indicando el bloque que baja en negro.



Inclinación / orientación de los esfuerzos principales ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$ ).



Inclinación / orientación de los esfuerzos principales ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$ ).



## SITIO 56.

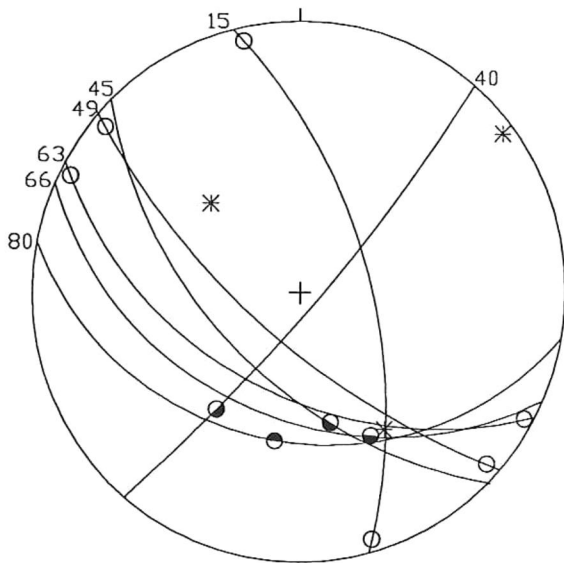
Estructuras conjugadas con orientación hacia N83E/63S y N60W/79N, se resuelven según elipse de esfuerzos:

$$\sigma_1=49/N88W$$

$$\sigma_2=41/S70E$$

$$\sigma_3=08/N12E$$

Este tensor me resuelve el fallamiento normal hacia N63W/60S.



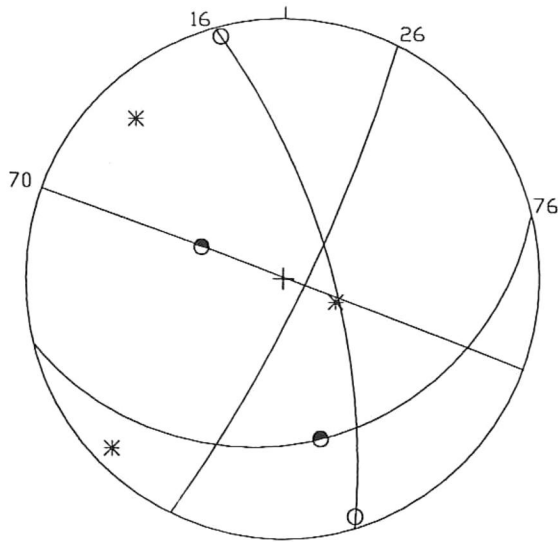
## SITIO 57.

El  $\sigma_1$  en la vertical (según las estructuras conjugadas con orientación N49W/75SW y N15W/69NE) resuelve el fallamiento normal en el sitio. El fallamiento lateral se soluciona mediante permutación entre los esfuerzos principales  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$ , permaneciendo el  $\sigma_3$  invariante.

$$\sigma_1=50/N44W$$

$$\sigma_2=41/S34E$$

$$\sigma_3=04/N52E$$



## SITIO 64.

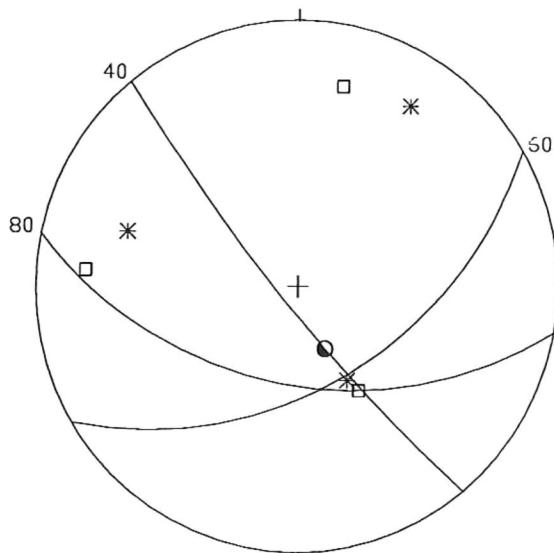
Estructuras conjugadas de desplazamiento lateral con orientación N70W/89E y N16W/75E, se originan según elipse de esfuerzos:

$$\sigma_1=15/N42W$$

$$\sigma_2=72/S74E$$

$$\sigma_3=09/S49W,$$

resolviendo parcialmente el fallamiento inverso hacia N76E/37S/092.



## SITIO 65.

En este sitio, dos elipses de esfuerzos me solucionan las estructuras laterales presentes:

$$\sigma_1=32/N71W$$

$$\sigma_2=52/S32E$$

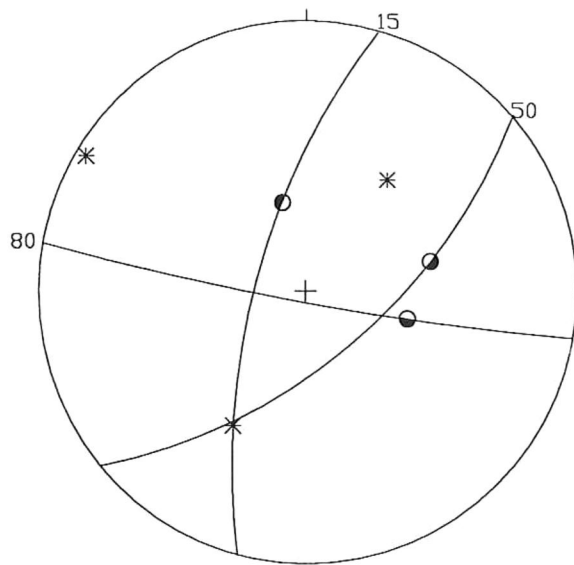
$$\sigma_3=19/N32E$$

Segunda solución:

$$\sigma_1=20/N86W$$

$$\sigma_2=58/S30E$$

$$\sigma_3=24/N13E$$



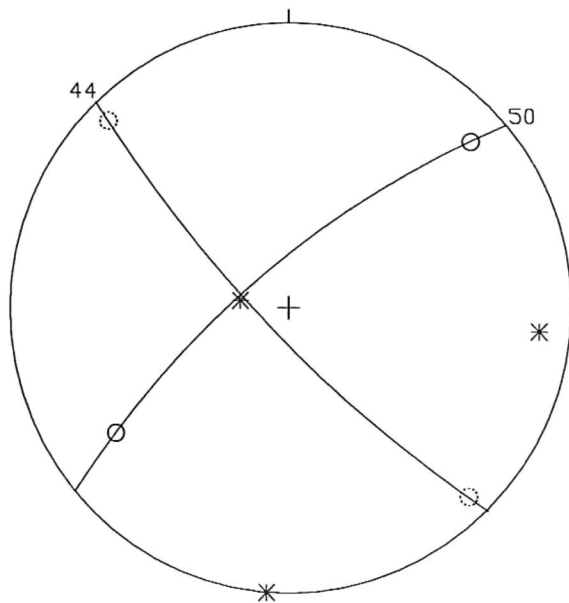
## SITIO 58.

Las estructuras hacia N50E/70S y N15E/75N me resuelven sistema conjugado de fallamiento normal, representado por el tensor:

$$\sigma_1=46/N35E$$

$$\sigma_2=43/S30E$$

$$\sigma_3=04/N58W$$



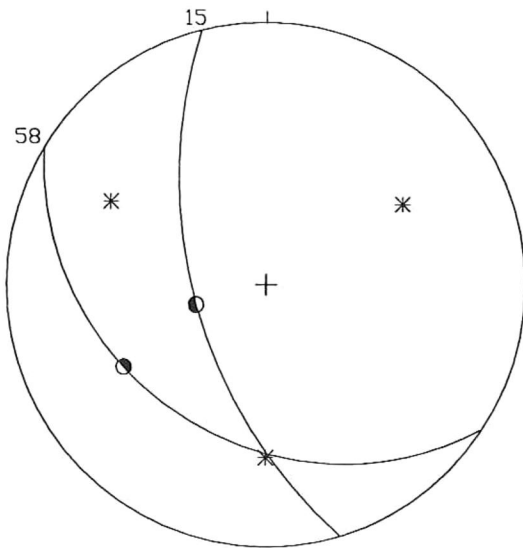
## SITIO 59.

Unica solución probable con estructuras hacia N50E/79NW y N44W/83SW, solucionando sistema de desplazamiento lateral, según la elipse de esfuerzos obtenida:

$$\sigma_1=12/S86E$$

$$\sigma_2=78/N76W$$

$$\sigma_3=02/S04W$$



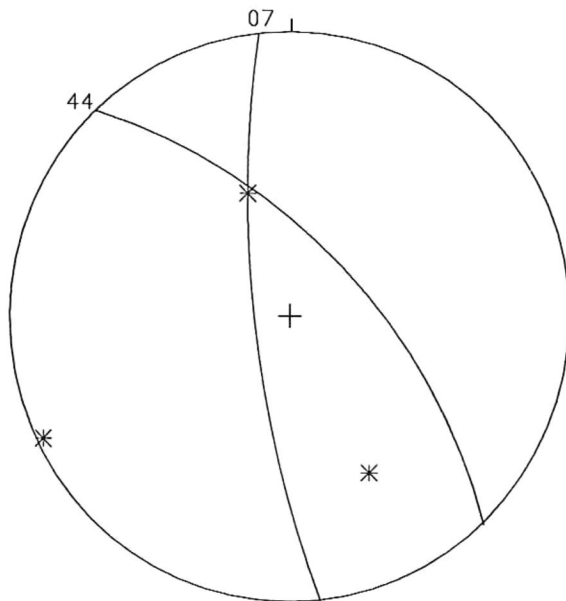
SITIO 60.

Par de conjugadas con orientación N15W/68W y N58W/40S, resuelve el sistema inverso mediante la elipse de esfuerzos:

$$\sigma_1=32/N61W$$

$$\sigma_2=36/S02W$$

$$\sigma_3=38/N58E$$



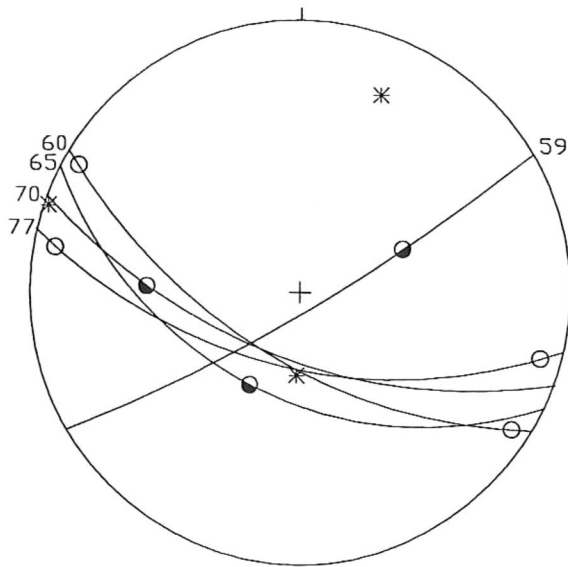
SITIO 61.

