

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**INTERPRETACIÓN ESTRUCTURAL Y RESTAURACIÓN DE  
SECCIONES DE UN TRANSECTO UBICADO ENTRE LOS  
POBLADOS PURURECHE, ESTADO FALCÓN Y BARAGUA,  
ESTADO LARA.**

Trabajo Especial de Grado  
Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela para  
Optar por el título de Ingeniero Geólogo  
Por los Brs.  
Berroterán Fuentes, Luis J.  
Ziritt Romero, Freddy A.

Caracas, julio 2004

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

# **INTERPRETACIÓN ESTRUCTURAL Y RESTAURACIÓN DE SECCIONES DE UN TRANSECTO UBICADO ENTRE LOS POBLADOS PURURECHE, ESTADO FALCÓN Y BARAGUA, ESTADO LARA.**

**Tutor Académico: Prof. Ricardo Alezones**

Trabajo Especial de Grado  
Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela para  
Optar por el título de Ingeniero Geólogo  
Por los Brs.  
Berroterán Fuentes, Luis J.  
Ziritt Romero, Freddy A.

Caracas, julio 2004

Caracas, 30 de julio 2004

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Geológica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los Brs. Berroterán, Luis y Ziritt, Freddy, titulado:

**“INTERPRETACIÓN ESTRUCTURAL Y RESTAURACIÓN DE SECCIONES DE UN TRANSECTO UBICADO ENTRE LOS POBLADOS PURURECHE, ESTADO FALCÓN Y BARAGUA, ESTADO LARA.”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Geólogo, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por los autores, lo declaran APROBADO.

Prof. Frank Audemard  
Jurado

Prof. Paul Romero  
Jurado

Prof. Ricardo Alezones  
Tutor Académico

Luis Berroterán:  
A mis Padres, Abuela  
y a mi novia, Lennis.

No basta adquirir sabiduría, es preciso usarla.  
Cicerón

El arte de vencer se aprende en las derrotas  
S. Bolívar

Freddy Ziritt:  
A mis Padres.

## AGRADECIMIENTOS

-A la ilustre Universidad Central de Venezuela por ser la casa de estudio que nos guió e iluminó en el camino del saber.

-A el profesor Ricardo Alezones, tutor de esta tesis, quien nos dio su ayuda incondicional en el desarrollo de este trabajo y en el de la carrera, además nos ha enseñado a madurar en muchos aspectos de la vida.

-A: Ing. R. González, Dr. J. Suppe, Ing. R. Ollarves y el Dr. F. Audemard por su gran colaboración y aporte cognoscitivo en el desarrollo de este trabajo.

-Al MARNR dirección central y dirección de Coro por su aporte técnico.

-A Yulner (La iguana) y Roger (Salas torpe "Roncho") por ser como son.

-A la gente de los pueblos de Purureche, Baragua y a todos los de los caseríos entre estos. En especial a la señora Negra, Chevo, Henry, Yito, Familia Pineda, Familia Chavez, Familia Camacho, Familia Trejo.

### **Luis agradece a:**

A mis padres, Ligia y José Luis, mi novia Lennis, mi abuela Francisca y mi familia en general por su ayuda

A mi compañero de tesis por su paciencia y amistad incondicional.

Al equipo de rugby de la UCV por su amistad y hermandad (Compadres). En especial a Emiliano, Reinaldo, Mustafa, Carlitos, Odalis e Irluz.

A todos mis compañeros y amigos que han vivido y están viviendo la grata experiencia de estudiar en la escuela de geología. En especial Adrianita, Karen, José Manuel Cuqui, Humberto, Orly, Catira, Moncho, Engelbert, Orangel, Piolo, etc.....

A mis panas del Machado: Rafael Guerra, David Guerra y Rafael Pacheco.

Y a mis personas queridas que ya no están presentes (Luis Alejandro, Maribeth, tío Papi, Abuelita Mercedes y Abuela Zoila)

### **Freddy agradece a:**

Mis padres y mi familia por apoyarme en todo momento.

A Patricia por aguantarme tanto todos estos años.

A mi compañero de tesis por ser tan buen amigo.

A mi tío Nico por ser mi inspiración desde niño.

A la comunidad de la escuela de geología en general en especial a Adrianita, la catira, Adri y Nany por ser tan lindas y a Humberto, Sey, Orly, Chilanga, Iván, Sra. Morela, Doris, Igor, Piolo, Bodri, Margota, Johan F, Cuqui,, Tomas, etc...

A mis panas Manuel, Morocho, el negro, Andre, Pame, Hanaima, Ramón, Desi, Pedro, Amalia, Carlos, Rey, Ángel, Luis, Ana, Teofilo, Magda, Félix, Pelón, Hugo, etc... y a los que no están Luis y Víctor Q.

A Hercilia por todos esos buenos consejos y por estar cuando mas la necesite.

El que no quiere morir que no nazca!  
Querito

**Berroterán F., Luis J. & Ziritt R., Freddy A.**

**INTERPRETACIÓN ESTRUCTURAL Y RESTAURACIÓN DE  
SECCIONES DE UN TRANSECTO UBICADO ENTRE LOS  
POBLADOS PURURECHE, ESTADO FALCÓN Y BARAGUA,  
ESTADO LARA.**

**Tutor Académico: Prof. Ricardo Alezones**

**Tesis, Caracas, UCV. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Geológica,  
Minas y Geofísica. 2004. n° pag. 125.**

**Palabras claves:** Estado Falcón, Estado Lara, Cuenca de Falcón, Geología estructural.

**Resumen.** Los objetivos que pretende seguir el presente proyecto son los de compilar e interpretar la información estructural existente y controlar esta información con datos de campo a lo largo de secciones regionales y la validación de los modelos estructurales propuestos, así como la construcción de secciones regionales balanceadas para reforzar y validar la interpretación estructural.

Para cumplir con los objetivos de este proyecto se dividió el trabajo en tres fases. La fase 1 o fase de pre-campo consistió en la búsqueda de información bibliográfica acerca de la estratigrafía y tectónica de la cuenca de Falcón, simultáneamente se obtuvieron los mapas topográficos y geológicos y las fotos aéreas de la zona a trabajar. Utilizando los mapas y las fotos aéreas se predefinieron las secciones tentativas para realizar el levantamiento geológico.

La fase 2 o fase de campo se realizó en dos etapas de dos semanas de duración cada una y se basó en la medición y caracterización de todas las estructuras que se encontraban aflorando, además de la descripción litoestratigráfica de estas secciones.

La fase 3 o post-campo consistió en la construcción de las secciones estructurales correspondientes a las secciones estudiadas en campo, simultáneamente se realizó el análisis de paleoesfuerzos y fases de deformación a partir de las

poblaciones de fallas. De igual manera se analizaron las estructuras plegadas y comprobando si estas poseen las mismas orientaciones de los pliegues asociados al anticlinorio de Falcón. También se realizó la comparación de la litoestratigrafía obtenida en campo con la que se encuentra en las diversas publicaciones.

Las secciones estructurales se construyeron utilizando la herramienta de dibujo Autocad 2004 y Land Development, para la realización de las mismas se ha utilizado el método de balanceo de secciones geológicas de Suppe (1983, 1984, 1985, 1990) como técnica de interpretación. Para el análisis de las poblaciones de fallas y los pliegues se utilizaron los siguientes “softwares”: Stereonet,, Tectonics sp. Los cuales se fundamentan en las metodologías de Etchecopar *et al.*, (1981), diedro recto de Angelier (1979), densidad de polos y diagramas de rosas.

En conclusión la evolución del plegamiento comienza con la formación de *fault-bend-fold* compuestos por rampas y despegues, ubicados en la base y el tope de la Formación Paují, continuando con la evolución del plegamiento con la formación de *fault-propagation-fold*. La vergencia general de estos sistemas plegados es SE con una profundidad somera (1500 m) de las rampas y los despegues asociados, los cuales actúan como estructuras de propagación de estructuras de carácter regional (fallas normales invertidas).

La zona de estudio presenta varias fases de deformación. De esta manera en la zona de estudio se observa que la Cuenca de Falcón se abre en forma de graben durante el Eoceno Medio, generando la formación de un depocentro sedimentario el cual es invertido por procesos compresivos a finales del Mioceno Temprano, plegando todas estas rocas con ejes de orientación WSW-ENE. Esta región está sometida a un esfuerzo horizontal máximo más reciente de dirección NNW-SSE, responsable de la generación de estructuras que cortan a los pliegues antes descritos, siendo ésta la última fase compresiva de al menos dos que se han relevado desde el Mioceno Temprano.

## INDICE GENERAL

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
RESUMEN	iv
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE FOTOS	xiii
CAPITULO I	1
INTRODUCCION	1
1.1 Objetivos	1
1.2 Ubicación	1
1.3 Alcances	3
1.4 Metodología	3
1.4.1 Recopilación de Información	3
1.4.2 Interpretación de los Datos Geológicos Compilados	4
1.4.3 Fase de Campo	5
1.4.4 Fase de Laboratorio, Integración de los Resultados y Elaboración del Informe Final	6
1.5 Trabajos Previos	7
1.5.1 Estratigrafía y Tectónica de la Cuenca de Falcón	8
1.5.2 Interpretación y Restauración de Secciones Estructurales en Superficie y Subsuelo	
CAPITULO II	12
GELOGIA REGIONAL	12
CAPITULO III	24
GEOLOGIA LOCAL	24
3.1 Estratigrafía Local	24
3.1.1 Formación Paují	24
3.1.1.1 Ubicación Geográfica	24

3.1.1.2 Descripción Litológica	24
3.1.1.3 Contactos	25
3.1.2 Formación Santa Rita	26
3.1.2.1 Ubicación Geográfica	26
3.1.2.2 Descripción Litológica	26
3.1.2.3 Contactos	26
3.1.3 Formación Jarillal	27
3.1.3.1 Ubicación Geográfica	27
3.1.3.2 Descripción Litológica	27
3.1.3.3 Contactos	28
3.1.4 Formación El Paraíso	28
3.1.4.1 Ubicación Geográfica	28
3.1.4.2 Descripción Litológica	29
3.1.4.3 Contactos	30
3.1.5 Formación Pecaya	30
3.1.5.1 Ubicación Geográfica	30
3.1.5.2 Descripción Litológica	30
3.1.5.3 Contactos	30
3.1.6 Formación Churuguara-Castillo (sin diferenciar)	32
3.1.6.1 Ubicación Geográfica	32
3.1.6.2 Descripción Litológica	32
3.1.6.3 Contactos	34
3.1.7 Formación Agua Clara	34
3.1.7.1 Ubicación Geográfica	34
3.1.7.2 Descripción Litológica	34
3.1.7.3 Contactos	34
3.2 Estructural Local	35
3.2.1 Estructuras Planares	35
3.2.1.1 Estratificación	35
3.2.1.2 Diaclasas	37

3.2.1.3 Fallas	39
3.2.1.3.1 Fases de deformación	42
3.2.1.3.2 Paleoesfuerzos	43
Grupo 1	43
Subgrupo 1	43
Subgrupo 2	46
Subgrupo 3	48
Subgrupo 4	50
Subgrupo 5	51
Subgrupo 6	53
Subgrupo 7	54
Grupo 2	55
Grupo 3	57
Grupo 4	60
3.2.1.4 Pliegues	62
3.2.2 Secciones Balanceadas	66
3.2.2.1 Generalidades	66
3.2.2.2 Descripción de las Secciones	67
3.2.2.2.1 Sección 1	67
3.2.2.2.2 Sección 2	69
3.2.2.3 Restauración de las Secciones	72
3.2.2.3.1 Sección 1	72
3.2.2.3.2 Sección 2	76
3.2.3 Discusión	80
CONCLUSIONES	88
BIBLIOGRAFÍA	90
ANEXOS	95

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Mapa de ubicación del área de estudio	2
Figura 2.1 Diferentes calendarios tectónicos propuestos para el Noroeste venezolano	13
Figura 2.2 Modelo sedimentario-estructural esquemático de la Cuenca de Falcón Bonaire durante el Oligoceno-Mioceno inferior	14
Figura 2.3 Mapa paleogeográfico de la región noroccidental de Venezuela para el Mioceno inferior	14
Figura 2.4 Tabla de correlación de las unidades litoestratigráficas de la Cuenca de Falcón de oeste a este	16
Figura 2.5 Tabla de correlación de las unidades litoestratigráficas de la Cuenca de Falcón de norte a sur	18
Figura 3.1 Mapa de afloramiento de la Formación Paují	25
Figura 3.2 Mapa de afloramiento de la Formación Santa Rita	26
Figura 3.3 Mapa de afloramiento de la Formación Jarillal	27
Figura 3.4 Mapa de afloramiento de la Formación El Paraíso	29
Figura 3.5 Mapa de afloramiento de la Formación Pecaya	31
Figura 3.6 Mapa de afloramiento de la Formación Churuguara-Castillo (sin diferenciar)	33
Figura 3.7 Mapa de afloramiento de la Formación Agua Clara	34
Figura 3.8 a) Descripción grafica de la actitud de la estratificación	36
Figura 3.9 Descripción grafica de las diaclasas	38
Figura 3.10 Descripción grafica de los planos de falla de la muestra 2	41
Figura 3.11 Mapa de tensores de esfuerzo para el grupo 1	44
Figura 3.12 Análisis de paleoesfuerzos para el subgrupo 1	45

Figura 3.13 Análisis de paleoesfuerzos para el subgrupo 2	47
Figura 3.14 Análisis de paleoesfuerzos para el subgrupo 3	49
Figura 3.15 Análisis de paleoesfuerzos para el subgrupo 4	50
Figura 3.16 Análisis de paleoesfuerzos para el subgrupo 5	52
Figura 3.17 Análisis de paleoesfuerzos para el subgrupo 6	53
Figura 3.18 Análisis de paleoesfuerzos para el subgrupo 7	55
Figura 3.19 Análisis de paleoesfuerzos para el grupo 2	57
Figura 3.20 Mapa de tensores de esfuerzo para los grupos 2 y 3	58
Figura 3.21 Análisis de paleoesfuerzos para el grupo 3	60
Figura 3.22 Representación en red schmidt de los planos de falla con dos direcciones de estrías	62
Figura 3.23 Descripción grafica de los ejes de los pliegues	65
Figura 3.24 Bloque estructural de la zona de estudio	67
Figura 3.25 Sección 1 balanceada	74
Figura 3.26 Sección 2 balanceada	78
Figura 3.27 Esquema de <i>fault-propagation-fold</i> y sus pliegues parásitos	84

## LISTA DE FOTOS

Foto 1.1 Vías de acceso (vía a la Gloria)—————	3
Foto 3.1 Discordancia angular entre las formaciones Santa Rita y Paují——	25
Foto 3.2 Conglomerado de la Formación Santa Rita —————	27
Foto 3.3 Contacto entre las formaciones Santa Rita y Jarillal —————	28
Foto 3.4 Afloramiento de la Formación El Paraíso —————	30
1	
Foto 3.5 Afloramiento de la Formación Pecaya —————	31
Foto 3.6 Afloramiento de la Formación Churuguara-Castillo (sin diferenciar)—————	32
Foto 3.7 Representación de las diaclasas —————	39
Foto 3.8 Representación de las diaclasas —————	39
Foto 3.9 Representación de fallas inversas, normales y transcurrentes ——	42
Foto 3.10 Plano de movimiento normal dextral —————	46
Foto 3.11 Plano de falla con movimiento inverso—————	48
Foto 3.12 Plano de falla con movimiento normal dextral—————	56
Foto 3.13 Plano de falla con movimiento normal sinestral —————	59
Foto 3.14 Planos de Falla con dos estrías—————	61
Foto 3.15 Pliegues chevron/kink y angulares—————	63
Foto 3.16 Pliegues relacionados a fallas—————	64

# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

La no disposición de información sísmica y la poca definición de estructuras geológicas en el límite entre los estados Falcón y Lara, ha hecho necesaria la aplicación de técnicas de probada confiabilidad que permitan la extrapolación de interpretaciones de datos geológicos de superficie a mayores profundidades. De esta manera, la construcción y balanceo de secciones por métodos cuantitativos ha permitido la realización de interpretaciones en áreas que sólo poseen información de superficie, además de la elaboración de modelos y simulaciones cinemáticas, obteniéndose así datos adicionales de gran importancia en la realización de análisis estructurales y litoestratigráficos.