Única solución probable, según estructuras conjugadas orientadas hacia N07W/80W y N44W/70NE, resolviendo sistema de desplazamiento lateral, según elipse de esfuerzos:

$$\sigma_1=40/S29E$$

$$\sigma_2=50/N19W$$

$$\sigma_3=05/S65W$$



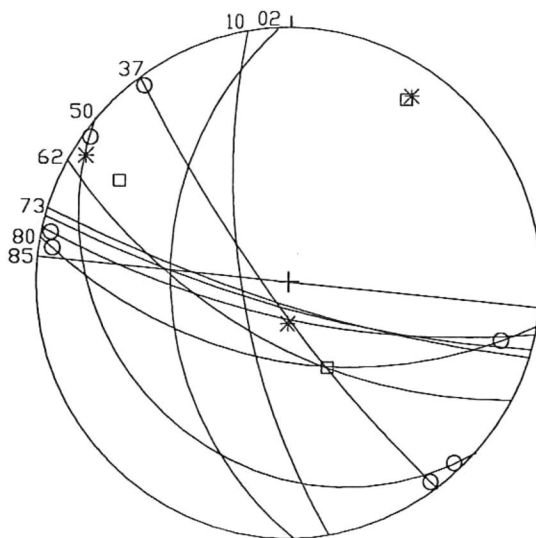
## SITIO 03.

Selección de dos estructuras conjugadas de ángulo dihedral muy pequeño (N77W y N60W). Estas estructuras nos resuelven un sistema de desplazamiento lateral, en donde se da una permutación de los esfuerzos principales  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$ , permaneciendo invariante  $\sigma_3$ . Lo anterior explica las estructuras de rumbo y las estructuras normales hacia el NW. La elipse de esfuerzos que define al par conjugado es:

$$\sigma_1=03/N70W$$

$$\sigma_2=70/S16W$$

$$\sigma_3=20/N22E$$



## SITIO 04.

Solución de dos sistemas de fallamiento utilizando N37W/83S/000 como referencia. Con respecto a N79W/79S/174 se obtiene:

$$\sigma_1=06/N58W$$

$$\sigma_2=78/S02W$$

$$\sigma_3=10/N33E$$

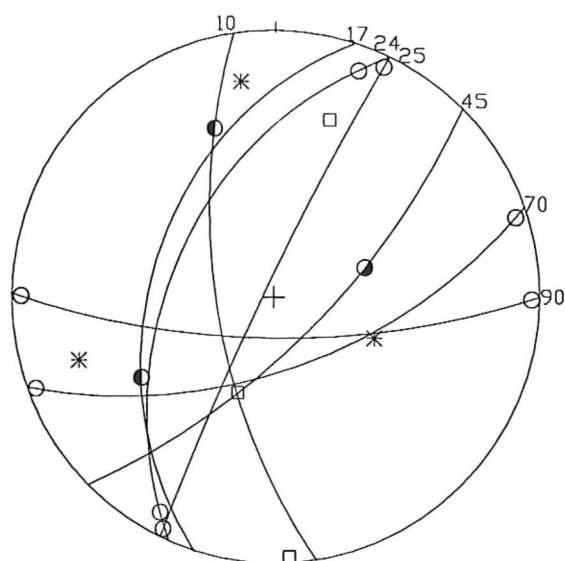
Con respecto a N80W/65S/158, resulta:

$$\sigma_1=23/N60W$$

$$\sigma_2=62/S26E$$

$$\sigma_3=16/N33E$$

La orientación del  $\sigma_1$  en ambas soluciones muestra paralelismo con respecto a las fallas normales hacia el NW.



## SITIO 05.

Se obtuvieron dos posibles soluciones en este sitio. La primera, de acuerdo a las estructuras de desplazamiento lateral, con orientación N70E/68S/000 y E-W/77S/000 :

$$\sigma_1=24/S73W$$

$$\sigma_2=61/S67E$$

$$\sigma_3=16/N09W$$

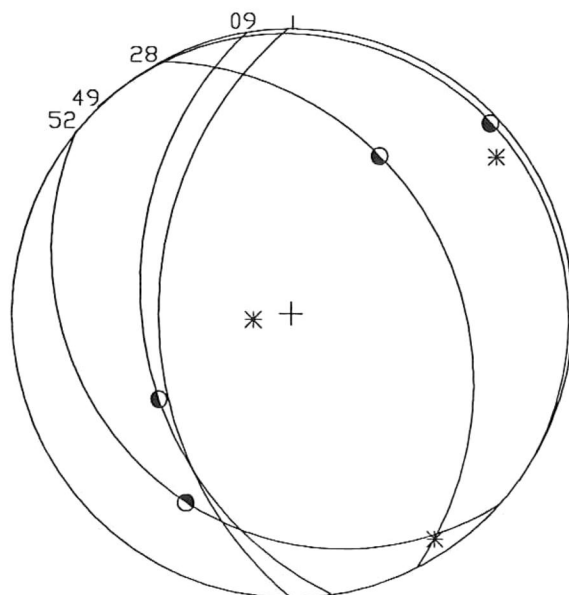
La segunda, tomando el par conjugado hacia N10W y N45E:

$$\sigma_1=31/N17E$$

$$\sigma_2=59/S22W$$

$$\sigma_3=02/S04E$$

Esta elipse de esfuerzos, resuelve las estructuras de extensión con orientación NE. El  $\sigma_3$  permanece invariante hacia el NW, sobre la horizontal.



## SITIO 07.

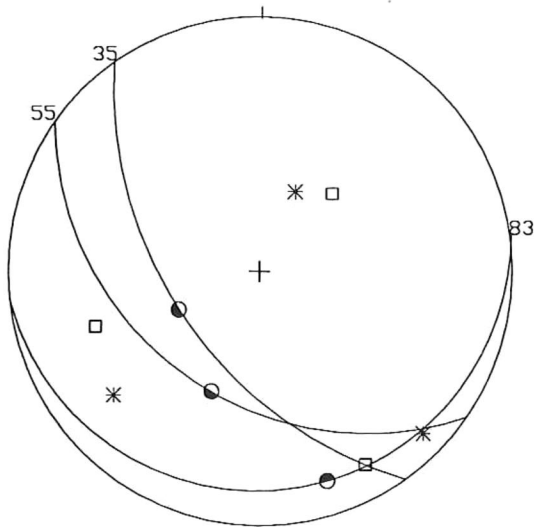
Fallas inversas en N28W/42NE y N49W/26S, definen sistema compresional con  $\sigma_3$  cerca de la vertical, según:

$$\sigma_1=08/N52E$$

$$\sigma_2=06/S37E$$

$$\sigma_3=79/N90W,$$

resolviendo las estructuras inversas con orientación NW (N28-52W).



## SITIO 08.

Las estructuras con orientación N55W y N83E, resuelven sistema conjugado inverso, según:

$$\sigma_1=27/S50W$$

$$\sigma_2=11/S44E$$

$$\sigma_3=60/N22E.$$

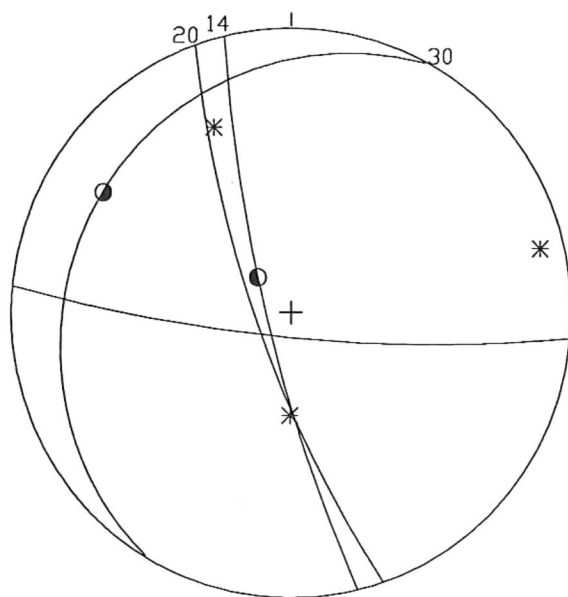
Una segunda solución la genera la elipse de esfuerzos definida por:

$$\sigma_1=32/S71W$$

$$\sigma_2=13/S28E$$

$$\sigma_3=55/N42E,$$

según el par conjugado orientado hacia N83E y N35W.



## SITIO 09.

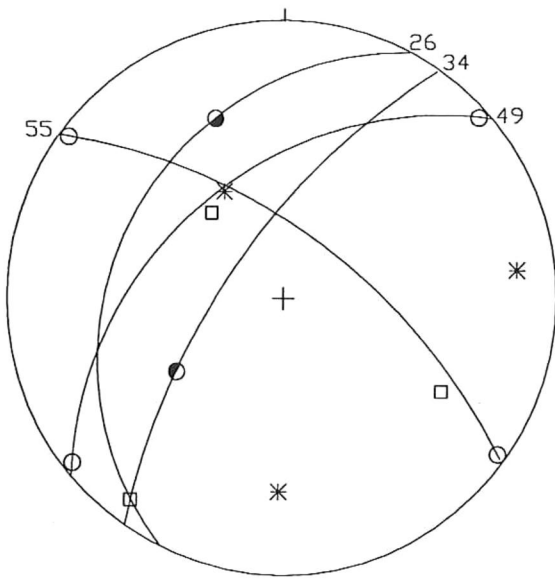
El par conjugado en N14W y N20W, resuelve sistema de rumbo, según lo define la elipse de esfuerzos:

$$\sigma_1=29/N22W$$

$$\sigma_2=61/S02E$$

$$\sigma_3=08/N74E.$$

El fallamiento inverso en N30E/23W, es congruente con la orientación del vector de máxima compresión ( $\sigma_1$ ).



## SITIO 30.

Utilizando los planos de falla con orientación N49E y N55W, se obtiene la elipse de esfuerzos:

$$\sigma_1=32/S01E$$

$$\sigma_2=55/N29W$$

$$\sigma_3=14/N81E.$$

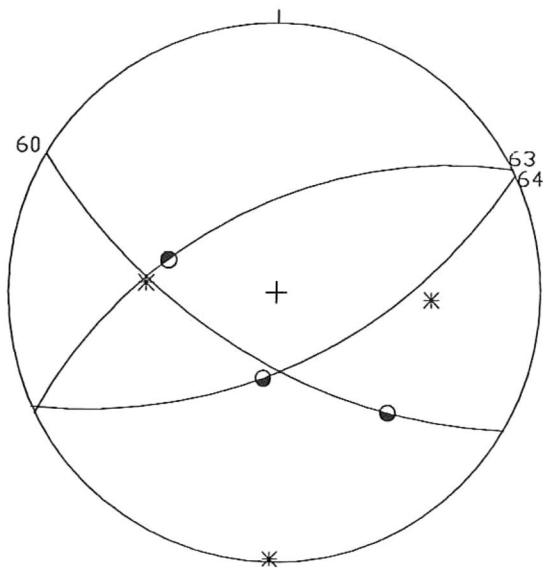
Este sistema resuelve parcialmente el fallamiento inverso hacia N26E.

La segunda solución probable, se obtiene tomando el par conjugado N26E y N34E, generando el tensor siguiente:

$$\sigma_1=56/N42W$$

$$\sigma_2=08/S36W$$

$$\sigma_3=33/S60E.$$



## SITIO 31.

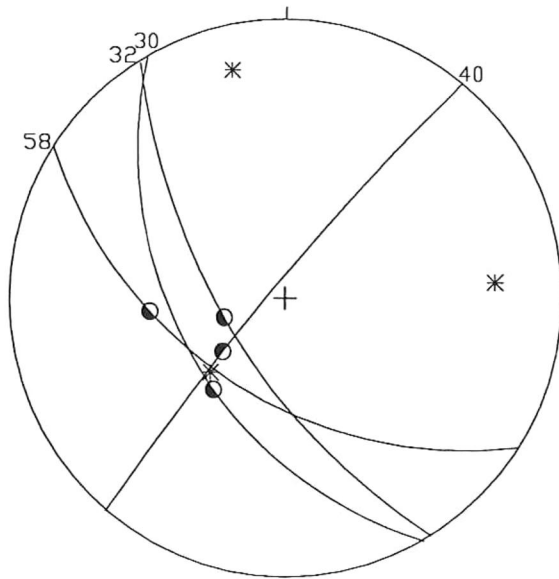
El par conjugado en N63E y N60W, resuelve sistema lateral de fallamiento, según la elipse de esfuerzos siguiente:

$$\sigma_1=40/S90E$$

$$\sigma_2=50/N85W$$

$$\sigma_3=03/N-S$$

El vector de máxima compresión resuelve el fallamiento normal hacia N64E/68S, mediante permutación entre  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$ .



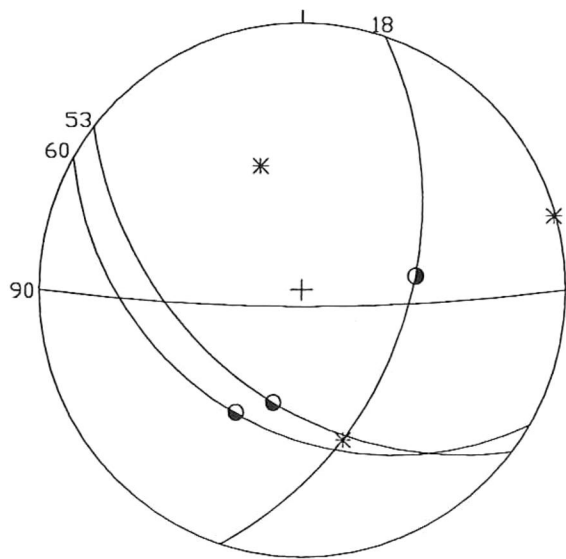
SITIO 32.

Utilizando N58W/61S y N40E/86W, se obtiene:

$$\sigma_1=24/N84E$$

$$\sigma_2=60/S47W$$

$$\sigma_3=15/N13W$$



SITIO 39.

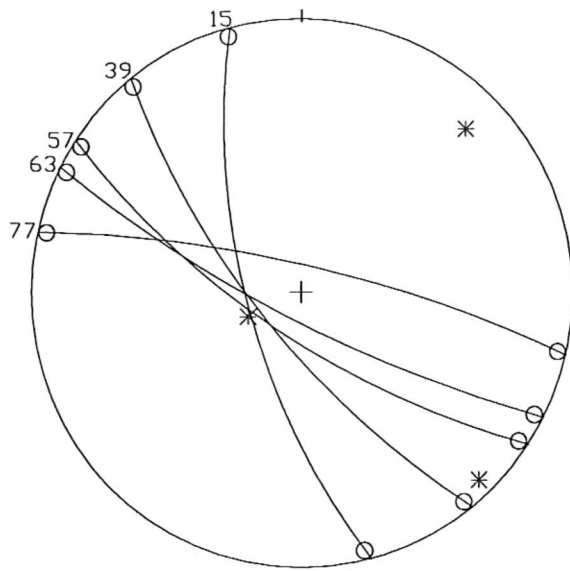
Las estructuras normales con orientación N18E y N53W, se resuelven de acuerdo al tensor de esfuerzos siguiente:

$$\sigma_1=49/N18W$$

$$\sigma_2=42/S18E$$

$$\sigma_3=00/N73E.$$

Todas las estructuras de extensión (excepto el plano E-W) se resuelven de acuerdo al esfuerzo principal de máxima compresión resultante.



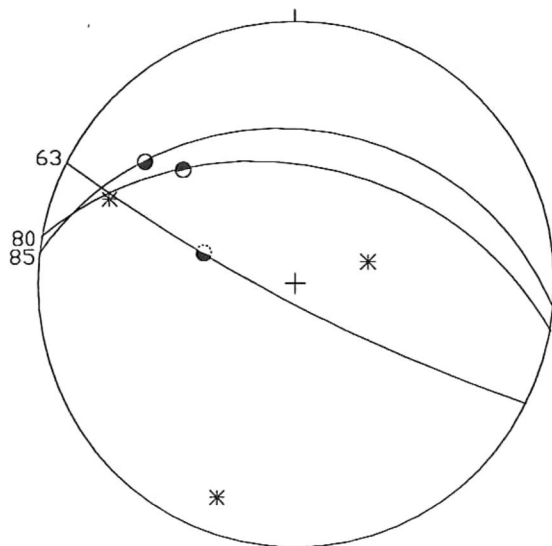
## SITIO 41.

El par de estructuras conjugadas con orientación N77W/82N/160 y N15W/74W/173, resuelven el fallamiento hacia el NW que se observa en el sitio, según el tensor siguiente:

$$\sigma_1=08/S45E$$

$$\sigma_2=73/S75W$$

$$\sigma_3=14/N44E$$



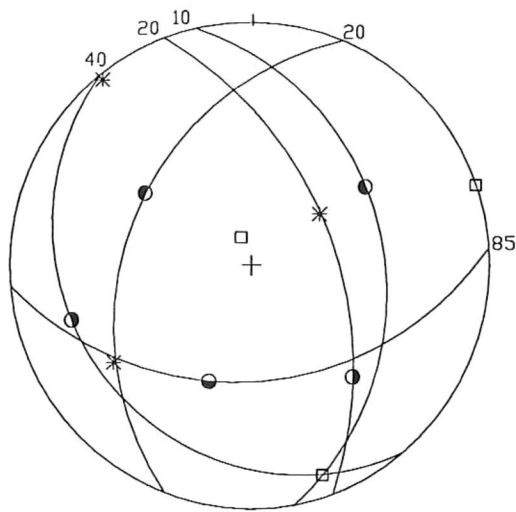
## SITIO 42.

Las estructuras en el sitio, se resuelven con base en el tensor de esfuerzos que se obtiene a partir de las fallas con orientación N63W y N80W:

$$\sigma_1=65/N70E$$

$$\sigma_2=19/N65W$$

$$\sigma_3=16/S20W.$$



## SITIO 45.

A partir de los planos conjugados en N20E/47W y N85E/50SE, se obtiene un sistema normal de fallamiento, definido por la elipse de esfuerzos siguiente:

$$\sigma_1=59/\text{N}51\text{E}$$

$$\sigma_2=31/\text{S}53\text{W}$$

$$\sigma_3=00/\text{N}38\text{W}.$$

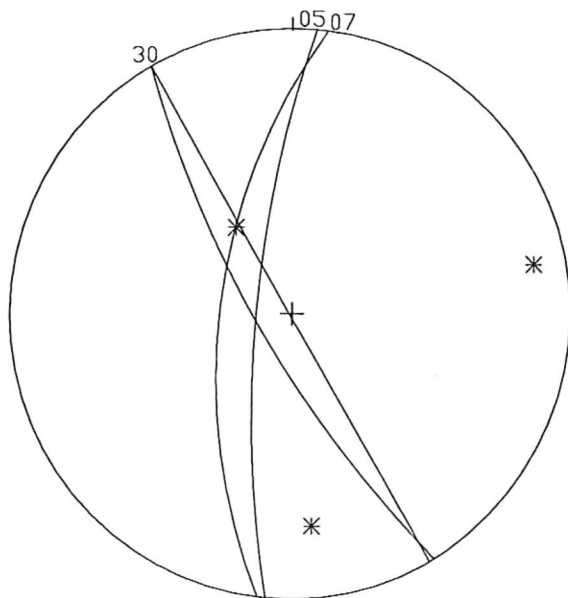
Una segunda solución, se obtiene a partir de las estructuras inversas, con orientación N10W/44N y N40W/25W. El tensor de esfuerzos definido por estas estructuras, es el siguiente:

$$\sigma_1=00/\text{N}70\text{E}$$

$$\sigma_2=10/\text{S}20\text{E}$$

$$\sigma_3=80/\text{N}18\text{W}.$$

En ambas soluciones, la orientación del esfuerzo principal ( $\sigma_1$ ), es congruente con el fallamiento inverso en N10-40W.



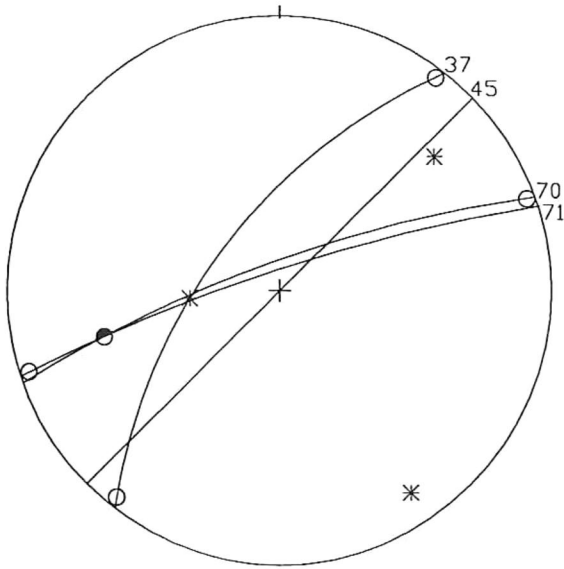
## SITIO 46.

Solución en N30W y N07E:

$$\sigma_1=28/\text{S}06\text{E}$$

$$\sigma_2=60/\text{N}32\text{W}$$

$$\sigma_3=11/\text{N}78\text{E}.$$



## SITIO 47.

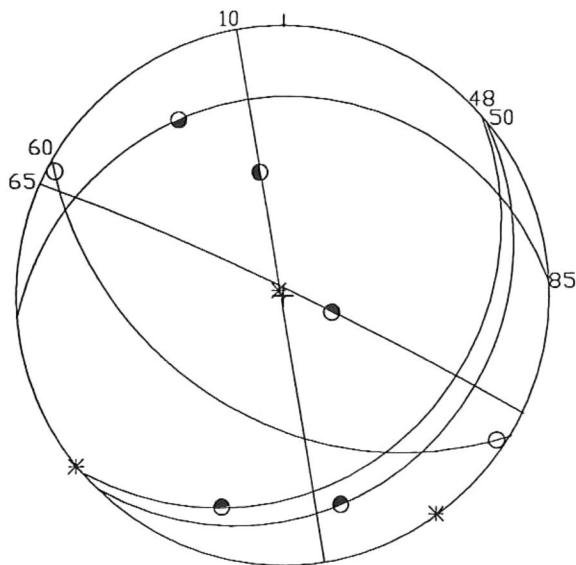
Las estructuras con orientación N37E y N70E, corresponden al par conjugado, definido por la elipse de esfuerzos:

$$\sigma_1=24/N48E$$

$$\sigma_2=62/S85W$$

$$\sigma_3=14/S35E.$$

El campo de esfuerzos tensional representado por esta elipse, resuelve tanto las estructuras de rumbo como el fallamiento normal hacia N71E y N45E, mediante permutación de los esfuerzos principales  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$ .