### **1.1 Objetivos**

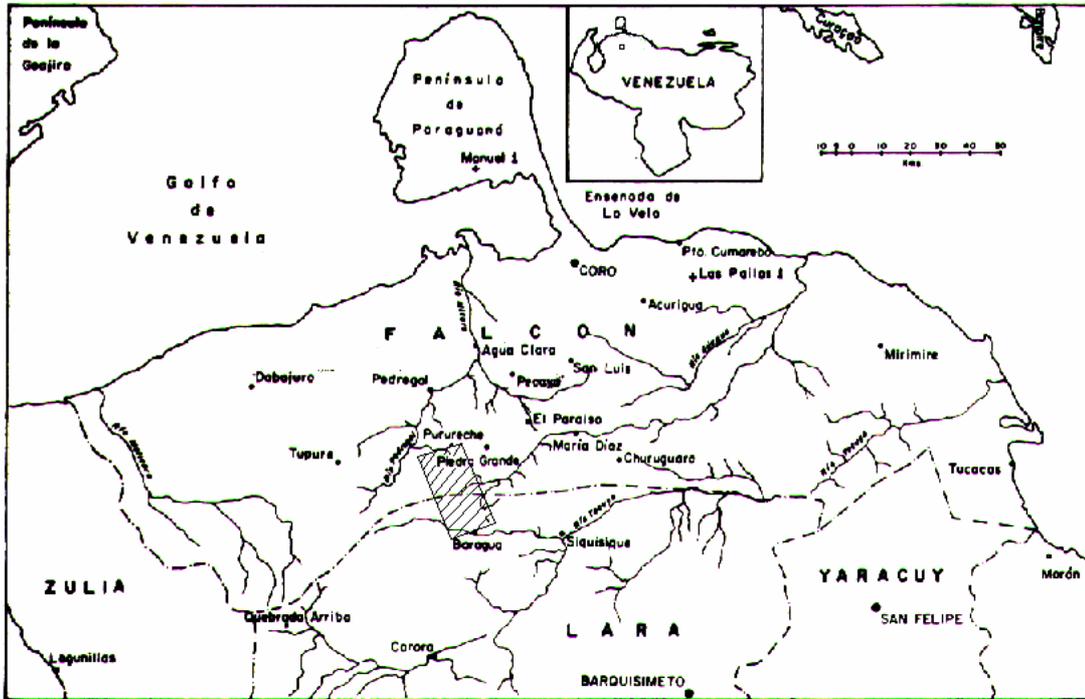
Los objetivos del presente trabajo son:

- Compilar e interpretar la información estructural existente con control de campo a lo largo de secciones regionales y validación de los modelos estructurales propuestos.
- Construcción de secciones regionales balanceadas para reforzar y validar la interpretación estructural y corroborar la litoestratigrafía.

### **1.2 Ubicación**

El área de estudio está ubicada en la sección Purureche-Baragua, localizada en la parte central del límite entre los estados Falcón y Lara, al norte de la Sierra de Baragua. Purureche se encuentra en el estado Falcón, al sur del distrito Democracia a unos 50 Km al sur de Urumaco. Baragua se encuentra en el estado Lara al noroeste del distrito Urdaneta a 30 km, aproximadamente, al oeste de Siquisique. Las coordenadas U.T.M. de la zona de estudio son: Huso 19 (1.187.751N, 380.266E), (1.170.456N, 387.607E), (1.192.583N, 388.635E), (1.175.927N, 397.083E) respectivamente. (ver figura 1.1 y anexo 1).

Fig. 1.1 Mapa de ubicación del área de estudio indicando la posición aproximada del transepto destacado por una línea entre los poblados Purureche (estado Falcón) y Baragua (estado Lara).



LEYENDA:  Área de estudio

Tomado y modificado de Díaz de Gamero (1977)

La zona abarca una extensión aproximada de 193 km<sup>2</sup>. La principal vía de acceso al poblado de Purureche (campamento base 1) es a través de la carretera Falcón – Zulia, tomando el desvío hacia el poblado de Pedregal, 30 minutos más al sur. Hacia el poblado de Baragua (campamento base 2) la principal vía de acceso es a través de la carretera Barquisimeto – Coro a 40 minutos del poblado de Siquisique. Entre Purureche y Baragua existen por lo menos tres (3) vías de penetración, las cuales son carreteras de tierra que atraviesan la serranía, por lo que se recomienda el uso de un vehículo de doble tracción (preferiblemente Toyota) para realizar esta ruta (ver foto 1.1). La carretera que se encuentra más al oeste conecta a Purureche con Baragua tomando la vía hacia el caserío de el Paso de Baragua; la carretera central atraviesa los caseríos de Las Maporitas, Los Conuquitos y Mamoncito entre otros y la carretera más al este es la que va del caserío de Piedra Grande pasando por

Churuguara y se toma el desvío hacia Baragua. Esta última es menos escabrosa que las anteriores y solo la del centro atraviesa el área de estudio, las otras dos solo la bordean. Además de estas carreteras, existe una gran cantidad de senderos de pastoreo.



**Foto 1.1. Vías de acceso que atraviesan la serranía. Izquierda: vía a La Gloria. Derecha: vía al Paso de Baragua.**

### **1.3 Alcances**

Dentro de los alcances o resultados esperados están un mapa resumen de información geológica estructural del área, cortes geológicos y balanceo de secciones, diagramas de esfuerzo y deformación y, finalmente, un informe técnico en donde se explique la interpretación estructural obtenida.

### **1.4 Metodología**

Para la realización de este trabajo se realizaron diferentes etapas las cuales están divididas de la siguiente manera:

#### **1.4.1 Recopilación de Información**

Durante esta etapa se realizaron actividades como la revisión y selección de libros y artículos de revistas especializadas en el área de geología estructural (ver apéndice 2), así como manuales, mapas y fotografías aéreas de la zona de estudio, es decir:

- Libros de geología estructural que expliquen los principios de la interpretación estructural y los modelos de deformación que se aplican en la evolución que de los sistemas compresivos.
- Revistas especializadas que expliquen los métodos de análisis de tensores de esfuerzos a partir de una población de fallas.
- Libros y revistas especializadas que expliquen los métodos de construcción, geometría y cinemática de las secciones balanceadas.
- Selección de los trabajos en el área de la Cuenca de Falcón en el ámbito estratigráfico y estructural, basándose en trabajos presentados en congresos, simposios y artículos de revistas especializadas.
- Compilación de los mapas base de Cartografía Nacional, escala 1:100.000 y 1:25.000, la misión de fotografías aéreas 0201106, escala 1:50.000 y los mapas geológicos de la Creole Petroleum Corporation, escala 1:50.000.  
Las hojas 1:100.000 se identifican con los números 6147, 6247, 6148, 6248.  
Las hojas 1:25000 son: 6147 (I-NE), 6247 (IV-NE, IV-SO, IV-NO), 6148 (II-NE, II-SE), 6248 (III-SE, III-SO, III-NO).  
Las fotos aéreas están compuestas por las series 521-524, 1182-1187, 1205-1210, 1246-1252.  
Los mapas geológicos utilizados fueron: el C-4-D y el C-5-C.

#### **1.4.2 Interpretación de los Datos Geológicos Compilados**

Las actividades que conforman esta etapa fueron las siguientes:

- Interpretación e integración de los mapas geológicos que contienen el área comprendida entre los poblados de Purureche, edo. Falcón y Baragua, edo. Lara.
- Interpretación e integración de las fotografías aéreas que contienen el área comprendida entre los poblados de Purureche, estado Falcón y Baragua, estado Lara. Estas se utilizaron para interpretar: drenajes, trazas de capas,

pliegues, fallas, contacto entre unidades, vías de acceso y centros poblados. Esta información se comparó con la información obtenida de los mapas topográficos y geológicos.

- Integración de la información estratigráfica (formaciones) confinada en el área de estudio tomando en cuenta la que aparece en los mapas de la Creole.
- Digitalización e integración de los mapas topográficos escala 1:25000 y de los mapas geológicos de la Creole con la ayuda del paquete de programas de Autocad 2004 y Land Development, generando un mapa compilado de la información geológica disponible (contactos estratigráficos, orientación de capas, pliegues y fallas) del área de estudio.
- Ubicación de los transeptos en el mapa geológico (ver anexo mapa geológico) tomando en cuenta que los mismos se orientaran lo más perpendicular posible al rumbo de la estratificación y estructuras principales y además que cubrieran la mayor cantidad de quebradas.
- Realización de cortes geológicos preliminares utilizando como referencia los transeptos delineados. Estos cortes geológicos muestran la disposición de las rocas en superficie y además se realizó una interpretación preliminar de cómo era la geometría de las rocas en subsuelo dado que no se dispuso de líneas sísmicas del área de estudio.

### **1.4.3 Fase de Campo**

Esta fase se dividió en dos etapas de campo debido a la gran extensión de terreno y al tiempo disponible para la realización del estudio. Las mismas se basaron en el levantamiento geológico de dos (2) transeptos que se encuentran comprendidos entre los poblados de Purureche (estado Falcón) y Baragua (estado Lara), cuya longitud aproximada es 19 km cada uno. Estas fases abarcaron un periodo de dos (2) semanas cada una; la primera se hizo del 23/11 al 07/12 de 2003 y la segunda se realizó del 06/02 al 20/02 de 2004.

En ambas etapas se realizó el estudio de las siguientes secciones (ver Anexo 1)

Primera etapa:

- Sección A – A' (Qda. Purureche)
- Sección B – B' (Qda. Sin nombre)
- Sección PB – PB' (Qda. Sin nombre)
- Sección C – C' (Qda. Sin nombre)
- Sección D – D' (Qda. Los Pozos y Qda. El Salto)

Segunda etapa:

- Sección I – I' (Qda. El Saladillo)
- Sección J – J' (Qda. Sin nombre)
- Sección K – K' (Qda. Sin nombre)
- Sección L – L' (Qda. El Peñascón)
- Sección M – M' (Qda. Maica)

En cada una de las secciones se realizó el reconocimiento de unidades estratigráficas aflorantes, comparando las características de las mismas con aquellas descritas en la bibliografía existente.

Se tomaron mediciones de estructuras planares tales como planos de estratificación, superficies de fallas, planos axiales y limbos de pliegues y diaclasas; estructuras lineales tales como estrías de fallas, ejes de pliegues así como también los demás elementos que definen geoméricamente estas estructuras.

La ubicación de los puntos de medición en el mapa compilado (ver apéndice 1) se realizó utilizando un navegador (GPS). Estas mediciones se realizaron en los afloramientos de roca ubicados a lo largo de las secciones, en donde se podían medir datos de estructuras planares y/o estructuras lineales. También se ubicaron los centros poblados y puntos claves de las vías de acceso a las quebradas.

#### **1.4.4 Fase de Laboratorio, Integración de los Resultados y Elaboración del Informe Final**

- Agrupamiento de los datos estratigráficos y geológicos obtenidos en el área de estudio.
- Comparación de los datos estratigráficos y estructurales con la literatura disponible a fin de corroborar la estratigrafía y las estructuras propuestas en el mapa geológico de la Creole.
- Comparación de los datos geológicos del área de estudio con los modelos teóricos de deformación para establecer el régimen tectónico de la zona y postular un modelo para la misma.
- Construcción de dos (2) secciones geológicas regionales restauradas a partir de los datos de campo, utilizando las metodologías no convencionales para la construcción de las secciones balanceadas (ver apéndice 2: Suppe, 1983, 1984 y 1990) y de esta manera validar las interpretaciones estructurales realizadas. Esto se hizo utilizando el paquete de programas de Autocad 2004.
- Restauración y retrodeformación de las estructuras presentes en la zona a partir de los métodos convencionales (ver apéndice 2: Dalshton, 1969) de restauración de sección geológicas.
- Elaboración de un mapa geológico de la zona de estudio a escala 1:25.000 con todos los datos recopilados en campo.
- Realización y análisis de diagramas de esfuerzo y deformación, además de la determinación de las fases de deformación y los paleoesfuerzos asociados a estas.
- Elaboración del informe técnico, en el cual se dan a conocer los resultados geológicos obtenidos.

#### **1.5 Trabajos Previos**

La revisión bibliográfica se divide de la siguiente manera: en primer lugar se discutirá la literatura publicada sobre la geología del área de estudio, presentando los

trabajos considerados más importantes para el conocimiento de la geología de la zona y su posterior corroboración. Así mismo se presenta una revisión de publicaciones en el área de interpretación y secciones balanceadas en superficie y en subsuelo, las cuales fueron las bases teóricas para la interpretación estructural que se realizará en el estudio.

### **1.5.1 Estratigrafía y Tectónica de la Cuenca de Falcón**

Debido a la falta de información en el ámbito geológico en el área de estudio se procedió a la compilación de los diversos trabajos realizados en zonas adyacentes y otras de carácter aún más regional con el fin de interpretar y correlacionar la información obtenida.

Wheeler (1960) realizó la descripción de la estratigrafía del Oligoceno y Mioceno inferior de Falcón occidental y nororiental. Utilizando esta información postulo un modelo de la geometría de la Cuenca de Falcón y su orientación, además utilizó mapas de facies para conocer como fue la distribución de los sedimentos al momento de su depositación.

Díaz de Gamero (1977) hizo un estudio de la estratigrafía y micropaleontología de las unidades estratigráficas del Oligoceno al Mioceno inferior en la zona central de la Cuenca de Falcón. La autora estableció a partir de la información suministrada por foraminíferos bentónicos las relaciones de facies entre las unidades litológicas ubicadas en la parte central de la cuenca (Formación El Paraíso y Formación Pecaya).

Muessig (1984) realiza un estudio de la estructura y tectónica del Cenozoico de la Cuenca de Falcón y sus áreas adyacentes. En este estudio el autor propone una teoría acerca de cómo fue la formación de la Cuenca de Falcón. Esta teoría sugiere que el movimiento transcurrente dextral entre el límite de placas Caribe – Suramérica genero una serie de cuencas tipo *pull apart*. Este proceso extensivo provocó el adelgazamiento de la corteza y en consecuencia cuerpos ígneos de composición basáltica intrusieron la cuenca en el Oligoceno evidenciando la actividad magmática en la región.