## SITIO 48.

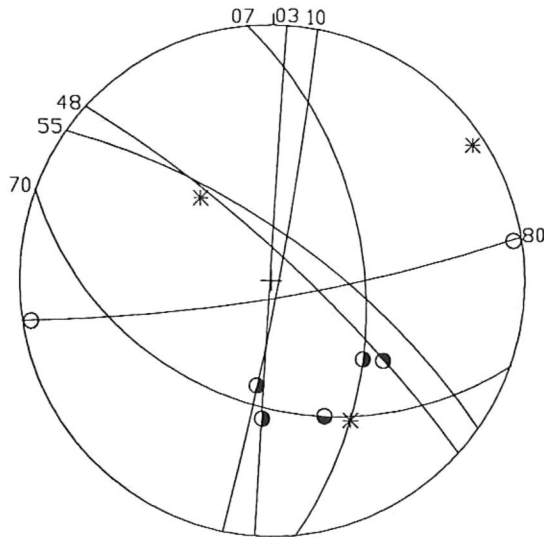
El par conjugado con orientación N10W/90 y N65W/87N, se define por el tensor de esfuerzos:

$$\sigma_1=03/S37E$$

$$\sigma_2=87/N28W$$

$$\sigma_3=01/S52W.$$

Las magnitudes relativas de los esfuerzos principales en el tensor ( $\sigma_1 > \sigma_2 \approx \sigma_3$ ), explican el fallamiento inverso con orientación N48-50E y N85E.



## SITIO 49.

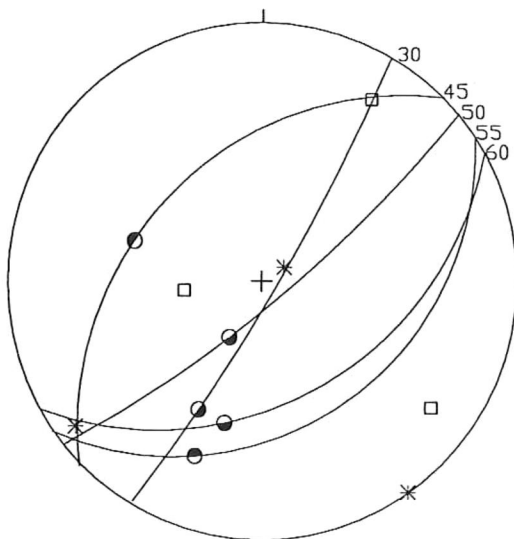
Se utiliza el par hacia N07W y N70W, obteniéndose la elipse de esfuerzos que explica tanto el fallamiento normal como el fallamiento de rumbo:

$$\sigma_1=54/N40W$$

$$\sigma_2=36/S32E$$

$$\sigma_3=04/N55E.$$

En este tensor de esfuerzos, el  $\sigma_3$  permanece invariante hacia el NE.



## SITIO 10.

El sistema de fallas hacia el NE, se resuelve a partir de dos elipses de esfuerzo probables. La primera, se obtiene tomando en consideración los planos N45E/50NW y N60E/52SE:

$$\sigma_1=80/N50E$$

$$\sigma_2=09/S46W$$

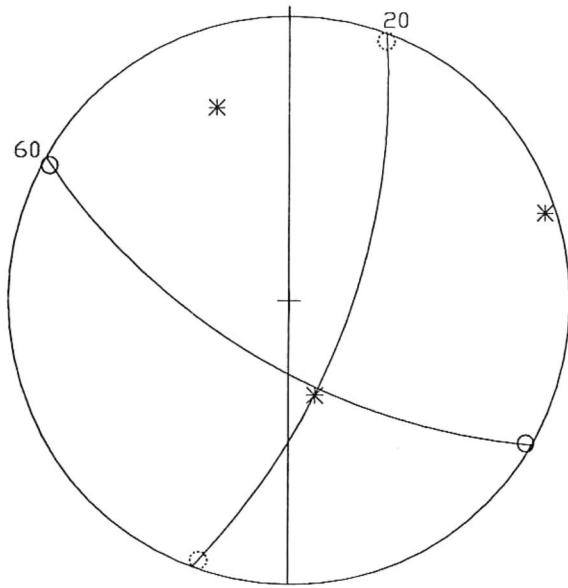
$$\sigma_3=01/S36E.$$

La segunda, considerando los planos N45E/50NW y N30E/85S:

$$\sigma_1=65/S82W$$

$$\sigma_2=16/N32E$$

$$\sigma_3=19/S54E.$$



## SITIO 12.

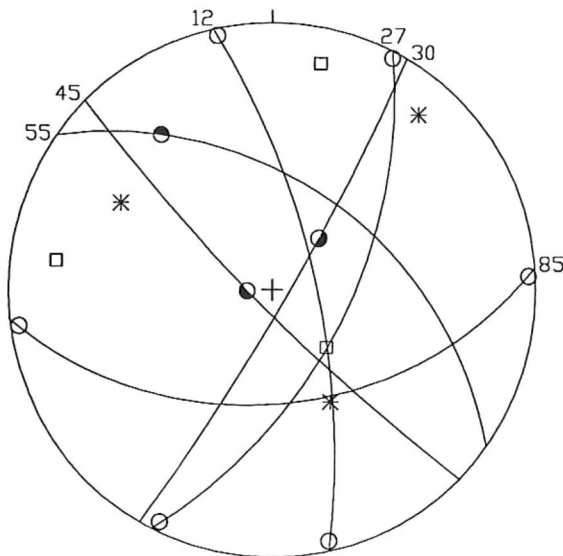
Los planos con orientación N60W/71S y N20E/73, se definen según el tensor de esfuerzos:

$$\sigma_1=27/N20W$$

$$\sigma_2=63/S17E$$

$$\sigma_3=02/N70E$$

La estructura normal con orientación N-S, es congruente con el sistema obtenido.



## SITIO 13.

Las estructuras conjugadas con orientación N12W/77E/013 y N85E/55S/165, se resuelven en sistema lateral de fallamiento, según la elipse de esfuerzos:

$$\sigma_1=34/N59W$$

$$\sigma_2=54/S30E$$

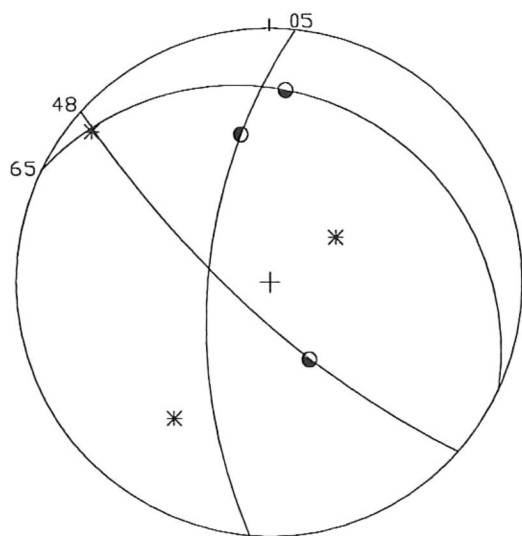
$\sigma_3=14/N40E$ . El fallamiento normal orientado hacia N45-55W, se justifica de acuerdo a este tensor.

El segundo sistema de esfuerzos que soluciona el fallamiento normal con orientación N30E, lo definen los planos N12W/77E/013 y N27E/67E/160:

$$\sigma_1=14/N12E$$

$$\sigma_2=66/S43E$$

$$\sigma_3=18/N82W.$$



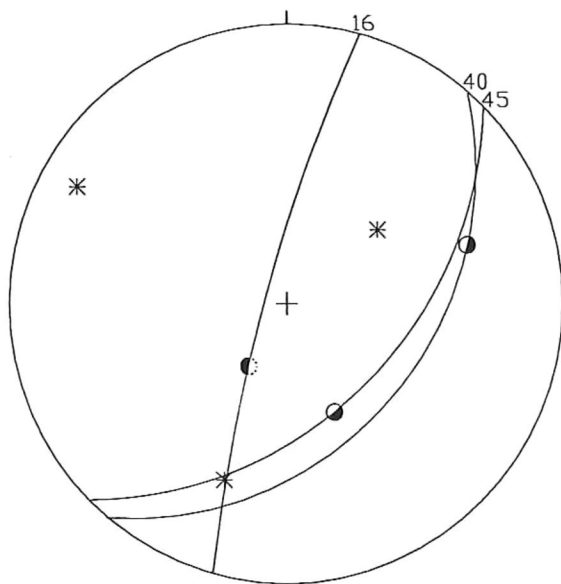
## SITIO 14.

Selección de los planos orientados hacia el N48W y N65W:

$$\sigma_1=62/N53E$$

$$\sigma_2=08/N49W$$

$$\sigma_3=37/S36W.$$



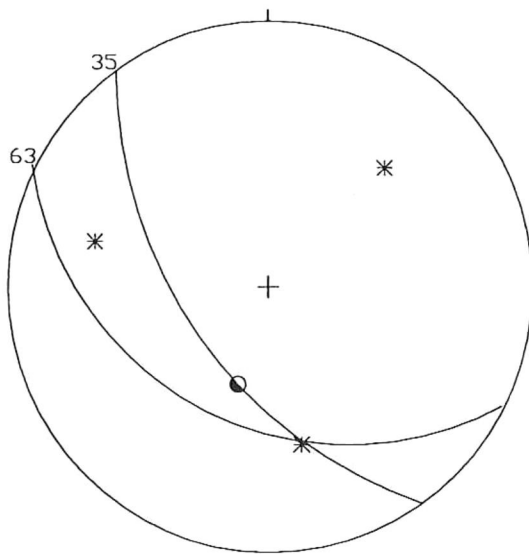
## SITIO 15.

Los planos con orientación N16E/83W y N45E/57SE, nos resuelven sistema de fallamiento normal, definido por el tensor de esfuerzos:

$$\sigma_1=54/N49E$$

$$\sigma_2=32/S20W$$

$$\sigma_3=15/N60W.$$



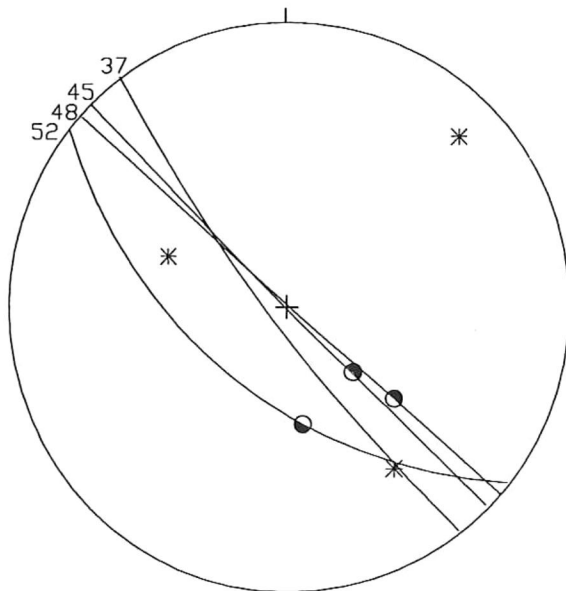
SITIO 16.

El par de estructuras con orientación N63W/46S  
y N35W/64S, define tensor de esfuerzos:

$$\sigma_1=32/N74W$$

$$\sigma_2=39/S12E$$

$$\sigma_3=36/N43E.$$



SITIO 17.