Audemard y De Mena (1985) generan un modelo estructural en base a la integración de información de geología de superficie, información de subsuelo, imágenes de radar, levantamientos gravimétricos y sísmicos. Proponen que la Cuenca de Falcón luego de su formación estuvo afectada por al menos tres regimenes compresivos, los cuales, le han otorgado a la cuenca su configuración actual y también sugieren, tomando información de otros autores, que la misma en la actualidad sigue estando afectada por esta ultima fase compresiva.

Boesi y Goddard (1991) proponen un modelo geológico conceptual relacionado con la distribución de las rocas productoras de hidrocarburos en la Cuenca de Falcón, el cual, puede ser aplicado en futuros trabajos exploratorios de hidrocarburos en la región. Ellos sugieren que la acumulación de hidrocarburos se restringe a las áreas costaneras de Falcón.

Audemard (1995) realiza una síntesis estratigráfica de la cuenca y propone una teoría acerca de su génesis e inversión tectónica.

Macellari (1995) estudia la sedimentación y tectónica de la cuenca *pull apart* del margen suroeste Caribeño, entre Venezuela y Colombia.

Porras (2000) estudia la evolución tectónica y los estilos estructurales de la región costa afuera de las cuencas de Falcón y Bonaire, postula un nuevo modelo para sus génesis y sugiere que la diversidad de estilos estructurales en las regiones costa afuera centro occidental de Venezuela son potenciales zonas reservorios de hidrocarburos. Esta teoría difiere de las demás, ya que propone que la cuenca de Falcón es una cuenca detrás de arco *back-arc* originada por colapsos extensionales internos.

### **1.5.2 Interpretación y restauración de secciones estructurales en superficie y subsuelo**

En el área de geología estructural se presentan innumerables artículos y referencias. Sin embargo, se realizó un resumen de los trabajos de mayor relevancia.

Dahlstrom (1969) presenta uno de los primeros trabajos acerca de secciones balanceadas, mostrando su basamento teórico y las reglas de las mismas.

Boyer y Elliott (1982) presentan un artículo acerca de los sistemas compresivos, en el cual proponen los principales marcos geométricos y su evolución, así como sus implicaciones mecánicas y la adición de nuevos modelos geométricos. De igual manera, tocan tópicos de restauración de secciones.

Elliott (1982) muestra cuales son los datos que se necesitan para la interpretación estructural y los cuatro niveles que se deben tener para la construcción de secciones balanceadas. Este autor discute los términos de viabilidad y admisibilidad de las interpretaciones estructurales.

Suppe (1983) explica la geometría y cinemática del modelo de “fault-bend-folding” o plegamiento asociado a fallas no planas. Presenta también las diferentes relaciones entre la forma de la falla y de la rampa y la forma del pliegue asociado a éstas.

Suppe (1985) publica un libro en el cual resume los modelos geométricos que él propone para los sistemas compresivos y cuales son los basamentos geométricos.

Cooper y Trayner (1986) muestran las geometrías involucradas en los sistemas compresivos y una revisión de las interpretaciones acordes a los conceptos que se manejan modernamente. Los autores concluyen que los principales factores que modifican las estructuras internas de las capas, son los que conducen a problemas a la hora de balancear las secciones.

McClay (1990) muestra un glosario de términos estructurales para fallas inversas, donde encuentran todos los conceptos más comunes usados en estos sistemas tectónicos.

Mount *et al.* (1990) describen las estrategias que se deben tomar cuando se trabaja en secciones balanceadas dentro de sistemas compresivos y extensivos, mostrando algunos ejemplos mundiales y modelos de interpretación basados en pliegues relacionados con fallas.

Suppe & Medwedeff (1990) Trabajaron en la geometría y cinemática de pliegues propagados en las terminaciones de fallas *fault-propagation-fold*. Presenta también las diferentes relaciones entre la forma de las rampas o fallas y la forma de los pliegues asimétricos asociados a éstas.

McClay & Buchanan (1992) estudia, mediante modelos de laboratorio, las posibles geometrías que se obtienen en una inversión estructural de un sistema extensivo. Este autor muestra las relaciones de la rampa y las diferentes geometrías de deformación que pueden presentarse en los bloques del techo y piso de la falla, según el acortamiento de la estructura.

Mitra (1993) publica un artículo relacionado con la geometría y cinemática de los sistemas compresivos de inversión formados por los mecanismos de *fault-propagation-folding* o plegamiento propagado por una falla, y *fault-bend-folding* o plegamiento asociado a fallas de buzamiento variable, específicamente en fallas lístricas. Mitra, propone que los cambios de espesores en las capas originados por la fase extensiva, caracterizan los cambios en la geometría de las capas que se observa cuando estas sufren una inversión estructural.

En el ámbito nacional se han realizado una gran variedad de trabajos en el área de geología estructural utilizando la restauración de secciones geológicas, los cuales han demostrado la efectividad del método y en algunos casos sus limitaciones, como por ejemplo: González, R. (1999), Castilla, R. (2001) y Parra, M. (2001).

## CAPÍTULO II

### GEOLOGÍA REGIONAL

En el presente capítulo se hace un breve análisis acerca de la evolución geológica de la cuenca de Falcón. Dicha cuenca presenta durante el Cenozoico varias fases evolutivas, ligadas estrechamente a la historia geodinámica del límite meridional de la placa Caribe (Audemard, 1995)

Previo a la formación de la cuenca terciaria de Falcón, se reconoce una fase compresiva de orientación norte-sur de edad Cretácico Tardío-Eoceno Medio (Audemard & De Mena, 1985) en la parte oriental de la región de Falcón, la cual generó el sobrecorrimiento de parte del alóctono caribe de edad Paleoceno-Eoceno Temprano, mientras que hacia el occidente, la plataforma carbonática de Maracaibo permaneció estable (Audemard, 1995).

Dicha fase compresiva se cree fue consecuencia del contacto entre la placa Caribe con la placa Suramericana, el cual se produce de manera transpresiva destal, creando deformación a todo el frente norte del continente Suramericano.

Audemard & De Mena (1985) consideran que esta fase compresiva se atenuó durante el Eoceno Medio-Tardío.

A partir de ese momento comienza a generarse una fase distensiva en todo el límite entre las placas Caribe y Sudamérica trayendo como consecuencia la formación de una serie de cuencas a lo largo de dicho margen y dentro de las cuales se encuentra la cuenca de Falcón.

La cuenca terciaria de Falcón presenta disyuntivas en cuanto a su génesis, esto se debe a la diversidad de teorías que han presentado geólogos nacionales e internacionales desde principios del siglo XX, periodo en el cual comienza la exploración petrolera en esa región.

A continuación se presentan algunas de las teorías acerca de la formación de la cuenca: Muessig (1984) menciona que la cuenca de Falcón se originó en el Cenozoico como consecuencia de efectos transtensionales relacionados con fallas transcurrentes como las Fallas de Oca y San Sebastián. Macellari (1995) postuló que la cuenca evolucionó a partir de desplazamientos laterales durante el Eoceno, que dieron origen a una serie a de cuencas *pull apart* episuturales. Audemard

(1995) atribuye el origen de la cuenca a una fase *rifting* de edad Eoceno Tardío-Oligoceno generalizada en todo el margen septentrional venezolano. Porras (2000) por su parte considera que el origen de la cuenca Falcón-Bonaire está asociado a colapsos extensionales internos dentro de una cuenca detrás de arco (*back arc*), en un orógeno en flotación que colisionó oblicuamente con el extremo noroccidental de la placa Suramericana, suturándose diacrónicamente de oeste a este desde el Cretácico Tardío hasta comienzos del Mioceno Temprano.

Los diferentes calendarios tectónicos propuestos para la cuenca de falcon son mostrados en la figura 2.1.

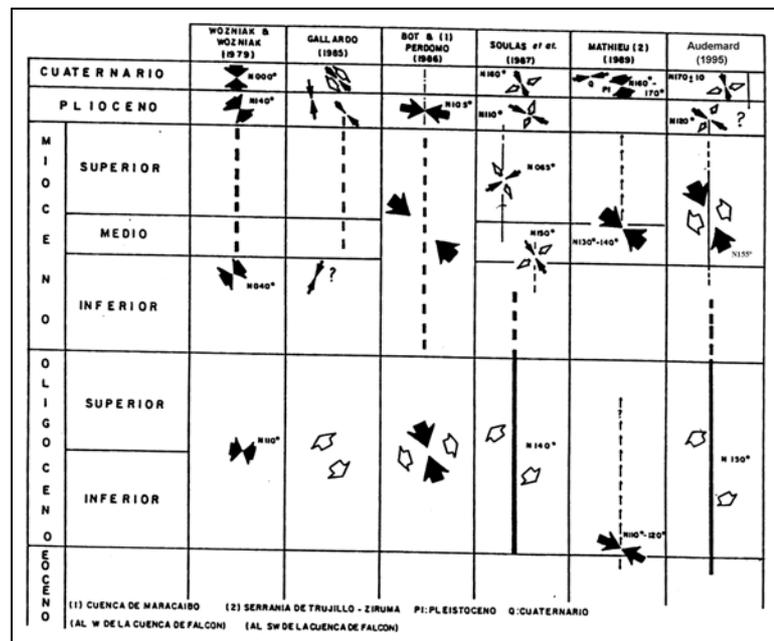
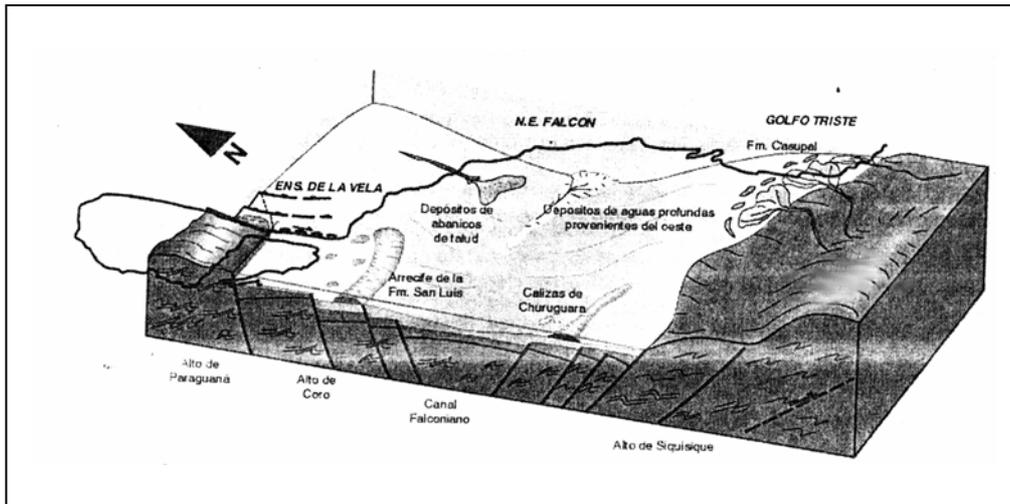


Fig. 2.1. Diferentes calendarios tectónicos propuestos para el Noroeste venezolano. Tomado y modificado de Audemard (1995).

Esta cuenca estructuralmente es un graben estrecho muy alargado limitado por fallas normales de buzamiento opuesto y centrípeto (Audemard, 1995, ver figura 2.2). Geométricamente presenta una forma elongada que está orientada en dirección este-oeste aproximadamente (Wheeler, 1960; Díaz de Gamero, 1977; Macellari, 1995, Audemard, 1995). Boesi & Goddard (1991) llegan a la conclusión de que la cuenca tiene forma de un “bote” ó “fondo de saco” y que dicha forma condicionó la distribución sedimentaria durante la historia depositacional Oligoceno-Mioceno.



**Fig. 2.2 Modelo sedimentario-estructural esquemático de la Cuenca de Falcón Bonaire durante el Oligoceno-Mioceno inferior. Tomado de Porras (2000)**

Los límites de la cuenca son zonas emergidas a todo lo largo de sus márgenes sur y oeste y parcialmente cerrada al norte por la “isla” de Paraguaná, estando abierta al golfo de Venezuela por intermedio del surco de Urumaco, el cual, separa a su vez las zonas emergidas de Dabajuro al oeste y de Paraguaná al NE (ver figura 2.3). Esta cuenca está conectada a la cuenca marina profunda de Bonaire por el este y por tal motivo algunos autores le han asignado el nombre de cuenca Falcón Bonaire.



**Fig. 2.3 Mapa paleogeográfico de la región noroccidental de Venezuela para el Mioceno inferior. Tomado de González de Juana *et al.*, (1980).**

Wheeler (1960) sugiere que la sedimentación en la cuenca se produce diacrónicamente de este a oeste sobre una gran discordancia angular situada sobre la Formación Paují del Eoceno. Las rocas prediscordancias son las pertenecientes al alóctono Caribe y a la plataforma carbonática de Maracaibo. El mismo autor menciona que de estas rocas solo las de edad Eoceno afloran en la región de Falcón y que consisten en lutitas con interstratificaciones de grauvacas, subgrauvacas y areniscas ortocuarcíticas y localmente, conglomerados.

Los primeros sedimentos depositados en la cuenca se distribuyeron sobre un ambiente de aguas someras. Estos pertenecen a la Formación Cerro Misión ubicada al sureste de la misma (ver figura 2.4). Ésta tiene más de 400 m de espesor y consiste en lutitas negras calcáreas.

Progresivamente hacia el centro y demás áreas de la cuenca se deposita el Grupo Agua Negra de edad Eoceno Medio parte superior (Macellari, 1995). El Grupo Agua Negra lo constituyen las Formaciones Santa Rita, Jarillal y La Victoria. La Formación Santa Rita se encuentra depositada discordantemente sobre la Formación Paují. Consiste de 400-500 m de areniscas, margas arenosas intercaladas con calizas con orbitoides y conglomerados de grano grueso. La Formación Jarillal descansa concordantemente sobre la Formación Santa Rita y esta está comprendida de más de 375 m de lutitas oscuras más o menos arenosas las cuales se hacen estériles hacia la sección superior de la unidad (Macellari, 1995). En la parte superior del Grupo Agua Negra está la Formación La Victoria, esta comprende 2400 m de lutitas negras con intercalaciones de areniscas y carbón (Sutton, 1946; Guevara, 1967). La Formación La Victoria fue depositada en un ambiente predominantemente lacustrino con incursiones de aguas salobres (Sutton, 1946; González de Juana *et al.*, 1980).

Sobre estas rocas se encuentra la secuencia estratigráfica Oligoceno-Mioceno Inferior (Boesi & Goddard, 1991, ver figuras 2.4 y 2.5). Este periodo se caracterizó por una continua subsidencia y una invasión progresiva del mar desde el noreste.

Díaz de Gamero (1977) menciona que las rocas oligocenas, a diferencia de las más antiguas, afloran extensamente en el centro de la cuenca de Falcón, en una



ancha franja de dirección N70E entre las sierras de San Luis y Churuguara (ver figura 2.3).