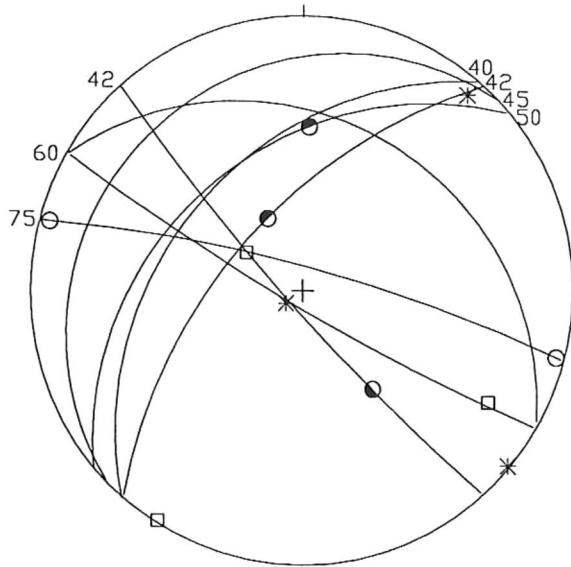
El par conjugado con orientación N37W y N52W,  
resuelve el tensor de esfuerzos siguiente:

$$\sigma_1=52/N66W$$

$$\sigma_2=34/S34E$$

$$\sigma_3=16/N45E.$$

Esta elipse de esfuerzos da solución a las cuatro  
estructuras normales en el sitio.



## SITIO 18.

De dos fallas de ángulo alto y estrías subverticales, pero de solución en sistema lateral, se obtiene de N42W y N60W:

$$\sigma_1=01/S51E$$

$$\sigma_2=85/S39W$$

$$\sigma_3=05/N40E.$$

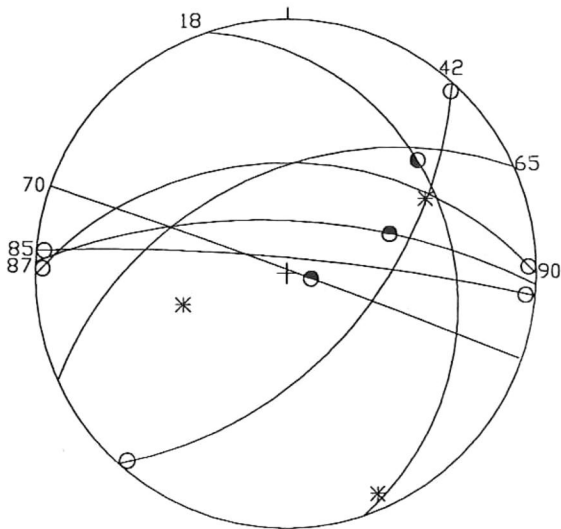
La segunda solución que resuelve el fallamiento en el sitio, está dada por los planos N42W y N75W, definiéndolos la elipse de esfuerzos:

$$\sigma_1=21/S59E$$

$$\sigma_2=69/N52W$$

$$\sigma_3=01/S32W.$$

La orientación del vector de máxima compresión ( $\sigma_1$ ) es congruente, en ambos casos, con la orientación de las estructuras inversas hacia N45E/21N y N60W/38N. Las estructuras normales con orientación NE, quedan sin solución.



## SITIO 19.

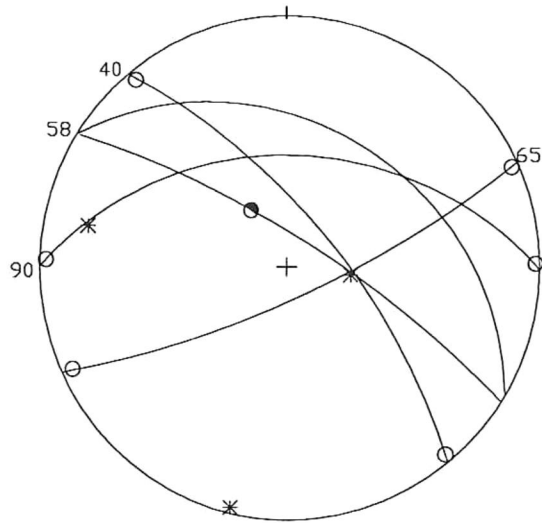
El par conjugado con orientación N42E/63SE y E-W/55, se resuelve en sistema normal de fallamiento, definido por el tensor de esfuerzos:

$$\sigma_1=55/S76W$$

$$\sigma_2=34/N62E$$

$$\sigma_3=08/S24E.$$

La orientación del  $\sigma_1$  es congruente con la orientación de la estructura inversa hacia N18W/35N, y con los rasgos normales hacia el WNW y ENE.



## SITIO 21.

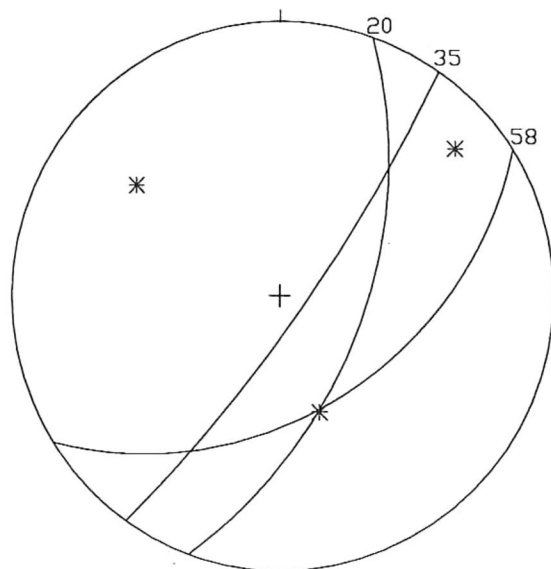
Los planos con orientación N40W/75NE/008 y N65E/80S/165, resuelven sistema de desplazamiento lateral, definido por el tensor:

$$\sigma_1=18/N76W$$

$$\sigma_2=70/S87E$$

$$\sigma_3=04/S13W.$$

La orientación de las estructuras normales (N58W/81N/085), se correlaciona de manera favorable con el  $\sigma_1$  obtenido.



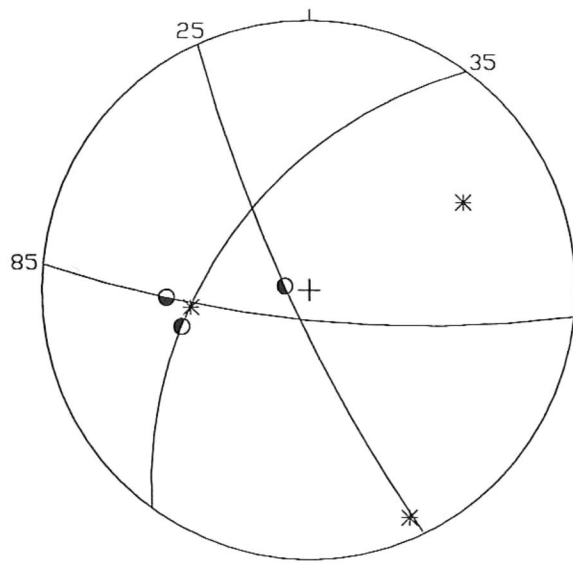
## SITIO 50.

Se selecciona el par conjugado con orientación N20E y N58E, resolviendo en sistema lateral:

$$\sigma_1=16/N49E$$

$$\sigma_2=53/S18E$$

$$\sigma_3=32/N52W.$$



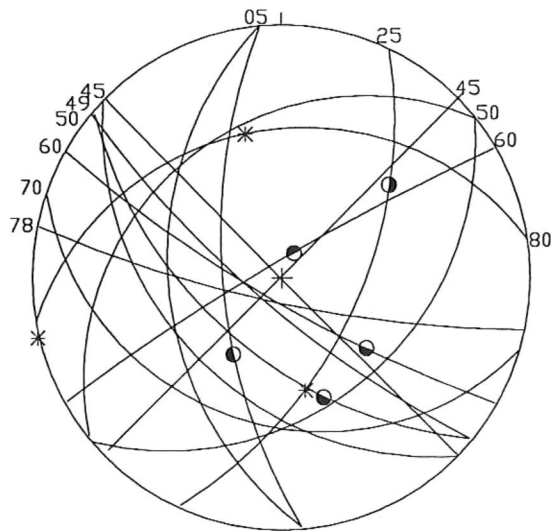
## SITIO 51.

Selección de planos con orientación N35E y N85W, generando un sistema lateral, definido por la elipse:

$$\sigma_1=33/N59E$$

$$\sigma_2=55/S83W$$

$$\sigma_3=10/S24E.$$



## SITIO 52.

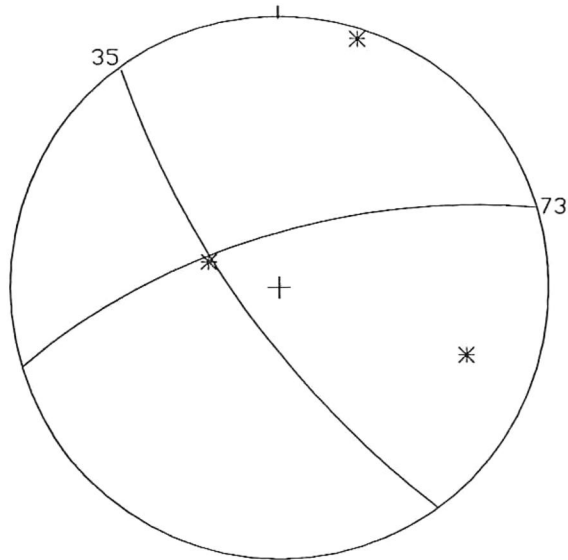
El par conjugado con orientación N25E/65E y N49W/66W, resuelve un sistema de desplazamiento lateral, definido por la elipse de esfuerzos:

$$\sigma_1=39/N14W$$

$$\sigma_2=51/S15W$$

$$\sigma_3=01/S77W.$$

La orientación del vector de máxima compresión ( $\sigma_1$ ), es congruente con la orientación tanto de las estructuras inversas (N50E, N80E, N70W), normales (N05W) como laterales (N45-49W y N42-60E).



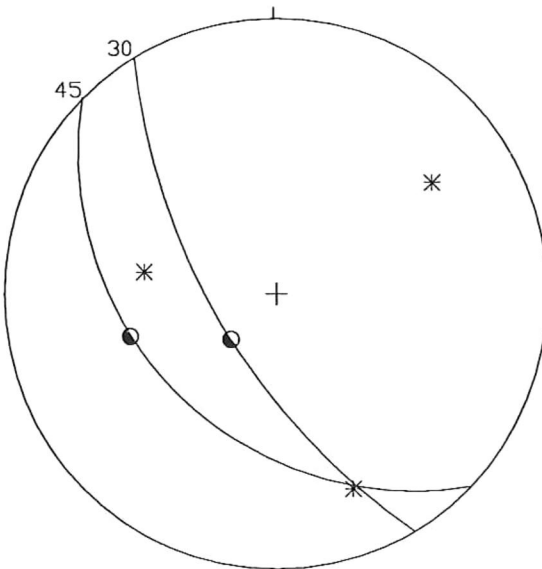
SITIO 53.

La única solución probable en el sitio, está dada por los planos N35W y N73E:

$$\sigma_1=27/S71E$$

$$\sigma_2=64/N78W$$

$$\sigma_3=02/N18E.$$



SITIO 54.