Debido a que para este entonces la cuenca poseía dimensiones más grandes que en su inicio, la sedimentación fue distribuida por zonas, de las cuales han sido reconocidas cinco áreas diferentes (Macellari, 1995), siendo estas:

**Zona Central:** La sedimentación de la zona central se inicia con la Formación El Paraíso de edad Oligoceno Temprano a la parte superior de Oligoceno Temprano (ver figura 2.4), que consiste en una intercalación de lutitas y areniscas de amplia distribución en la cuenca. Concordantemente por encima se tiene un espeso cuerpo de lutitas oscuras las cuales pertenecen a la Formación Pecaya de edad Oligoceno parte media - Mioceno Temprano, de distribución aún más extensa que la anterior. La Formación Pecaya contiene una cuña de unos 25 km de extensión longitudinal, constituida por la intercalación de lutitas y areniscas de grano fino, perteneciente al Miembro San Juan de la Vega de la Formación Pecaya. Sobre esta unidad, se encuentra la Formación Pedregoso conformada por una intercalación rítmica de lutitas oscuras con calizas y areniscas en capas delgadas, que representa una sedimentación turbidítica al frente del arrecife de San Luis. La Formación Pedregoso, de extensión reducida, puede considerarse como una variación de facies dentro de la Lutita de Pecaya (ver figura 2.4). Por encima de las unidades mencionadas, se encuentra la Formación Agua Clara, esencialmente lutítica, de edad Mioceno Temprano (Díaz de Gamero, 1977).

**Oeste de Falcón:** Al oeste de la cuenca de Falcón, la Formación Pedregoso se hace más arenosa y espesa y además se correlaciona lateralmente con la Formación Castillo (Wheeler, 1960) (ver figura 2.4). Según Macellari (1995) la Formación Castillo se encuentra concordante sobre las lutitas de Pecaya. Más hacia el oeste, está en contacto angular sobre estratos del Eoceno. La Formación Castillo consiste de areniscas y conglomerados y menores cantidades de lutitas y mantos de carbón. Debido a la carencia de fósiles índice, se le ha asignado una edad Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano en base a las relaciones estratigráficas (González de Juana *et al.*, 1980).

**Alto de Coro:** durante este periodo, a lo largo de la margen sur del alto de Coro, se desarrolló el complejo arrecifal de San Luis, (Wheeler, 1960, ver figura

2.4). La Formación San Luis, consiste de una maciza caliza arrecifal con foraminíferos grandes, algas, y localmente, corales y bivalvos. Ésta unidad pasa gradualmente a la Formación Patiecitos hacia el sur, hacia el este y el oeste se interdigita con el Grupo Mitare y otras facies laterales de la Formación San Luis y hacia el norte se acuña al aproximarse al alto de Paraguaná.

Falcón Sur-Central: en esta área se tiene a la Formación Churuguara de edad Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano (ver figura 2.5), la cual se encuentra en contacto concordante sobre la Formación Jarillal al igual que con la Formación Agua Clara situada por encima. Díaz de Gamero (1977) menciona que la litología existente en este conjunto de rocas es muy variada y consiste de lutitas con intercalaciones de calizas arenosas y areniscas calcáreas, calizas arrecifales masivas, calizas fosilíferas delgadas, areniscas glauconíticas, y limonitas. Según Wheeler (1960) la Formación Churuguara hacia el oeste pasa transicionalmente a la Formación Castillo, hacia el sur y sureste es transicional con la Formación Casupal, hacia el norte es transicional con la facies de aguas profundas del Grupo Mitare y la parte inferior de la Formación Agua Clara. Esta correlación se basa más en evidencias estratigráficas que en trazado directo de una unidad dentro de otra.

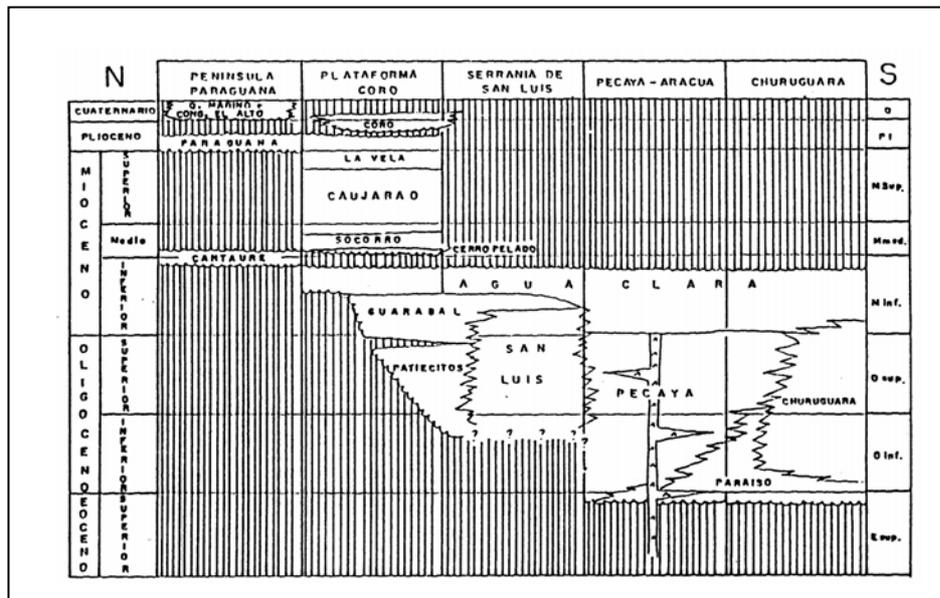


Fig. 2.5. Tabla de correlación de las unidades litoestratigráficas de la Cuenca de Falcón de norte a sur. Tomado de Audemard (1995).

Este de Falcón: Según Macellari (1995), el área este de la cuenca de Falcón durante el periodo Oligo-Mioceno Temprano también formó una gran variedad de facies, en donde se tienen al norte del alto Esperanza-Guacharaca un depósito de lutitas de aguas profundas denominado Grupo Agua Salada, al sur de este alto, los estratos son de grano mas grueso y son incluidos dentro de las Formaciones Casupal y Guacharaca

Aproximadamente alineados a lo largo de lo que probablemente fuera la parte más profunda de la cuenca, se encuentra una serie de cuerpos ígneos de composición máfica (ver figura 2.5). Escorihuela & Rondon (2002) asignan a estas rocas una composición basáltica alcalina intraplaca. Estas parecen, en su mayoría, intrusionar la parte inferior de la sección. Se encuentran solamente desde el sur de La Cruz de Taratara, hasta unos kilómetros al sureste de Pueblo Nuevo en una orientación promedio N70E. Según Muessig (1984) estas rocas son similares a otras asociaciones de rocas ígneas continentales típicamente asociadas a procesos *rifting*, y le asigna una edad K-Ar de 22,9 +/- 9 Ma. Estas intrusiones en afloramiento solo se encuentran cortando las Formaciones El Paraíso y Pecaya (ver figura 2.5), alcanzando su máximo en el límite oligoceno-Mioceno reafirmando la edad obtenida por métodos radiométricos.

Audemard (1995) señala que la cuenca de Falcón se forma durante una fase de *rifting* de edad Oligoceno y su colmatación es completada por la sedimentación de la Formación Agua Clara. La subsidencia tectónica concluye aproximadamente en el límite Oligoceno-Mioceno con las últimas intrusiones y coladas basálticas, y la Formación Agua Clara representa la sedimentación durante la subsidencia térmica.

Durante el periodo Mioceno Medio-Tardío la cuenca de Falcón es afectada nuevamente por procesos tectónicos. Esta vez se genera una fase compresiva proveniente del sur de la cuenca. Boesi & Goddard (1991) atribuyen este evento al movimiento dextral de la falla de Boconó, este movimiento trajo como consecuencia la Formación de una serie pliegues paralelos ubicados en el centro de la cuenca y que se encuentran orientados en dirección este-noreste, a este grupo de pliegues se les conoce como el anticlinorio de Falcón; además se desarrollaron corrimientos paralelos a estos pliegues siendo uno de los más conocidos el

corrimiento de Guadalupe ubicado cerca del pueblo de La Vela. Este sistema deformacional creció en intensidad en este periodo culminando con la inversión de la cuenca. Audemard & De Mena (1985) deducen que esta fase compresiva tuvo una orientación N 20-30 W basándose en el rumbo de las fallas inversas y de las estructuras plegadas. Las fallas inversas son el resultado de la reactivación de las fallas normales de orientación N 60-70 E, activas durante la fase extensiva previa. El otro sistema de fallas normales de orientación N 20-40 W se reactivó como fallas transcurrentes dextrales con desplazamientos horizontales de poca magnitud. Este último sistema de fallas segmenta en compartimientos individuales a la cuenca, donde cada bloque se acorta aisladamente.

Como consecuencia directa de la inversión de la cuenca se produce el desplazamiento de los procesos sedimentarios hacia el flanco norte del anticlinorio (Boesi & Goddard, 1991; Macellari, 1995; Audemard, 1995, ver figura 2.5). Nuevamente las áreas levantadas del sur formaran parte del área fuente de sedimentos que se distribuirán por toda la extensión del flanco norte del anticlinorio de Falcón y la región este indeformada.

El conjunto de rocas Mioceno medio-superior dentro de la nueva cuenca se ha clasificado según las áreas de depositación dentro de las cuales se reconocen cinco zonas.

Área Central: la sedimentación en esta zona comienza con la Formación Cerro Pelado. Esta unidad de edad Mioceno Medio inferior consiste principalmente de lutitas arenosas laminadas y carbones intercalados con areniscas de grano fino. La Formación Cerro Pelado se encuentra en contacto discordante sobre la Formación Agua Clara (ver figuras 2.4 y 2.5). Esta tiene más de 1000 m de espesor y es reemplazada hacia el este por el Grupo Agua Salada. Por encima se tiene a la Formación Socorro, esta unidad de edad Mioceno Medio se divide en dos secciones, inferior y superior. La sección inferior está comprendida por lutitas mientras que la superior son intervalos de areniscas de grano fino las cuales forman parte de las rocas reservorio del petróleo en el campo de Cumarebo (Macellari, 1995), esta unidad se deposita en un ambiente costero hacia el este y se fue haciendo gradualmente más marino profundo hacia el este (González de Juana *et al.*, 1980). La Formación Socorro pasa gradualmente hacia

arriba a la Formación Urumaco en el área del surco de Urumaco, más al este y hacia las zonas centrales pasa a la Formación Caujarao. La Formación Caujarao se distingue por contener 1220 m de lutitas e intercalaciones de margas, calizas y areniscas y esta fue depositada en un ambiente de plataforma marina sobre un mar tropical caliente (Macellari, 1995). La Formación Urumaco se depositó en facies más proximales que la Formación Caujarao y consiste en lutitas marinas y no marinas, areniscas y mantos de carbón. La Formación La Vela yace encima en contacto concordante con la Formación Caujarao en el área de Coro (ver figuras 2.4 y 2.5) e incluye 590 m de areniscas calcáreas intercaladas con lutitas reflejando un ambiente deposicional estuarino (González de Juana *et al.*, 1980). El rango de edad de la Formación La Vela está comprendido entre el Mioceno Tardío y el Plioceno Temprano. Hacia el este la Formación La Vela es sucedida por la Formación El Veral la cual representa una facies más marina mientras que hacia el oeste es sucedida por la Formación Codore la cual pertenece a una facies más continental (Macellari, 1995).

Oeste de Falcón: los sedimentos depositados al oeste de Falcón durante las etapas tempranas del Mioceno Medio pertenecen al Grupo o Formación La Puerta. Esta unidad comprende arcilitas, areniscas y lignitos y por encima areniscas masivas que a su vez están recubiertas por lutitas multicolores. Se cree que la depositación ocurrió en un área de piedemonte costero con un área fuente localizada al sur (González de Juana *et al.*, 1980). Sobre la plataforma de Dabajuro, la Formación La Puerta descansa directamente sobre estratos eocenos (Macellari, 1995) (ver figura 2.4).

Noreste de Falcón: en esta zona los sedimentos depositados incluyen la parte superior del Grupo Agua Salada al norte y la Formación Pozón al sur. La parte superior del Grupo Agua Salada en esta sección pertenece a la Formación El Salto. La Formación El Salto es un depósito deltáico relacionado a una falla de crecimiento y a procesos de corrientes de turbidez. Al sur de la Formación Pozón se encuentra la secuencia de aguas carbonáticas someras de la Formación Capadare, la cual comienza su sedimentación en el Mioceno Medio temprano.

Falcón Sur-Central: aquí las areniscas y conglomerados de la Formación Casupal son sucedidas por la Formación Agua Linda (ver figura 2.4) la cual, está

constituida por lutitas, arcillas y calizas. La Formación Agua Linda está en contacto concordante sobre Casupal y por encima la Formación Capadare se encuentra discordante.

Audemard (1995) menciona que en el límite Mioceno-Plioceno una nueva fase compresiva vuelve a afectar a la cuenca de Falcón, esta fase es responsable de la discordancia que separa a las formaciones superiores del Grupo La Puerta, Codore y El Veral de las formaciones inferiores del Grupo La Puerta, Urumaco y Caujarao (ver figura 2.4). Esta discordancia no es de carácter regional pero puede ser observada en diversos sitios de la cuenca de Falcón a excepción de la plataforma de Coro. Por su parte (Macellari, 1995) no observo ninguna discordancia entre las formaciones mencionadas y las coloca en su trabajo en contacto concordante. Dicha discrepancia no se discute en este informe ya que no es parte de su objetivo. Audemard (1995) menciona que durante esta fase tectónica el surco de Urumaco fue invertido a consecuencia de la compresión asociada a la transurrencia dextral del sistema de fallas Oca-Ancón y al campo de esfuerzos reinante durante esta fase tectónica. Este mismo autor sugiere que la edad de esta inversión esta evidenciada por la discordancia poco desarrollada de la Formación Codore sobre la Formación Urumaco (ver figura 2.4).

Los nuevos sedimentos que se depositan en la cuenca lo hacen siguiendo el mismo patrón de sedimentación formado en el ciclo anterior el cual consistió en una variación lateral del tamaño de grano de los sedimentos siendo hacia el oeste los de grano más grueso y se hacen progresivamente más finos hacia el este.

En este ciclo los sedimentos se depositaron de forma discordante sobre las rocas del ciclo Mioceno Medio-Tardío. En el área central de la cuenca la Formación Coro yace discordantemente sobre la Formación La Vela (ver figura 2.4). La Formación Coro es caracterizada por lentes de conglomerados de grano fino a grueso y naturaleza variable (González de Juana *et al.*, 1980), hacia el oeste, sobre la Formación Codore se depositó la Formación San Gregorio, esta consiste de limolitas, areniscas y conglomerados, arcilitas ocasionales y capas fosilíferas (González de Juana *et al.*, 1980), más hacia el este, sobre el Grupo Agua Salada y la Formación Pozón se deposita la Formación Punta Gavilán, esta se distingue por una intercalación de calizas margosas y margas fosilíferas con

lutitas. En la misma zona pero sobre la Formación El Veral se tiene a la Formación Tucupido representada por calizas y arcillas y algunas capas fosilíferas.

Audemard (1995) señala una última fase compresiva de edad Plio-Pleistoceno la cual es responsable de la configuración actual de la cuenca de Falcón, él menciona que la misma sigue la misma orientación NW de las fases compresivas anteriores y que continúa siendo activa en la actualidad y en consecuencia es la responsable del movimiento de los sistemas de fallas siguientes:

- Sistema NW-SE (Río Seco, Urumaco, Lagarto, fallas de la costa oriental Falconiana) con movimiento transcurrente dextral (R);
- Sistema NNW-SSE (Los Médanos, Cabo San Román, Puerto Escondido, costa occidental de Paraguaná) en fallas normales;
- Sistema N-S a NNE-SSW (Carrizal, El Hatillo) en transurrencia sinistral (R');
- Cabalgamiento de Cuchure-La Mina de Coro-Guadalupe de dirección ENE-WSW y otros menores de igual orientación (Araurima, Matapalo);
- Sistema de fallas de Oca-Ancón de dirección general este-oeste, según un movimiento dextral básicamente compresivo.

La sedimentación posterior a esta fase se extiende hasta hoy día y básicamente consiste en depósitos continentales exceptuando las áreas costaneras.

## **CAPÍTULO III**

### **GEOLOGÍA LOCAL**

#### **3.1 ESTRATIGRAFÍA**

En el siguiente subcapítulo se hace una breve descripción de la estratigrafía encontrada en las distintas quebradas pertenecientes al área de estudio.

La clasificación de las unidades litoestratigráficas se realizó utilizando como guía la información estratigráfica plasmada en el mapa de la Creole Petroleum Corporation, haciendo comparaciones con las referencias bibliográficas disponibles y con la información de campo recolectada. A partir de ello, se pudo ubicar a las rocas descritas en campo dentro de sus formaciones litoestratigráficas respectivas.

Debido a que el análisis detallado de las unidades litoestratigráficas no se encuentra dentro de los objetivos propuestos en este trabajo, la información que aquí se expresa es muy superficial y es por tal razón, que no se recomienda utilizarla para realizar análisis estratigráficos a detalle. Sin embargo las descripciones litológicas realizadas en el campo, fueron suficientes para ubicar e identificar las unidades litoestratigráficas existentes en la zona de estudio.

Cada unidad se ha descrito de base a tope con la finalidad de seguir su secuencia en cuanto a edad y posición original de depositación en la cuenca. Los espesores de estas unidades no fueron medidos en campo, gracias a que, como se dijo en párrafos anteriores, esta labor no se encuentra dentro de los objetivos de este trabajo.

##### **3.1.1 Formación Paují (Tep)**

**3.1.1.1 Ubicación Geográfica:** Esta unidad aflora en los siguientes puntos: A3, A4, A5, D1, M12, M13 (ver figura 3.1).

**3.1.1.2 Descripción Litológica:** Esta unidad consiste de lutitas de color gris oscuro a negro, las cuales, presentan concreciones ferruginosas de diversos tamaños, estas concreciones contienen chert en su núcleo. Se encuentran

interestratificadas con areniscas calcáreas de color marrón claro, presentando algunas huellas de carga y limolitas.

**3.1.1.3 Contactos:** El contacto inferior no aflora en el área de estudio. El contacto superior es discordante angular con la base de la Formación Santa Rita. Este contacto solo fue visto al inicio del sector D en el punto D1 (ver Foto 3.1).

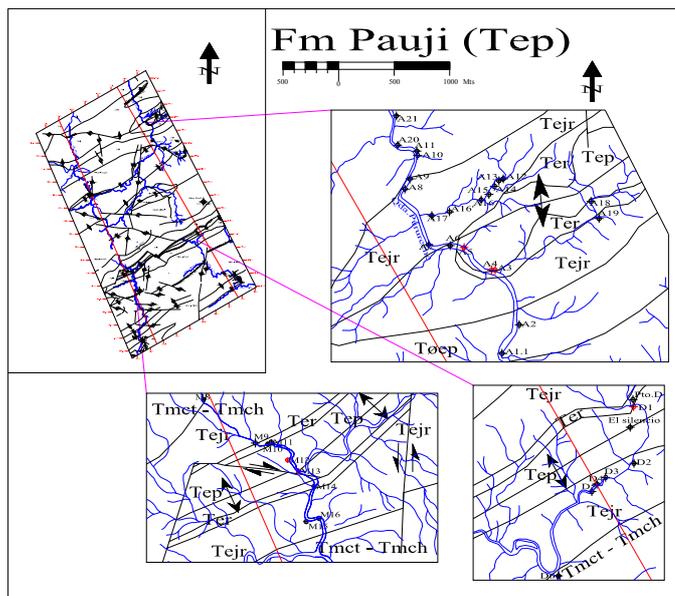


Fig. 3.1. Localización de los puntos de afloramiento de la Formación Paují (Tep).

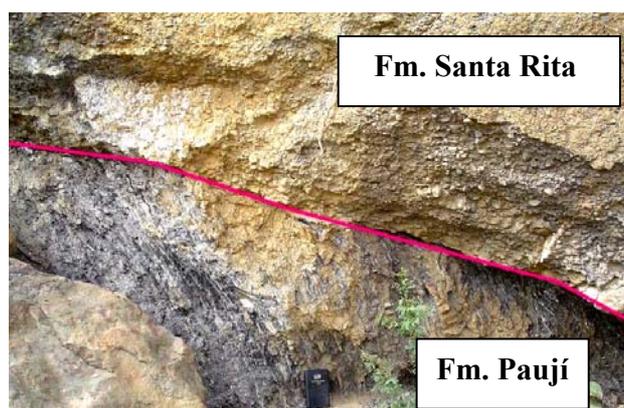
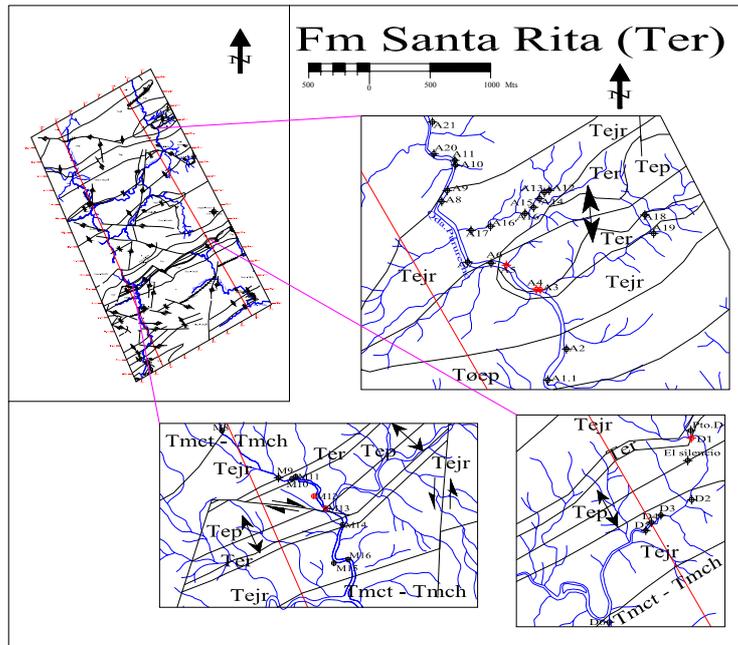


Foto 3.1. La foto muestra un contacto discordante angular, en donde, por encima se tiene una espesa capa de conglomerado de la Formación Santa Rita (Ter) y debajo se tiene un grupo de lutitas de la Formación Paují (Tep). Rumbo de la foto: N55E. Pto D1

### 3.1.2 Formación Santa Rita (Ter)

**3.1.2.1 Ubicación Geográfica:** Esta unidad aflora en los siguientes puntos: A3, A18, D1, M9, M10, M11, M14 (ver figura. 3.2).



**Fig. 3.2.** Localización de los puntos de afloramiento de la Formación Santa Rita (Ter).

**3.1.2.2 Descripción Litológica:** Esta unidad consiste de conglomerados calcáreos en su mayoría de color gris claro, gris oscuro y marrón con tonos rojizos (ver foto 3.2). Estos conglomerados se encuentran hacia la base de esta unidad. Por encima se tiene una intercalación de lutitas y limolitas de color negro con areniscas calcáreas a veces conglomeráticas, su color varia de gris claro a gris oscuro, presentan algunos moldes de bivalvos; calizas color gris claro con fósiles de turrítulas de hasta 4 cm. de largo y bivalvos y areniscas de grano fino de color gris oscuro con moldes de bivalvos.

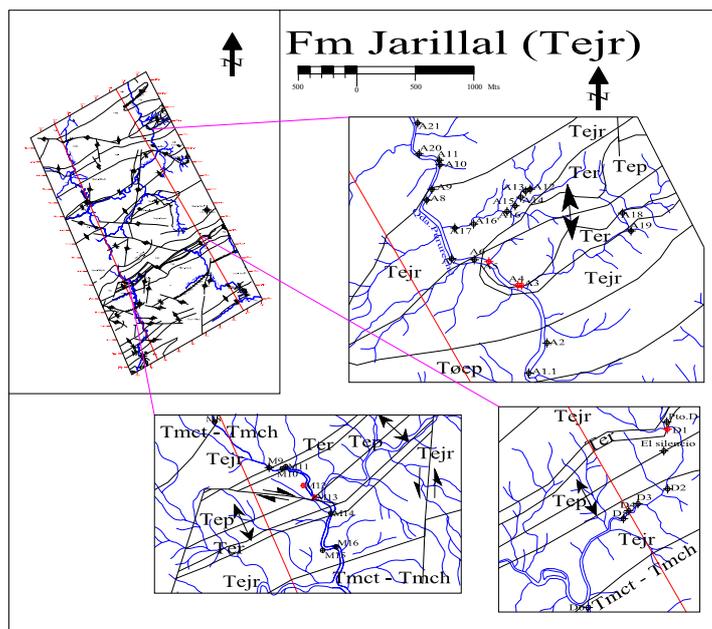
**3.1.2.3 Contactos:** El contacto inferior es discordante angular con la Formación Paují. Este contacto solo fue visto aflorando al inicio del sector D en el punto D1 (ver foto 3.1). El contacto superior es concordante transicional con la Formación Jarillal.



**Foto 3.2. Conglomerado perteneciente a la Formación Santa Rita (Ter). Se observan gránulos de chert, cuarzo y calizas**  
**Rumbo: N65E. Pto. M14**

### 3.1.3 Formación Jarillal (Tejr)

**3.1.3.1 Ubicación Geográfica:** Esta unidad aflora en los siguientes puntos: A6 - A9, A12 - A17, A19, D2 - D5, M11, M15, M16 (ver figura 3.3).

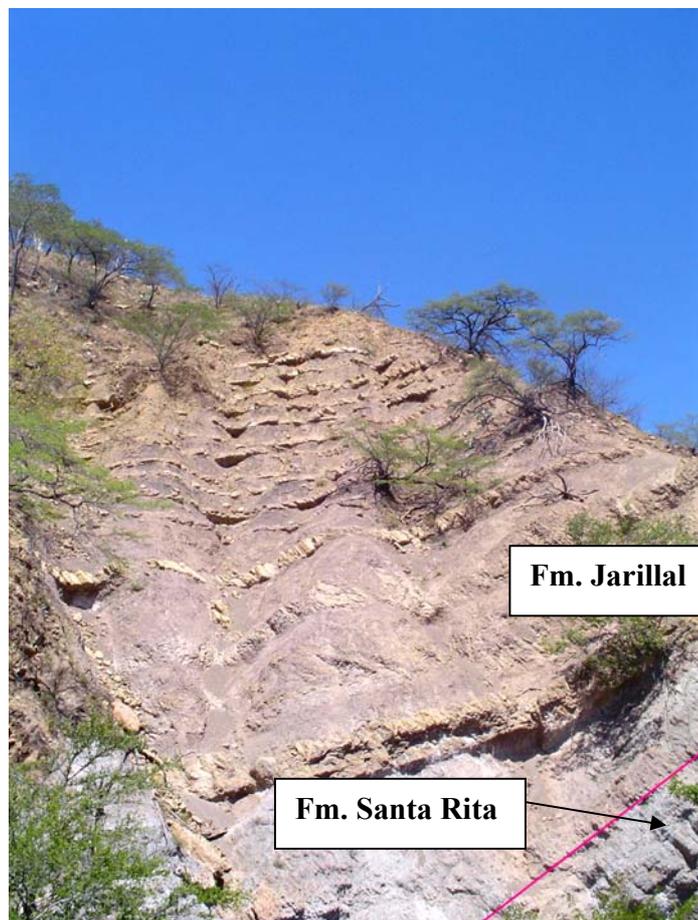


**Fig. 3.3. Localización de los puntos de afloramiento de la Formación Jarillal (Tejr).**

**3.1.3.2 Descripción Litológica:** Esta unidad consiste principalmente de lutitas de color negro con intercalaciones esporádicas de capas de areniscas calcáreas gris claro, limolitas gris oscuro y marrón claro (ver foto 3.3) y hacia el tope calizas marrón claro y gris plomo. Las limolitas presentan concreciones ferruginosas, moldes y algunas conchas de bivalvos. En las areniscas calcáreas se encuentran rizaduras de

corriente y estas se presentan bioturbadas (se observan ophiomorphas), además se observan delgados (1-5 cm) niveles conglomeráticos dentro de estas areniscas. También se encuentran conglomerados que son de color ocre y algunos de ellos son calcáreos.

**3.1.3.3 Contactos:** Los contactos inferior y superior de esta unidad son concordantes transicionales con las formaciones Santa Rita y El Paraíso, respectivamente (ver foto 3.3).



**Foto 3.3. Afloramiento representativo del contacto entre las formaciones Santa Rita y Jarillal. Rumbo: S-N. Pto. M11.**

### **3.1.4 Formación El Paraíso (T $\phi$ ep)**

**3.1.4.1 Ubicación Geográfica:** Esta unidad aflora en los siguientes puntos: A1.1, A2, A10, A11, A20 - A22, A25 - A29, I5 - I27 (ver figura 3.4).

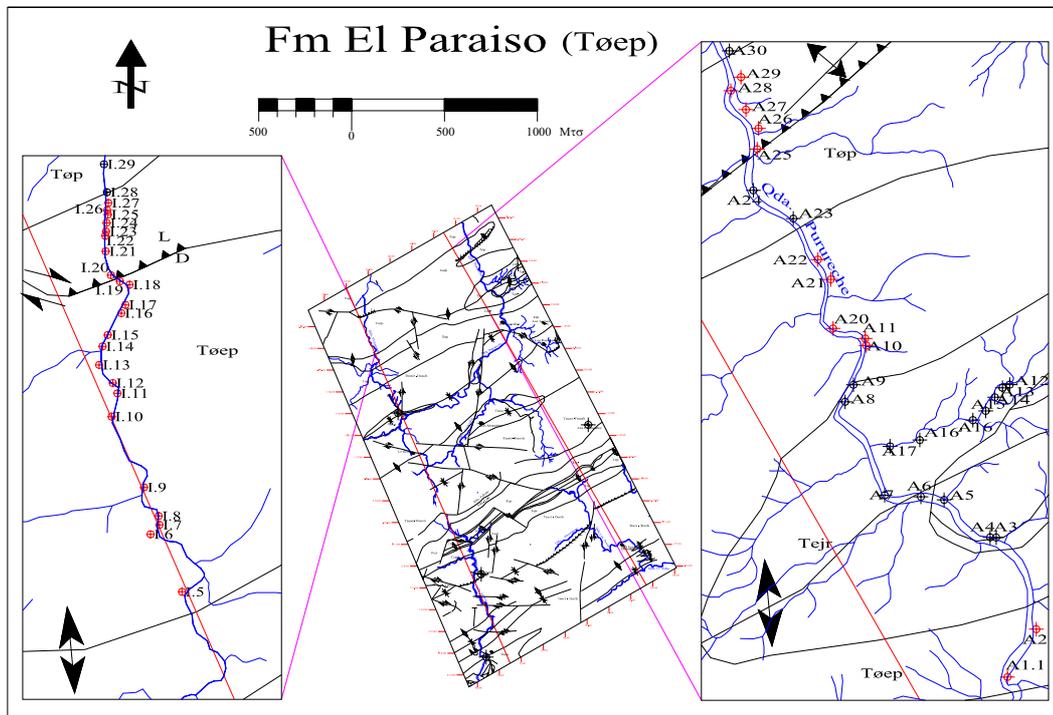


Fig. 3.4. Localización de los puntos de afloramiento de la Formación El Paraiso (Tøep).