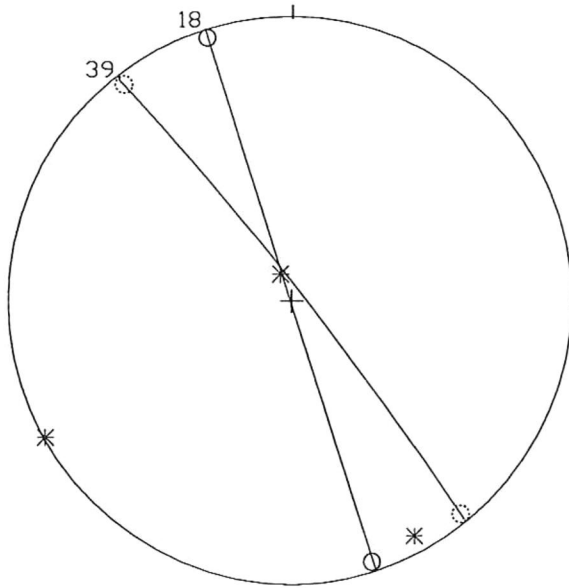
Se obtiene una elipse de esfuerzos definida por los planos N45W y N30W:

$$\sigma_1=50/N78W$$

$$\sigma_2=25/S21E$$

$$\sigma_3=30/N54E.$$

El tensor anterior, resuelve el sistema de fallamiento normal en el sitio.



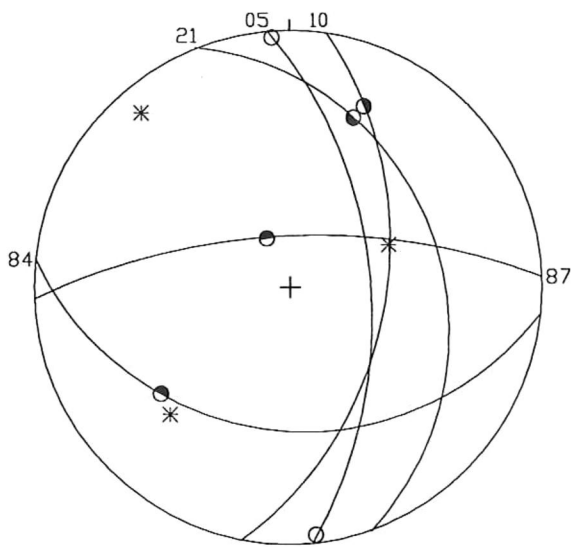
## SITIO 55.

La única solución probable en el sitio, está dada por los planos con orientación N18W y N39W:

$$\sigma_1=08/S29E$$

$$\sigma_2=82/N19W$$

$$\sigma_3=02/S61W.$$



## SITIO 67.

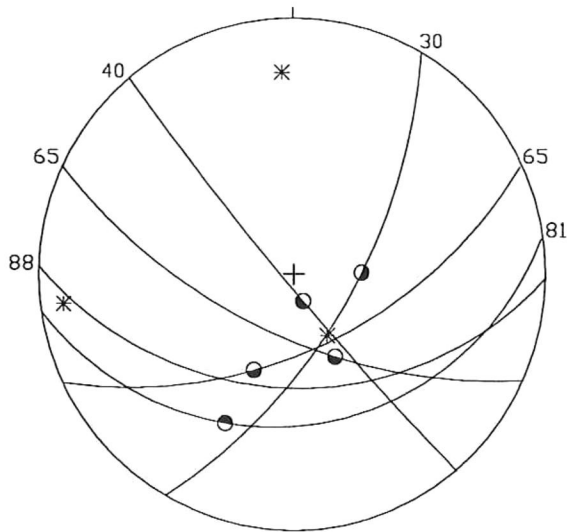
El par conjugado con orientación N87E y N10E, resuelve fallamiento de tipo lateral, definiéndonos el tensor de esfuerzos siguiente:

$$\sigma_1=34/S44W$$

$$\sigma_2=54/N64E$$

$$\sigma_3=10/N40W.$$

La orientación del  $\sigma_1$ , es congruente con la orientación que presentan las estructuras inversas: N84W/44W y N21W/40NE. Estas estructuras obedecen a permutaciones entre los esfuerzos principales  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$ , permaneciendo invariante sobre la horizontal el vector de máxima compresión ( $\sigma_1$ ).



## SITIO 68.

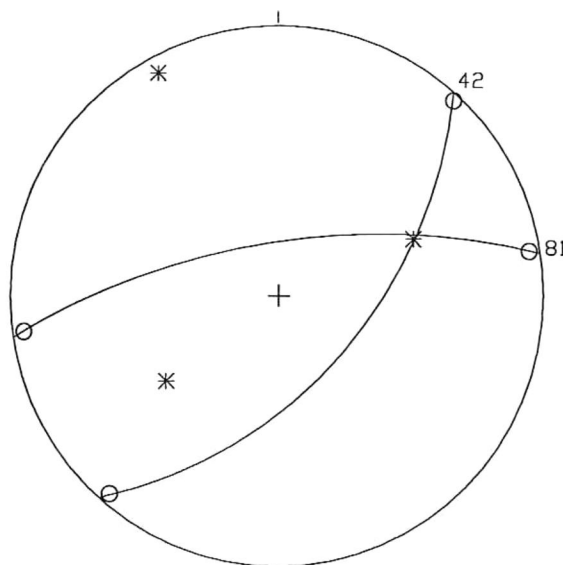
Se seleccionan como par conjugado las estructuras con orientación N40W/87S/087 y N30E/71E/080, resolviéndose en un sistema de desplazamiento lateral, según el tensor de esfuerzos siguiente:

$$\sigma_1 = 20 / \text{N}03\text{W}$$

$$\sigma_2 = 68 / \text{S}32\text{E}$$

$$\sigma_3 = 10 / \text{S}83\text{W}.$$

Las fallas inversas en N81E y N88W, son congruentes con la orientación del esfuerzo principal de máxima compresión, el cual permanece invariante sobre la horizontal.



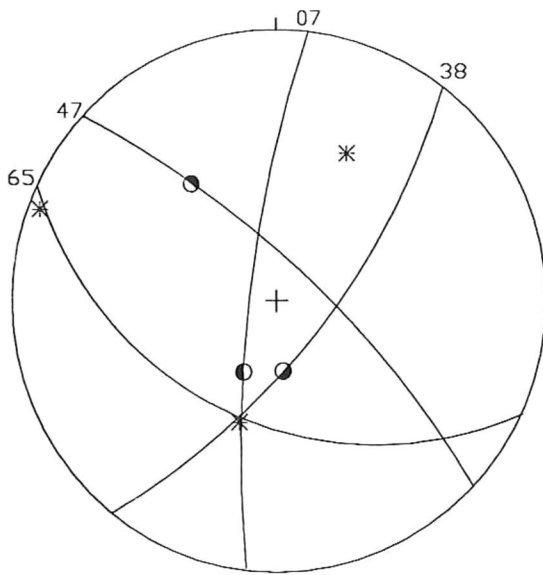
## SITIO 69.

La única solución probable, es generada por las estructuras con orientación N81E/75N/171 y N42E/64E/165:

$$\sigma_1 = 48 / \text{S}55\text{W}$$

$$\sigma_2 = 41 / \text{N}68\text{E}$$

$$\sigma_3 = 06 / \text{N}28\text{W}.$$



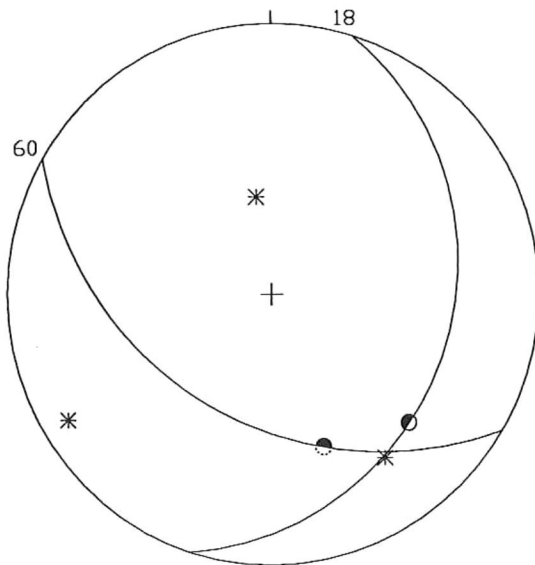
## SITIO 70.

Las estructuras con orientación N07E/82W y N38E/75SE, resuelven sistema de desplazamiento lateral. La estructura inversa (?) con orientación N65W/53S, es congruente con la orientación del vector de máxima compresión, en el tensor obtenido:

$$\sigma_1=38/N25E$$

$$\sigma_2=52/S17W$$

$$\sigma_3=04/N69W.$$



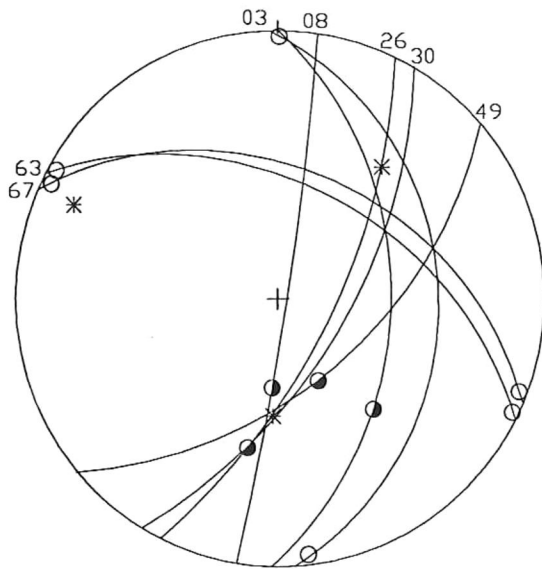
## SITIO 71.

La única solución probable en el sitio, es generada por las estructuras con orientación N18E/33E y N60W/52S:

$$\sigma_1=12/S60W$$

$$\sigma_2=27/S37E$$

$$\sigma_3=59/N08W.$$



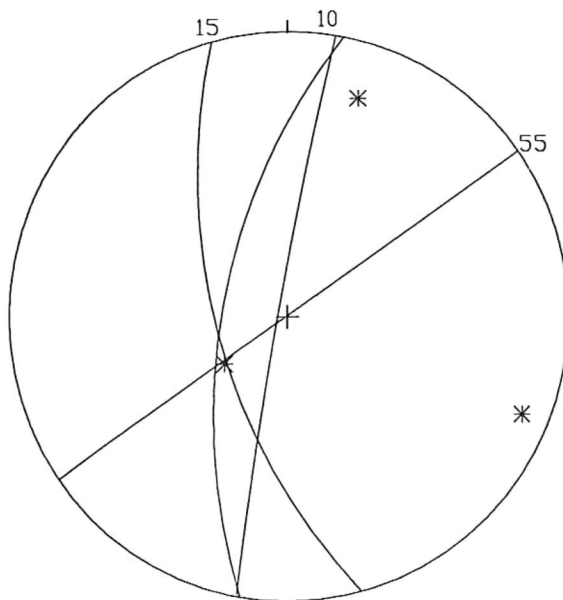
## SITIO 72.