**3.1.4.2 Descripción Litológica:** Esta unidad se puede dividir en dos subunidades. La subunidad inferior está compuesta por areniscas calcáreas de color gris claro a marrón, las cuales, están intercaladas con lutitas y limolitas de colores oscuros. Dentro de esta intercalación se encuentran pequeños cuerpos de caliza y conglomerados. En la subunidad superior, las areniscas pierden su carácter calcáreo y continúan intercalándose con lutitas y limolitas. Este rasgo se aprecia en la sección A-A' hacia el norte del punto A21 y en la sección I-I' hacia el norte del punto I5. Otra característica resaltante es que las areniscas hacia la parte superior de la unidad son granodecrecientes, estas son de color marrón claro con tonos naranja y rojo dados por la meteorización de los óxidos de algunos minerales de hierro (ver foto 3.4).

La gran mayoría de las areniscas presentan rizaduras de corriente, estratificación cruzada y huellas de carga; algunas presentan estratificación gradada normal; hacia la base el tamaño de grano es grueso llegando a ser conglomerático

(guijarros) y se hace más fino a medida que se acerca hacia el tope de la secuencia. Las limolitas en su mayoría contienen nódulos y concreciones de material ferruginoso.

**3.1.4.3 Contactos:** Los contactos inferior y superior de esta unidad son concordante transicional con las formaciones Jarillal y Pecaya respectivamente.



**Foto 3.4. Afloramiento representativo de la Formación El Paraíso (Tøp). Intercalación de areniscas calcáreas y lutitas negras. Rumbo: N55E. Pto A25**

### **3.1.5 Formación Pecaya (Tøp)**

**3.1.5.1 Ubicación Geográfica:** Esta unidad aflora en los siguientes puntos: A1, A23, A24, A30, B18 - B21, 128, I29 (ver figura 3.5).

**3.1.5.2 Descripción Litológica:** Esta unidad consiste de lutitas de colores negro a gris oscuro (ver foto 3.5), interestratificadas con areniscas calcáreas de color gris oscuro, las cuales contienen abundantes nódulos de material ferruginoso. También se encuentran calizas de color gris oscuro con presencia de moldes y conchas de bivalvos y por último se observan areniscas no calcáreas, de color naranja, el cual, es dado por la meteorización de óxidos de hierro.

En la sección I-I', específicamente en el punto I29 la lutita es de color negro (ver foto 3.5) y en algunos sitios se observa un abundante contenido de fósiles de bivalvos de aproximadamente 5 cm de diámetro en su mayoría.

**3.1.5.3 Contactos:** Los contactos inferior y superior de esta unidad son concordante transicional con las formaciones El Paraíso y Churuguara-Castillo (sin diferenciar), respectivamente. Hacia la sección B-B', se puede apreciar que el contacto de la Formación Pecaya con Churuguara-Castillo (sin diferenciar) es un

contacto de falla (ver anexo 1).

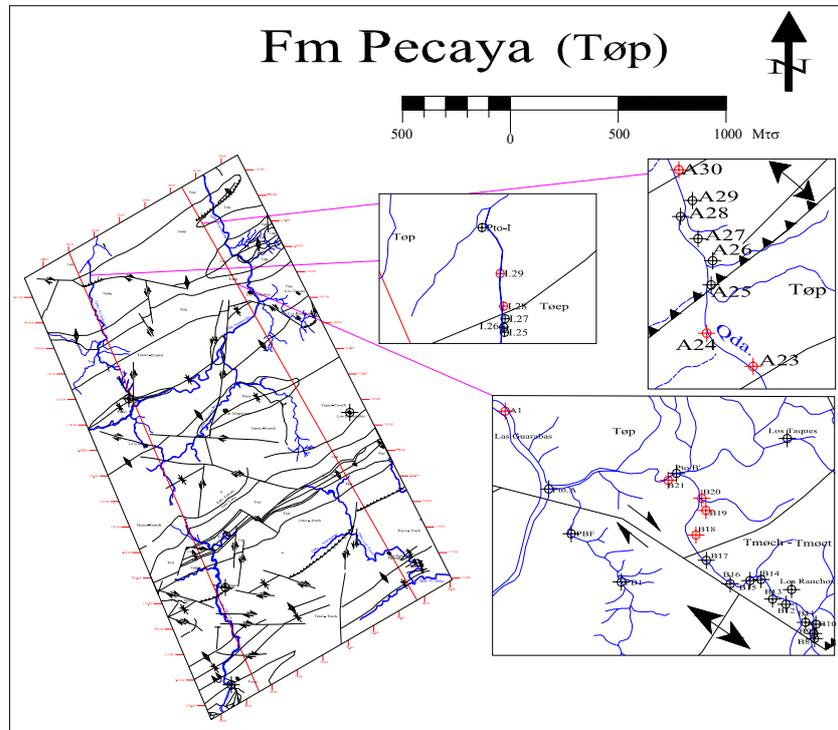


Fig. 3.5. Localización de los puntos de afloramiento de la Formación Pecaya (Tøp).



Foto 3.5. Afloramiento representativo de la Formación Pecaya (Tøp). Lutitas de color negro. Rumbo: S80W. Pto I29

### **3.1.6 Formación Churuguara-Castillo (sin diferenciar) (Tmøch- Tmøct)**

**3.1.6.1 Ubicación Geográfica:** Esta unidad aflora en los siguientes puntos: B1- B17, C5 - C25, D6 - D43, I1 - I3, J1 - J16, J18 - J30, K1 - K11, L1 - L24, M1 - M8, M17 - M77 (ver figura 3.6).

**3.1.6.2 Descripción Litológica:** Esta unidad consiste de areniscas interestratificadas con lutitas y limolitas (ver foto 3.6).

Hacia la base de la unidad, las areniscas son de color gris oscuro y varían desde areniscas de grano fino a medio con rizaduras, estratificación cruzada y estratificación flaser. En la parte media de la unidad, se observan areniscas fosilíferas de grano fino, las cuales contienen moldes y conchas de bivalvos y nódulos de óxidos de hierro y hacia el tope de la unidad se tienen areniscas cuarzosas de grano medio de color gris claro con algunos puntos rojos “posible óxido de hierro”.

Las lutitas y limolitas son de colores oscuros y unas pocas de color verde oscuro.



**Foto 3.6. Afloramiento representativo de la Formación Churuguara-Castillo (sin diferenciar) (Tmøch- Tmøct). Rumbo: W-E. Pto M48.**

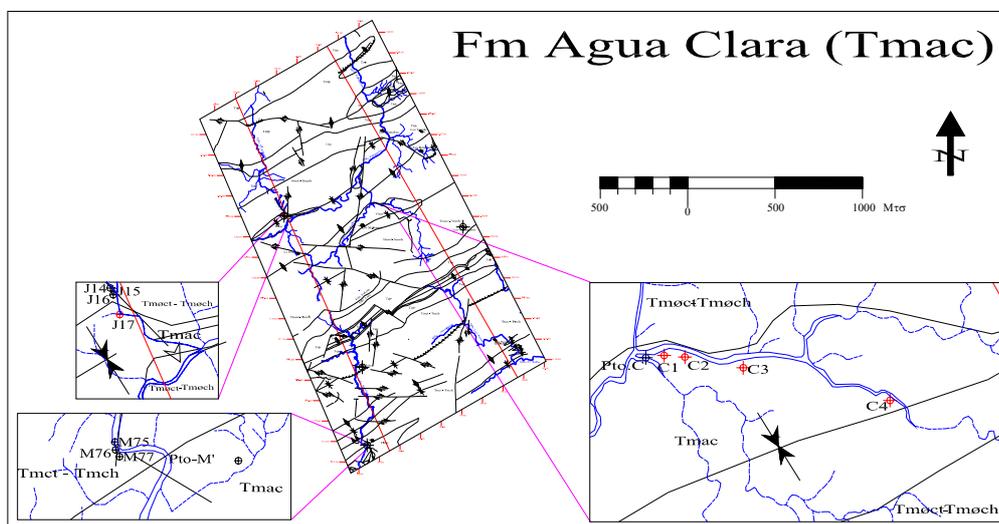
En el punto M28 se observó una intercalación de areniscas de grano fino con lutitas de color negro, dentro de esta intercalación hay una capa de carbón de poco espesor (1 m aproximadamente).



**3.1.6.3 Contactos:** Los contactos inferior y superior de esta unidad son concordante transicional con las formaciones Pecaya y Agua Clara, respectivamente, en la zona norte del área de estudio. El contacto de esta unidad en la zona sur del área de estudio es concordante con la Formación Jarillal infrayacente, el contacto superior con la Formación Agua Clara se mantiene concordante transicional.

### 3.1.7 Formación Agua Clara (Tmac)

**3.1.7.1 Ubicación Geográfica:** Esta unidad aflora en los siguientes puntos: C1 – C4, J17, Pto. M' (ver figura 3.7).



**Fig. 3.7. Localización de los puntos de afloramiento de la Formación Agua Clara (Tmac).**

**3.1.7.2 Descripción Litológica:** Esta unidad consiste en una intercalación de lutitas de color negro con areniscas de color naranja (ver foto 3.7). Las areniscas presentan espesores menores al de las lutitas, el cual no supera los 2 m. Estas rocas muestran huellas de carga.

**3.1.7.3 Contactos:** El contacto inferior de esta unidad es transicional con la Formación Churuguara-Castillo (sin diferenciar). El contacto superior es desconocido ya que este no aflora en la zona de estudio.

## **3.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL**

La geología estructural local se dividió en dos partes, las cuales son estructuras planares y secciones balanceadas, descritas a continuación:

### **3.2.1 Estructuras Planares:**

Las mediciones de estructuras planares se basaron en estructuras tales como: planos de estratificación, superficies de fallas, planos axiales, limbos de pliegues y diaclasas; además de estructuras lineales tales como estrías de fallas (medición de pitch, plunge y cinemática de la falla según criterios microtectónicos) y ejes de pliegues. De esta manera estas han sido divididas en: estratificación, diaclasas, fallas y pliegues.

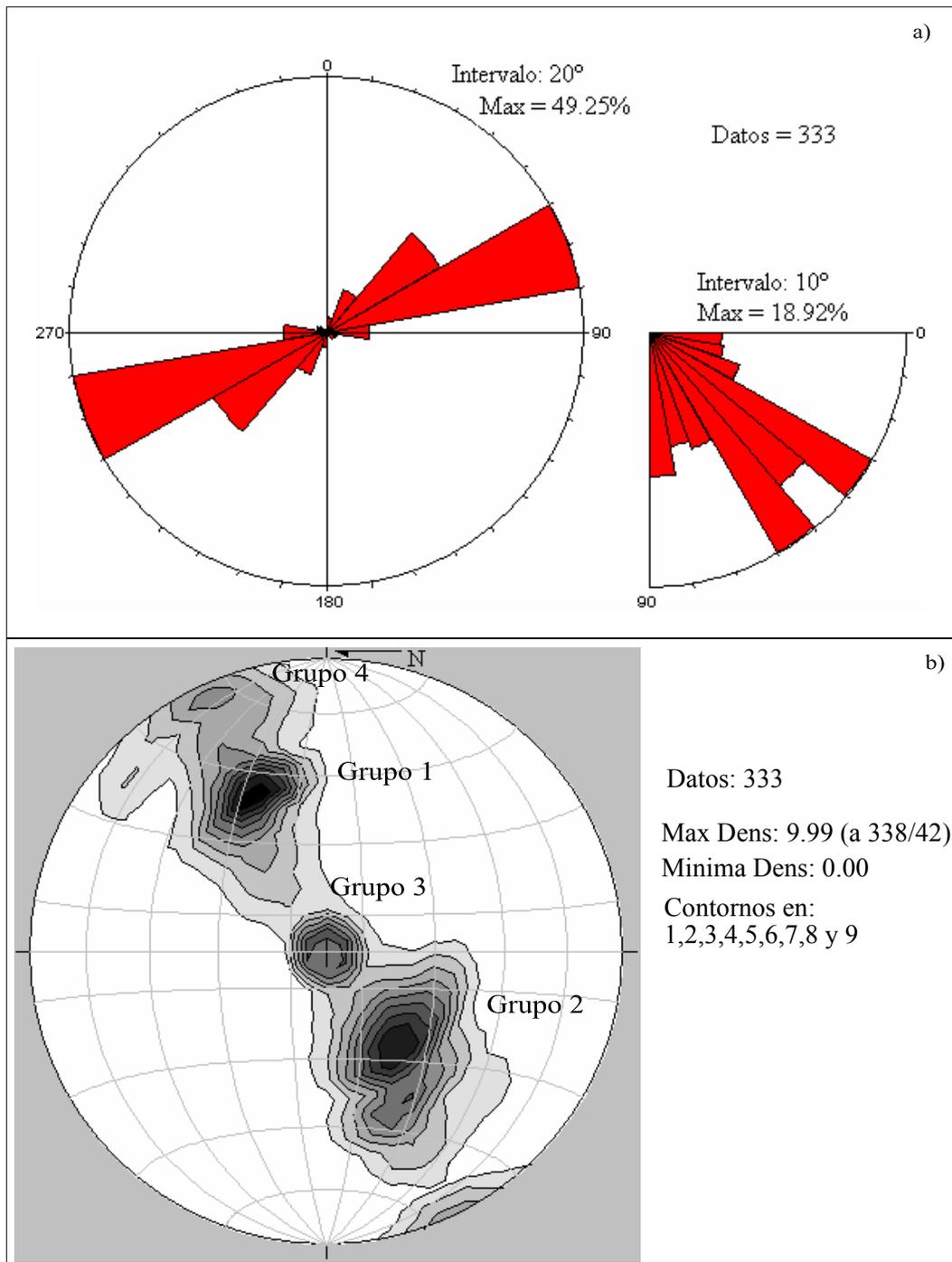
#### **3.2.1.1 Estratificación:**

Esta se basó en 333 mediciones de rumbo y buzamiento de planos de estratificación (ver apéndice 1) a lo largo de las secciones antes mencionadas. La orientación preferencial del rumbo de dichas capas es N60E a N80E (ver figura 3.8a) representando esto el 49,25% de la población total de mediciones realizadas (aproximadamente 164 datos). Casi la totalidad de los demás datos se encuentran concentrados en una dirección semejante (NE-SW).

La magnitud de los buzamientos es muy variada, sin embargo, el 18,92% de los datos se encuentran en los intervalos comprendidos entre 30°–40° y 50°–60° (aproximadamente 63 datos para cada uno). También se encuentra una gran población de datos entre 50°–60°, verticales a subverticales y horizontales a subhorizontales (ver figura 3.8a). En el diagrama de polo de la figura 3.8b se observa también que la gran mayoría de los buzamientos (los dos intervalos de 18,92%) están ubicados en las direcciones de 30°–40° y 50°–60°, buzando los primeros hacia el norte y los segundos hacia el sur.

De esta manera los planos de estratificación se pueden concentrar en 4 grupos según su buzamiento: Grupo 1: (30°–40°)N, Grupo 2: (50°–60°)S, Grupo 3: Planos horizontales a subhorizontales (0°–10°)N ó S, Planos verticales a subverticales

(lamayoría buza al sur).