Utilizando el conjunto de cuatro fallas hacia el NE (08-49), se define  $\sigma_2$ , polo del plano que contiene a  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  en N85W. El conjunto de fallas resuelve sistema lateral de fallamiento:

$$\sigma_1=36/N38E$$

$$\sigma_2=51/S05W$$

$$\sigma_3=16/N65W.$$



## SITIO 73.

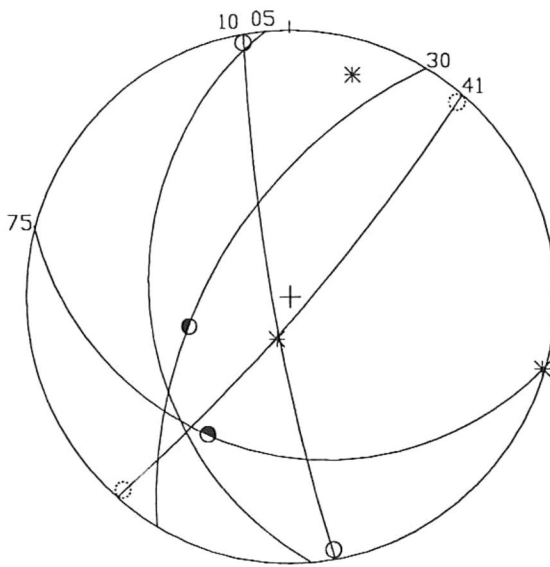
Se seleccionan los planos de falla con orientación N15W y N55E, los cuales nos resuelven sistema de desplazamiento lateral, definido por la elipse de esfuerzos:

$$\sigma_1=18/N18E$$

$$\sigma_2=68/S54W$$

$$\sigma_3=11/S69E.$$

Las estructuras normales orientadas hacia N10E, son congruentes con la orientación invariante que mantiene el  $\sigma_3$  hacia el NW, en el sistema.



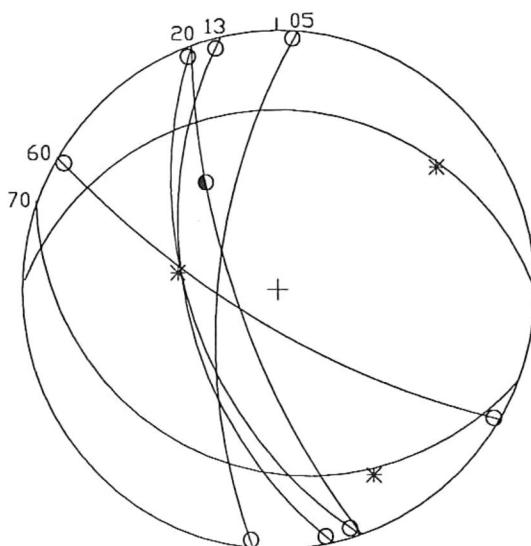
## SITIO 26.

Selección de N10W/85W y N41E/85SE. El fallamiento inverso con orientación N75W/41S/106, se resuelve según la elipse de esfuerzos obtenida. Lo mismo sucede con la estructura normal cuya orientación es casi paralela al esfuerzo principal de máxima compresión ( $\sigma_1$ ):

$$\sigma_1=12/N16E$$

$$\sigma_2=79/S16W$$

$$\sigma_3=01/S75E.$$



## SITIO 27.

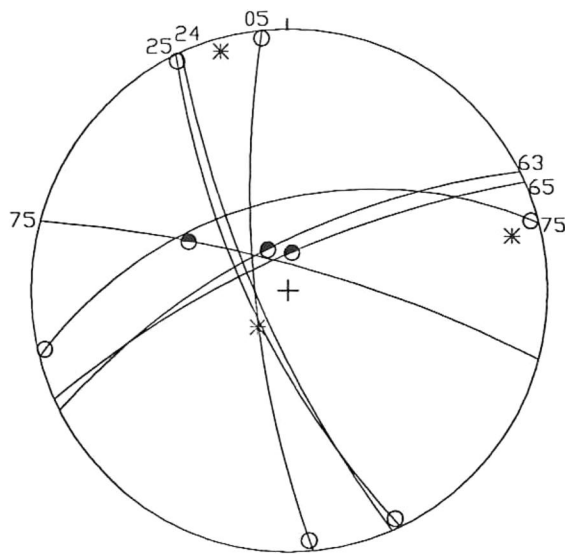
Estructuras conjugadas de desplazamiento lateral con orientación N13W/61SW/000 y N60W/79S/000, definen la elipse de esfuerzos:

$$\sigma_1=21/S29E$$

$$\sigma_2=58/N78W$$

$$\sigma_3=22/N52E.$$

Las fallas inversas con orientación E-W/32NW y N70W/32S, son congruentes con la orientación que presenta el  $\sigma_1$ , y se explica por medio de una permutación entre los esfuerzos principales  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$ . También se resuelve la estructura normal paralela al  $\sigma_1$ .



## SITIO 28.

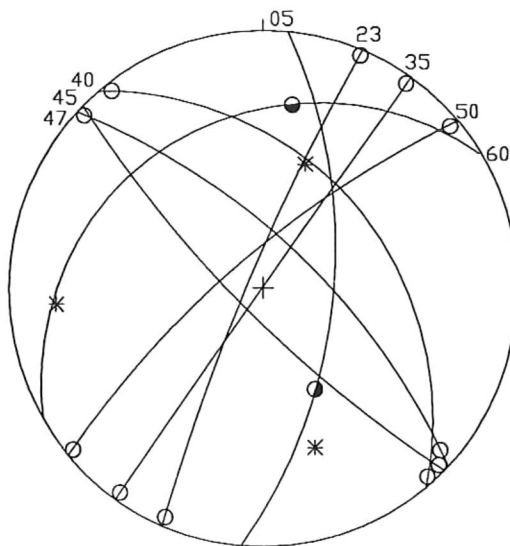
Se seleccionan estructuras conjugadas de rumbo, con orientación N25W/78W/005 y N05W/80W/000, resolviéndonos:

$$\sigma_1=04/N15W$$

$$\sigma_2=78/S48W$$

$$\sigma_3=11/N75E.$$

Las fallas normales orientadas hacia el NE, quedan sin solución según la elipse de esfuerzos obtenida (otro evento?).



## SITIO 29.

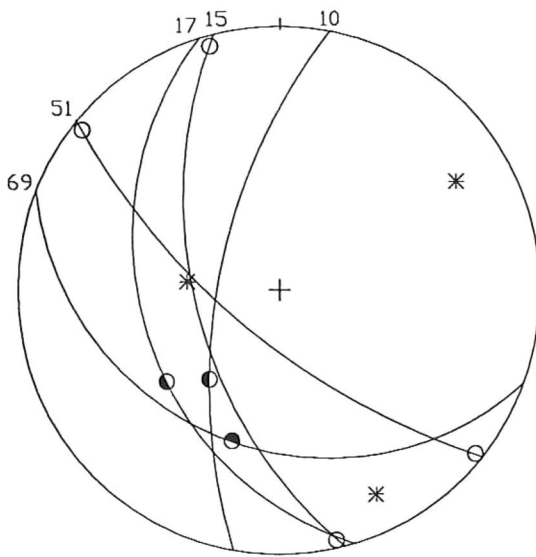
El par conjugado que soluciona el sistema de fallas en el sitio, presenta una orientación de N40W y N23E, resolviendo sistema de desplazamiento lateral, definido por el tensor:

$$\sigma_1=37/S20E$$

$$\sigma_2=46/N18E$$

$$\sigma_3=20/S87W.$$

La orientación que presenta el vector de máxima compresión ( $\sigma_1$ ), es congruente con las estructuras laterales (N40-47W y N23-50E), inversas (N60E/35W) y normales (N05E) presentes en el sitio.



## SITIO 33.

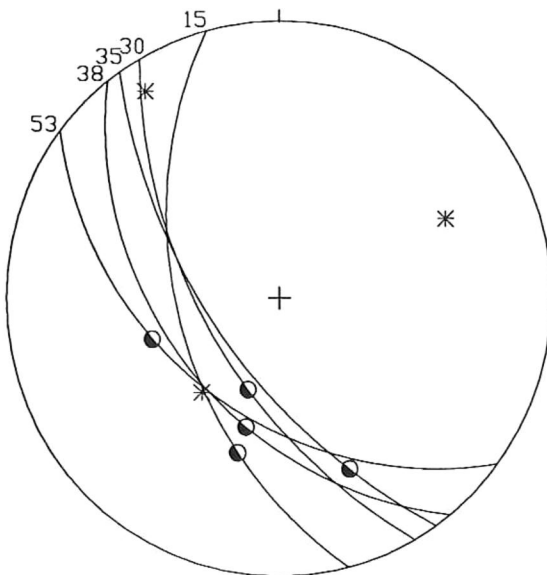
Se seleccionan dos planos conjugados con estrías casi horizontales, los cuales se orientan hacia el N51W/75SW/155 y N15W/64W/153, resolviéndose un sistema de desplazamiento lateral:

$$\sigma_1=17/S26E$$

$$\sigma_2=61/N81W$$

$$\sigma_3=21/N57E.$$

La estructura inversa con orientación N69W y la estructura normal hacia N17W, se solucionan de acuerdo al tensor de esfuerzos obtenido.



## SITIO 34.

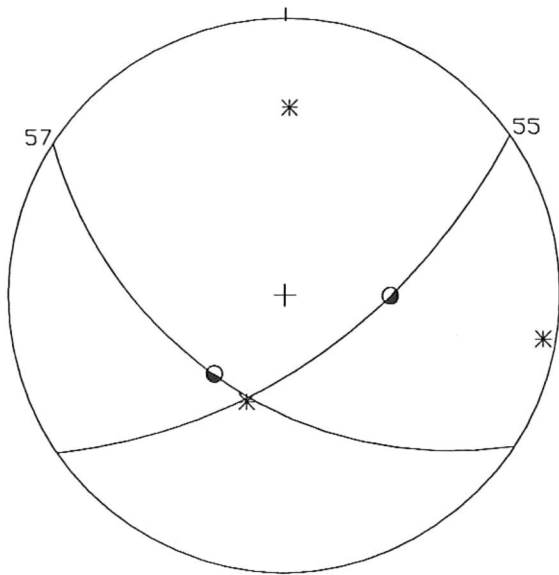
Las estructuras con orientación N38W y N15W, nos definen el tensor de esfuerzos siguiente:

$$\sigma_1=11/N32W$$

$$\sigma_2=56/S42W$$

$$\sigma_3=32/N64E.$$

Todo el sistema normal en el sitio, es congruente con la orientación hacia el NE, del vector de mínima compresión ( $\sigma_3$ ).



## SITIO 35.

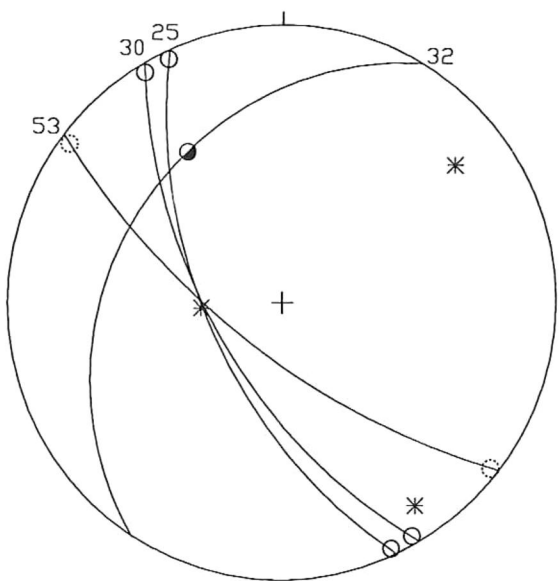
Se seleccionan las estructuras con orientación N57W y N55E, generando el tensor:

$$\sigma_1=31/N02E$$

$$\sigma_2=58/S18W$$

$$\sigma_3=05/S82E.$$

Unica solución probable en el sitio.