**Fig. 3.8. a) Diagrama de rosas de la actitud de la estratificación.  
b) Diagrama de densidad de polos de la estratificación.**

### 3.2.1.2 Diaclasas

Se realizaron 83 mediciones de la actitud de estas estructuras (ver apéndice 1), su longitud relativa (pequeña, media o grande) y su frecuencia en los distintos afloramientos medidos en campo.

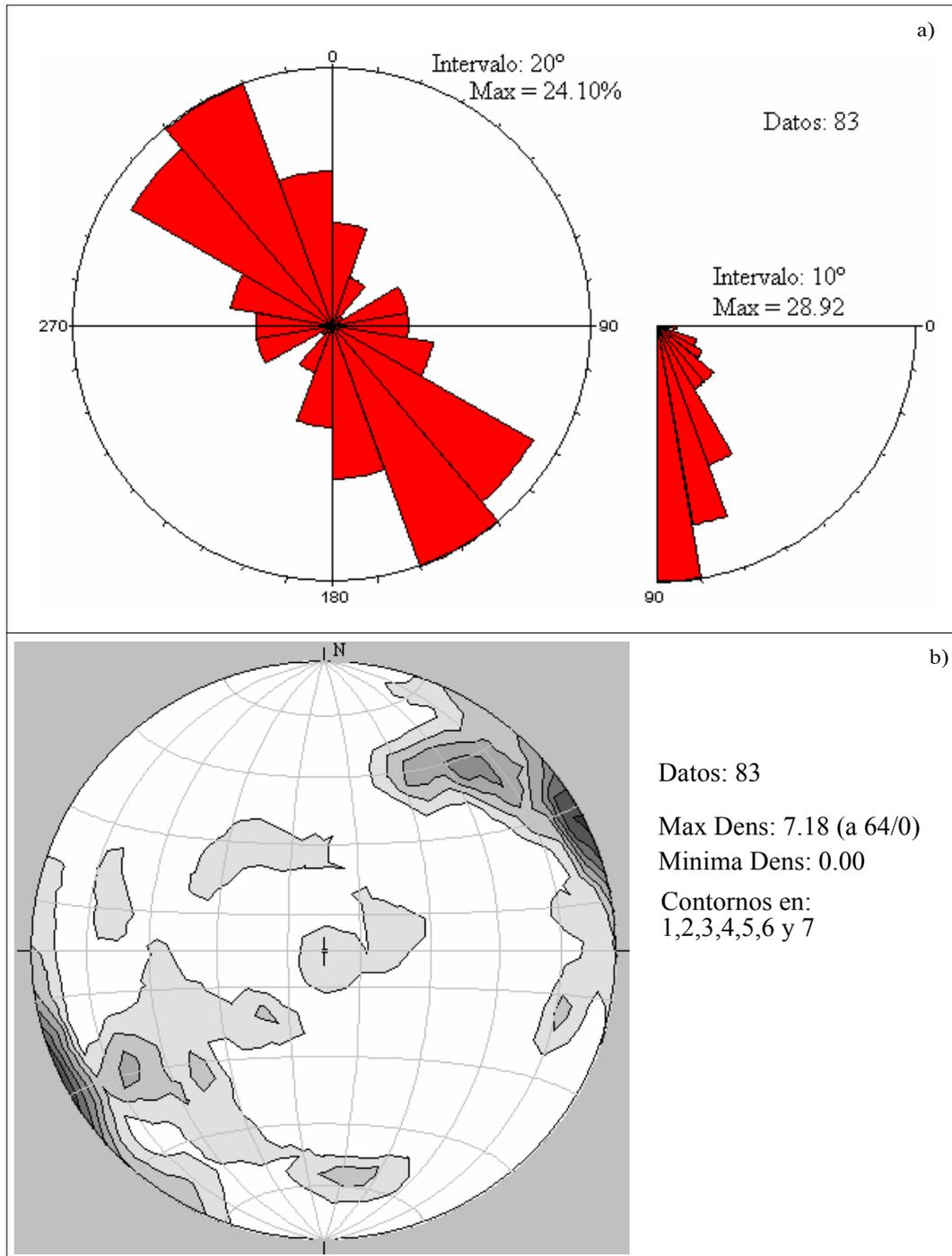
La orientación preferencial de las diaclasas es N20W a N40W, representando esto el 24,1% (aproximadamente 20 datos) de la población total de las mediciones. El 21,6% (aproximadamente 18 datos) de dicha población está concentrado en diaclasas que poseen un rumbo comprendido entre N40W a N60W. El resto del porcentaje (51,3%) se encuentra distribuido en diaclasas de orientación N-S y E-W aproximadamente, siendo las primeras más abundantes que las últimas (ver figura 3.9a).

Los buzamientos de las diaclasas son mayormente de verticales a subverticales, estando el 28,92% entre 80° y 90°, el 22,86% entre 80° y 70°, mientras que el resto presenta buzamientos variados entre 0° y 70° (ver figura 3.9a).

En el diagrama de densidad de polos de la figura 3.8b se observa que la máxima agrupación está asociada a datos de diaclasas subverticales a verticales con rumbos entre N30W y N40W. Además se observa que el contorno de densidad número cinco (5) agrupa datos que son N(40-60)W(70-80)S y existe una gran variedad de datos dispersos entre los rumbos y buzamientos descritos en los diagramas de rosas.

La longitud relativa de las diaclasas es grande (más de 1 m) y poseen una orientación preferencial N(30-40)W vertical, N(40-60)W(70-80)S (ver fotos 3.7 y 3.8) y el resto de las diaclasas se encuentran en el intervalo comprendido entre 5 y 99 cm y se orientan N-S y E-W. En los afloramientos con mediciones de diaclasas (ver apéndice 1) la frecuencia de dichas estructuras es en promedio pequeña, lo que significa que por cada metro cuadrado hay de una (1) a cinco (5) diaclasas.

Debido a la consistencia en la orientación de las diaclasas, estas se agruparon en diaclasas sistemáticas, para las primeras dos orientaciones y diaclasas dispersas para el resto de la población.



**Fig. 3.9. a) Diagrama de rosas de la actitud de las diaclasas.  
b) Diagrama de densidad de polos de las diaclasas.**



**Foto 3.7 Representación de las diaclasas encontradas en el grupo N(40-60)W(70-80)S. Diaclasas grandes con poca frecuencia  
Rumbo de la foto: S45E.  
Pto. C7.**



**Foto 3.8 Representación de las diaclasas N20-40W Vertical en sistema ortogonal con diaclasas con orientación N-S 40S. Se observan diaclasas de tamaño grande con poca frecuencia.  
Rumbo de la foto: W-E,  
Pto. L11.**

### **3.2.1.3 Fallas**

Se caracterizaron 107 planos de fallas a partir de su rumbo y buzamiento, además de las estructuras lineales (estrías) de aquellos que las poseían. De las 107 mediciones estructurales, 51 (**muestra 1**) fueron mediciones realizadas sobre planos

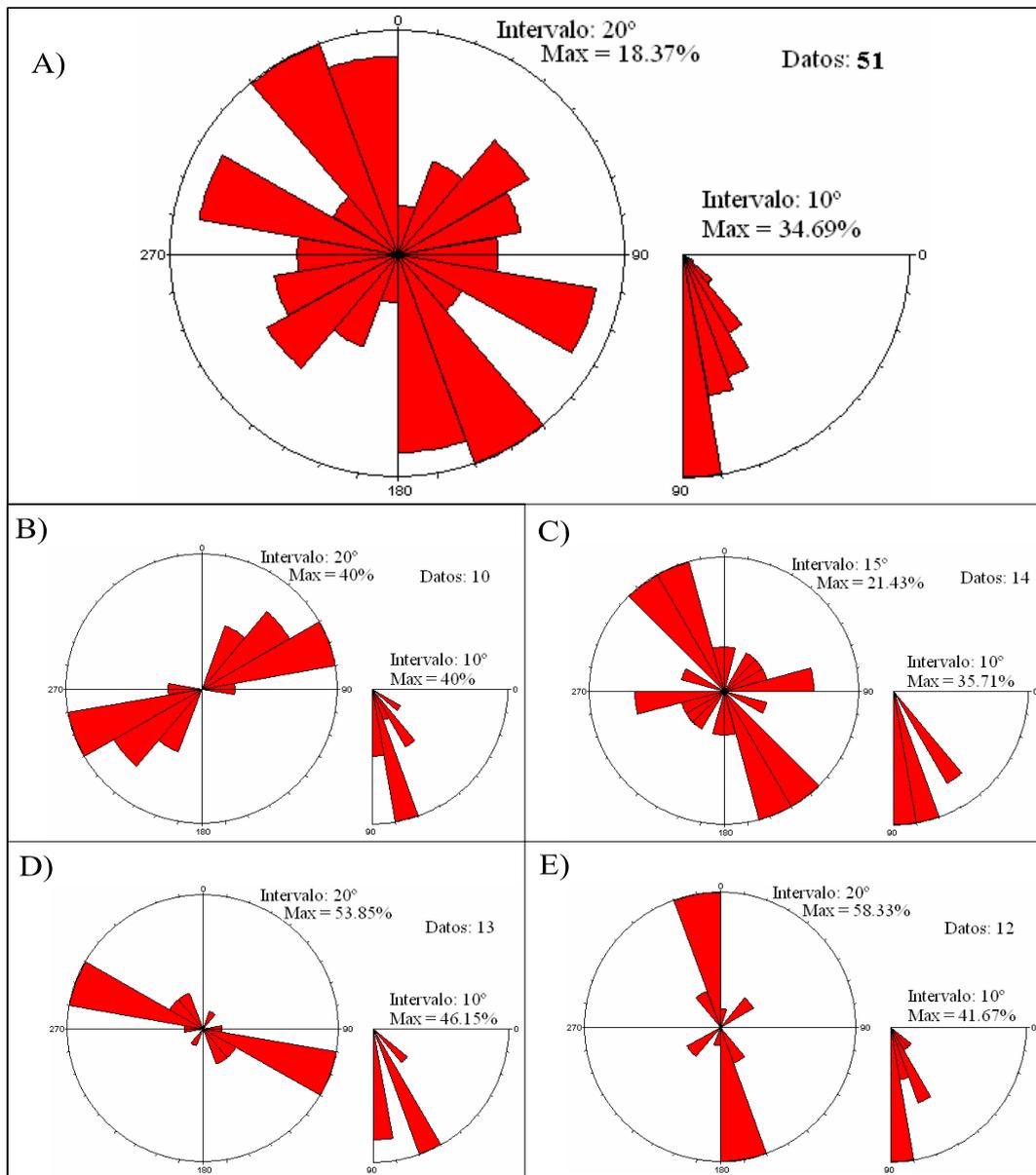
de falla en los cuales no se observaron estrías ni movimiento aparente. A los 56 planos restantes (**muestra 2**) sí se les pudo hacer mediciones de estrías, tales como, “pitch”, “plunge” y movimiento aparente según los criterios microtectónicos. De esta manera, la muestra 2 fue tomada para realizar el análisis estadístico y de paleoesfuerzos según la metodología de Etchecopar *et al.* (1981) y la del diedro recto de Angelier (1979) (ver apéndice 2).

A partir del diagrama de rosas obtenido con los datos de la muestra 2, se observa que existen cuatro (4) orientaciones principales para las fallas (ver figura 3.10a), en donde el rumbo predominante es N20-40W y posee el 18,37% de la muestra total (aproximadamente 9 datos). También se observan dos direcciones de rumbo importantes que representan el 16% de la muestra (aproximadamente 8 datos), estas son N0-20W y N60-80W y por último se observa una población variada de fallas que representa el 40% de la muestra y está orientada NE-SW con su máximo entre N50-80E. Los buzamientos de todas estas fallas son variados sin embargo predomina la inclinación vertical.

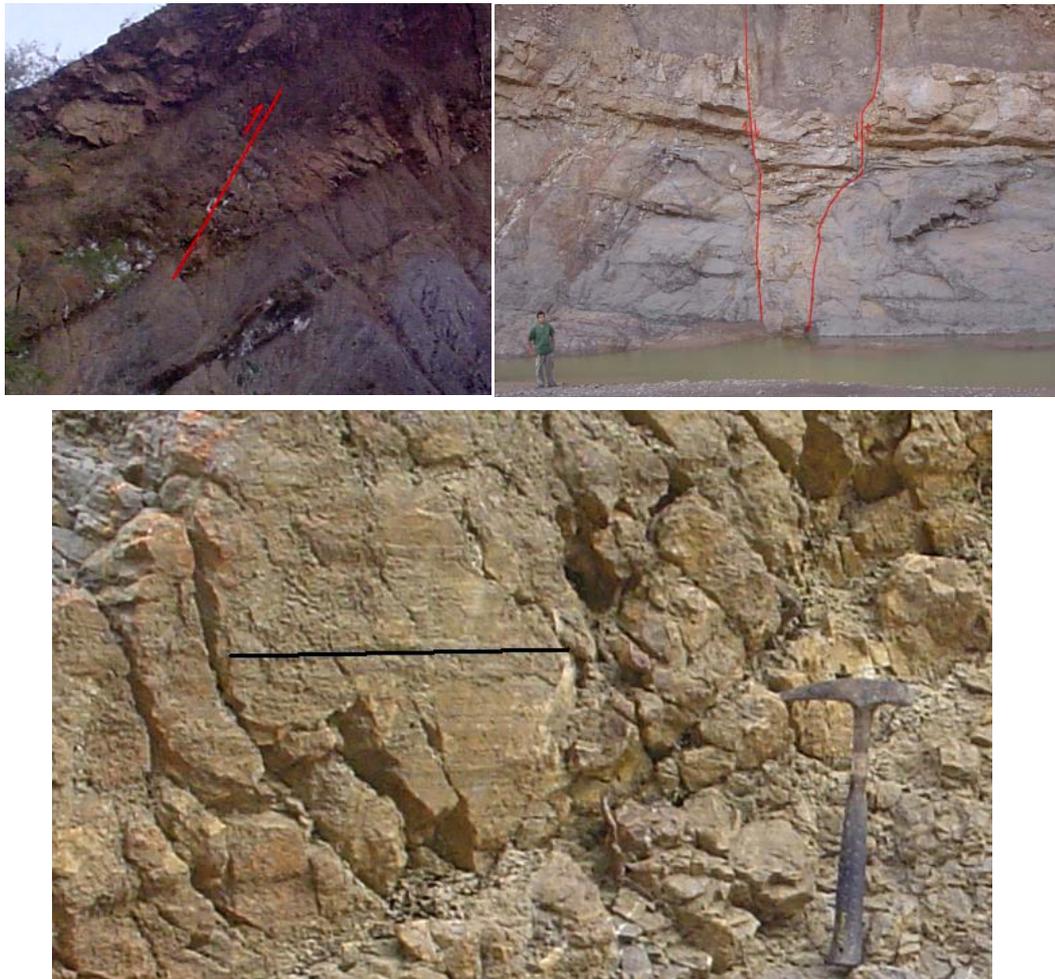
Las poblaciones de fallas medidas se dividieron en inversas, normales, transcurrentes dextrales y transcurrentes sinestrales (ver figuras 3.10 b, c, d y e y fotos 3.9 a, b y c). Las fallas inversas (10 datos) presentaron un rumbo preferencial entre N60E y N80E representando esto el 40% de la población total de fallas (4 fallas), mientras que el resto de los datos se ubican entre N20E a N60E. Las fallas normales (14 datos) se dividen en dos grupos importantes, el grupo mayor orientado N15W a N45W, las cuales representan el 42,46% (6 fallas) de los datos y el segundo grupo va de N85E a E-W (14,43 % igual a 2 fallas). Las fallas transcurrentes dextrales (13 datos) presentaron un rumbo preferencial entre N60W y N80W, representando el 53,85% de los datos (7 fallas). Las fallas transcurrentes sinestrales (12 datos) presentaron un rumbo preferencial de N-S a N20W representando el 58,33% de los datos (7 fallas).