## SITIO 36.

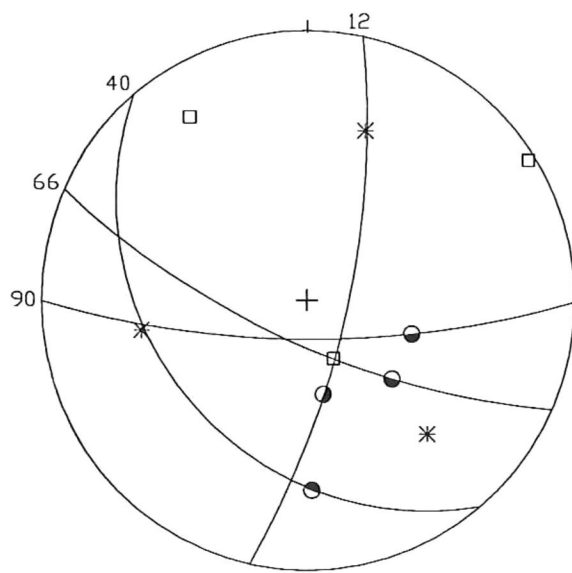
Los planos N53W y N25W, resuelven sistema de fallamiento lateral, definido por el tensor:

$$\sigma_1=14/S35E$$

$$\sigma_2=66/N90W$$

$$\sigma_3=19/N51E.$$

El fallamiento inverso con orientación N32E/38W/68, se soluciona favorablemente de acuerdo con la orientación que presenta el vector de máxima compresión.



## SITIO 37.

Dos posibles tensores que resuelven el sistema estructural en el sitio. El primero, considera como par conjugado a las estructuras N40W y E-W, generando el tensor:

$$\sigma_1=35/S44E$$

$$\sigma_2=38/S81W$$

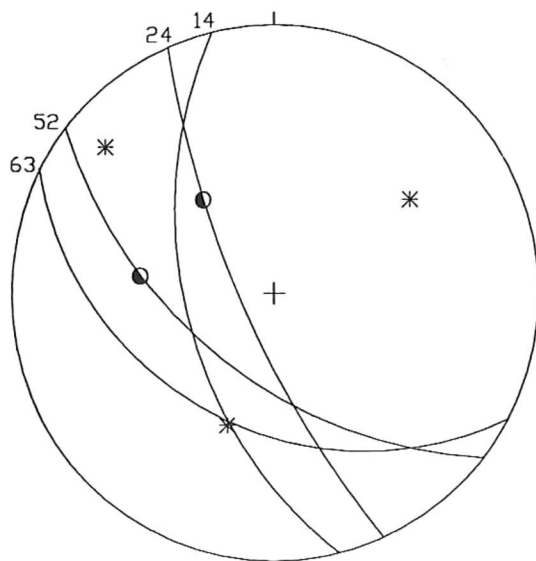
$$\sigma_3=32/N20E.$$

El segundo, selecciona como par conjugado a las estructuras con orientación N66W y N12E, generando el tensor:

$$\sigma_1=20//N33W$$

$$\sigma_2=70/S26E$$

$$\sigma_3=02/N58E.$$



## SITIO 38.

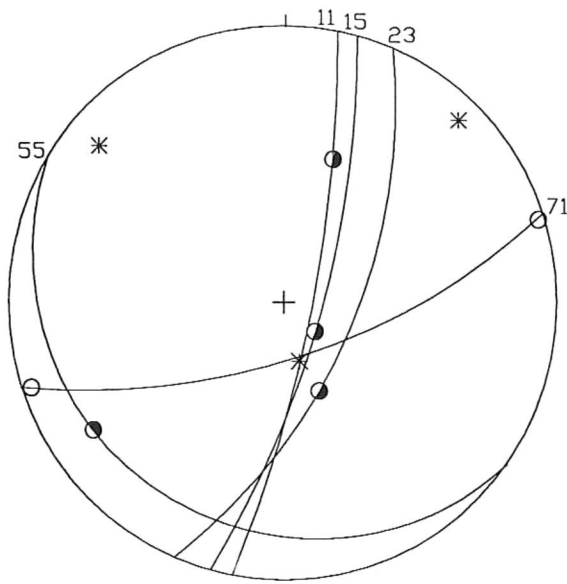
El par conjugado con orientación N63W y N14W, define sistema de desplazamiento lateral en el sitio. La elipse de esfuerzos que define a estas estructuras, es:

$$\sigma_1=17/N49W$$

$$\sigma_2=49/S22W$$

$$\sigma_3=36/N54E.$$

El fallamiento normal con orientación N52W, es congruente con la orientación del  $\sigma_1$  obtenido.



## SITIO 23.

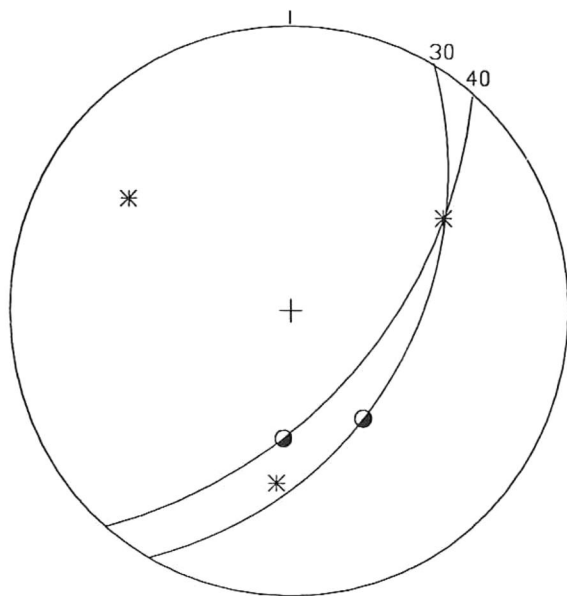
Se selecciona el par de conjugadas con orientación N11E/82E/048 y N71E/73S/015, debido a que presentan estrías horizontales-subhorizontales. Estos planos me definen la elipse de esfuerzos:

$$\sigma_1=08/N43E$$

$$\sigma_2=74/S17E$$

$$\sigma_3=14/N49W.$$

La orientación del esfuerzo de máxima compresión ( $\sigma_1$ ), resuelve el fallamiento inverso en N55W/20SE/099.



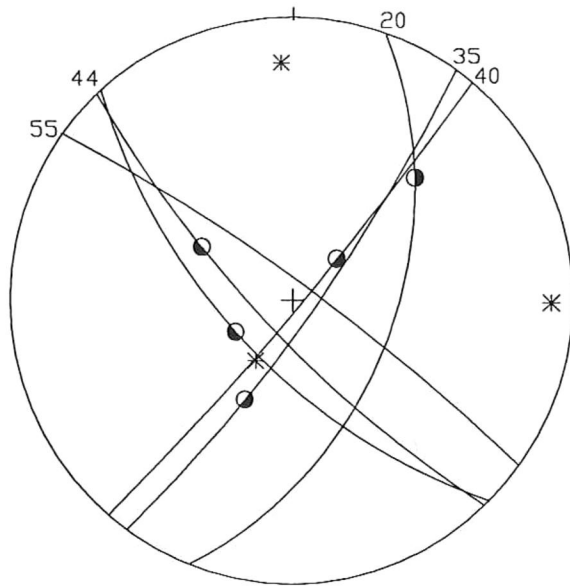
## SITIO 24.

La única solución probable, la generan los planos N40E/65SE y N30E/55SE:

$$\sigma_1=41/S04W$$

$$\sigma_2=34/N59E$$

$$\sigma_3=31/N55W.$$



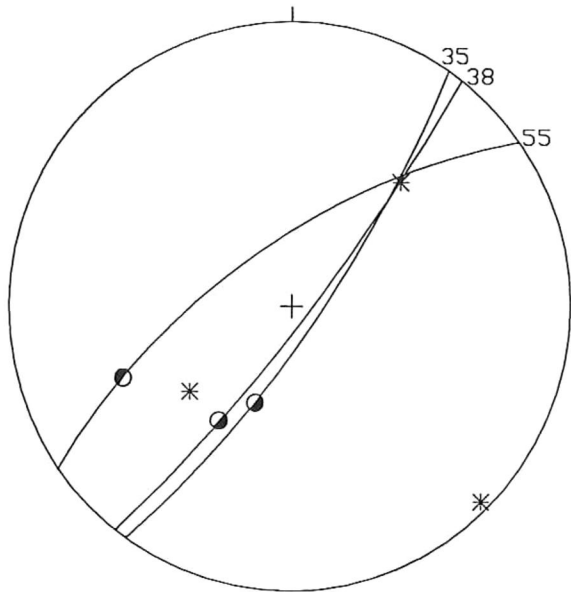
## SITIO 75.

Los planos conjugados con orientación N40E/88S y N44W/72W, nos definen la elipse siguiente:

$$\sigma_1=15/N03W$$

$$\sigma_2=72/S32W$$

$$\sigma_3=08/N89E.$$



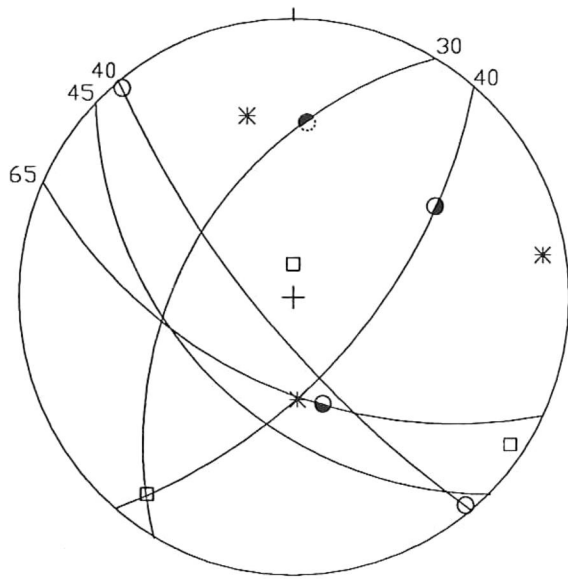
## SITIO 77.

Los planos con estrías verticales y orientación N55E/72NW/030 y N35E/82S/115, resuelven sistema normal de fallamiento. Este sistema se encuentra definido por la elipse de esfuerzos:

$$\sigma_1=53/S51W$$

$$\sigma_2=37/N42E$$

$$\sigma_3=04/S46E.$$



## SITIO 79.

Dos posibles soluciones. La primera, considera los planos N40E y N65W:

$$\sigma_1=31/N13W$$

$$\sigma_2=60/S05E$$

$$\sigma_3=08/N79E.$$

La segunda, considera los planos con orientación N30E y N40E:

$$\sigma_1=80/N00E$$

$$\sigma_2=09/S36W$$

$$\sigma_3=05/S56E.$$