En general la magnitud del buzamiento para todos los tipos de fallas va desde 90° a 50°. Para las fallas inversas 70°-80°, fallas normales 70°-90° y 50°-60°, fallas

transcurrentes dextrales 60°-70° y 80°-90° y las fallas transcurrentes sinestras 80°-90°.



**Fig. 3.10. a) Diagrama de rosas de la actitud de todos los planos de falla con mediciones de estrías.  
 b) Diagrama de rosas de la actitud de todos los planos de falla inversos.  
 c) Diagrama de rosas de la actitud de todos los planos de falla normales.  
 d) Diagrama de rosas de la actitud de todos los planos de falla transcurrentes dextrales.  
 e) Diagrama de rosas de la actitud de todos los planos de falla transcurrentes sinestras.**



**Foto. 3.9. Superior izquierdo: Falla inversa (N60E70N) y capa (N45E 55N), rumbo de la foto: N50E, Pto. M32. Superior derecho: Fallas Normales (N25W70S y N25W80N), rumbo de la Foto (N60W), Pto. C24. Inferior: Falla Transcurrente sinistral (N10W70S), mostrando estrías con pitch: 0°. Rumbo de la foto: N60W. Pto. C19.1.**

### **3.2.1.3.1. Fases de Deformación**

Para la determinación de las fases de deformación, primero se observó que las formaciones Paují y Santa Rita son discordantes, indicando esto un cambio abrupto en los ambientes sedimentarios que posiblemente fue originado por variaciones en el régimen tectónico para esa entonces. Además se tomaron los datos de todas las fallas de la muestra 2 y se analizaron con el método de Etchecopar *et al.* (1981). En esta prueba el histograma de fluctuaciones angulares se comportó de manera polimodal,

en este caso con tres máximos visibles, indicando la presencia de al menos tres fases de deformación.

### 3.2.1.3.2. Paleoesfuerzos

Para el análisis de paleoesfuerzos a partir de las poblaciones de fallas de la muestra 2, se utilizaron los programas StereoNett versión 2.46, creado por Johannes Duystes (2000) y TectonicsFP versión 1.62, creado por Reiter & Acs (2003). Con la ayuda de estos programas se utilizaron las metodologías de Angelier y Etchecopar, ya que estas se han mostrado eficaces en varios estudios regionales previos (tales como: Casas *et al* (1990), Audemard (1993) y Espinula & Ollarves (2002) entre otros).

De esta manera la muestra 2 se dividió principalmente en cuatro grupos. El **grupo 1** consta de fallas encontradas en rocas de edad Oligoceno, el **grupo 2** consta de fallas encontradas en rocas de edad Eoceno, el **grupo 3** consta de fallas normales de edad Oligoceno con orientación NE-SW (ver figura 3.10c) y el **grupo 4** consta de fallas en donde se encontraron dos tipos de estrías. Esta división de grupos se realizó apoyados en la geología regional de la zona, en donde se explica que las rocas de edad Eoceno son las que sufren la mayor parte de la extensión de la cuenca, las de edad Oligoceno fueron afectadas tanto por la fase de extensión como por la fase de compresión siendo la última predominante y en que las fallas normales originadas durante la apertura de la cuenca son de orientación NE-SW. El propósito de esto es dividir la muestra de fallas en posibles distintas fases de deformación.

**-GRUPO 1:** este se dividió en siete (7) subgrupos de fallas, en donde cada grupo se encuentra entre los ejes de los pliegues principales (ver figura 3.11), es decir, en los limbos de dichos pliegues. El criterio para la división en grupos es que el estilo estructural principal de la zona es el plegamiento y es probable que estas fallas estén afectadas por el plegamiento, generando basculamiento de estas. Los subgrupos son descritos a continuación:

**-Subgrupo 1:** Este subgrupo consta de cuatro fallas (ver figura 3.12a) y está ubicado al sur de la sección D (ver figura 3.11 y foto 3.10).



El histograma de fluctuaciones angulares (ver figura 3.12b) para este subgrupo, presenta una sola clase de datos, es decir, 100% de los datos, la cual se encuentra entre 0 y 0,1 radianes (6°) de desviación angular entre las estrías prácticas y teóricas.

El círculo de Mohr (ver figura 3.12c) muestra que para el sistema de esfuerzos teórico mostrado en la figura 3.12d la totalidad de los planos tienen poca probabilidad de haber llegado a sobrepasar la línea de resistencia intrínseca de la roca, sin embargo es posible la generación de estas fallas bajo este régimen de esfuerzos. El Rapport

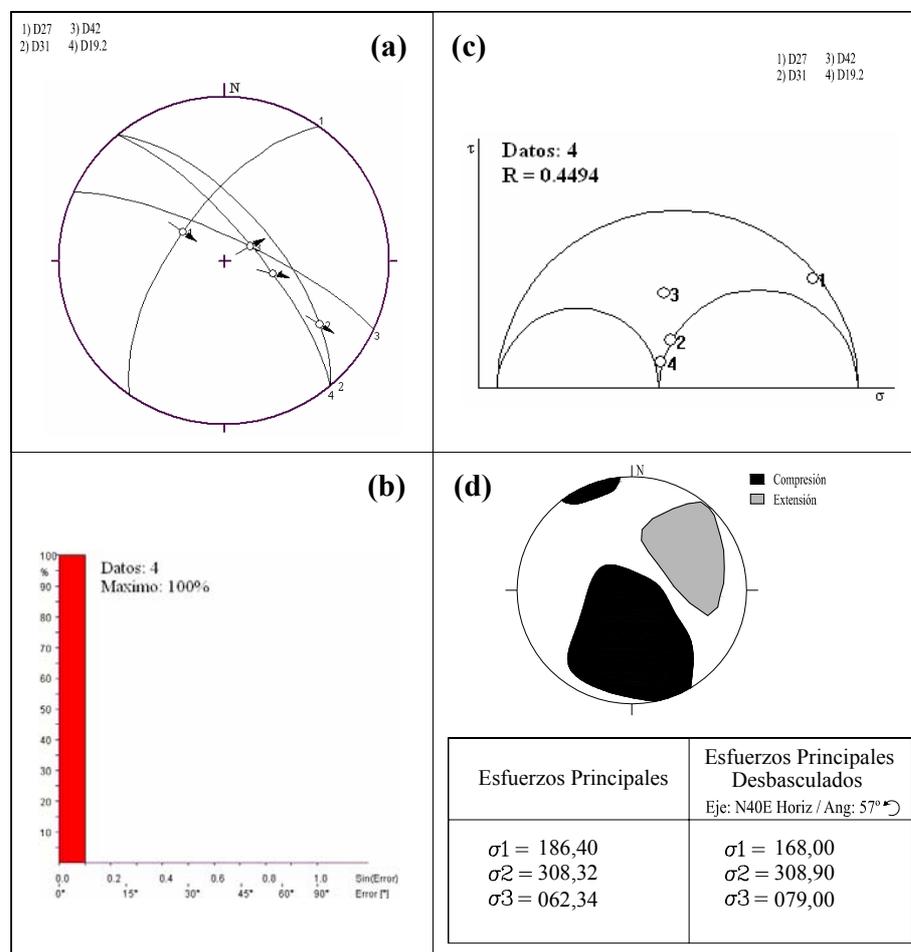
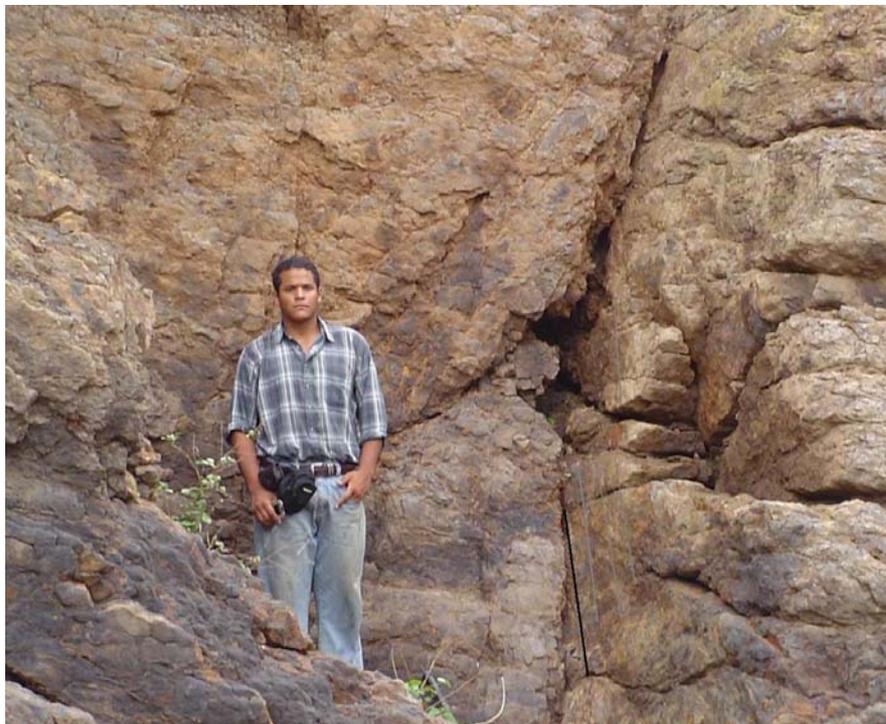


Fig. 3.12. a) Representación en red Estereográfica de Schmidt de los planos de falla y sus estrías, b) Histograma de desviaciones angulares, c) Círculo de Mohr y Rapport (R), d) Diedro recto (según Angelier (1979)) y sistemas de esfuerzos teórico y desbasculados.

generado es de 0,45 con el  $\sigma_2$  vertical, a partir de lo cual se interpreta que el régimen tectónico para la formación de estas fallas fue transcurrente compresivo.

Por otra parte en el diedro recto (ver figura 3.12d) se observa cierta semejanza entre las zonas compresivas con el  $\sigma_1$  teórico y las zonas distensivas con el  $\sigma_3$  teórico. Además los esfuerzos principales teóricos fueron desbasculados  $57^\circ$  en sentido antihorario a lo largo de la recta N40E Horizontal, para de esta manera obtener las direcciones de esfuerzos originales (Pre-basculamiento).

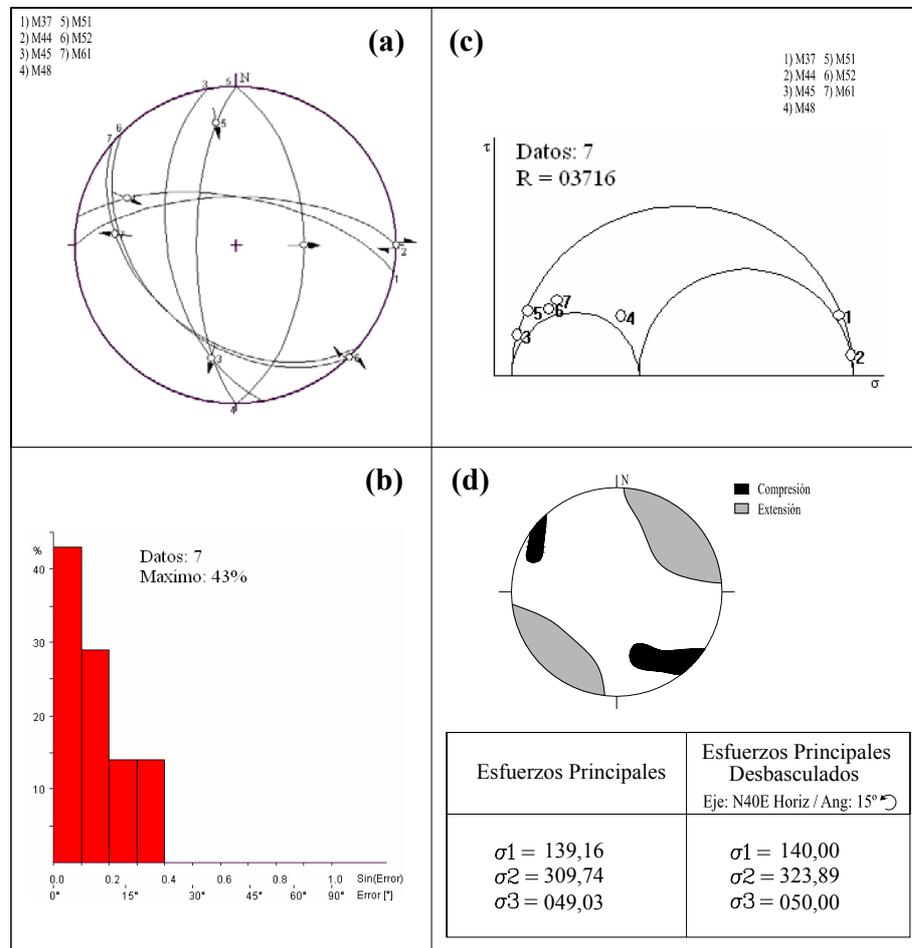


**Foto. 3.10. Muestra un plano de movimiento normal dextral con estrías de pitch:  $70^\circ W$ . Rumbo de la foto: N40W. Pto. D19.**

**-Subgrupo 2:** Este subgrupo consta de siete fallas (ver figura 3.13a) y está ubicado al sur de la sección M (ver figura 3.11).

El histograma de fluctuaciones angulares (ver figura 3.13b) para este subgrupo posee forma de campana de Gauss, presentando cuatro clases de datos, en donde las tres primeras barras del histograma representan los datos explicados por el sistema de

esfuerzos teóricos (ver figura 3.13d), las cuales se encuentran entre 0 y 0,3 radianes (17°) de desviación angular entre las estrías prácticas y teóricas.



**Fig. 3.13. a) Representación en red Estereográfica de Schmidt de los planos de falla y sus estrías, b) Histograma de desviaciones angulares, c) Círculo de Mohr y Rapport (R), d) Diedro recto(según Angelier (1979)) y sistemas de esfuerzos teórico y desbasculados.**

El círculo de Mohr (ver figura 3.13c) muestra que para el sistema de esfuerzos teórico mostrado en la figura 3.11d los planos de falla 1 y 2 tienen poca probabilidad de haber llegado a sobrepasar la línea de resistencia intrínseca de la roca, sin embargo es posible la generación de estas fallas bajo este régimen de esfuerzos, al igual que para los demás planos. El “Rapport” generado es de 0,37 con el  $\sigma_2$  vertical, a partir de lo cual se interpreta que el régimen tectónico para la formación de estos planos de falla fue transcurrente compresivo.

Por otra parte en el diedro recto (ver figura 3.13d) se observa que las zonas compresivas tienen poca dispersión y que existe semejanza entre las zonas compresivas con el  $\sigma_1$  teórico y las zonas distensivas con el  $\sigma_3$  teórico. Además los esfuerzos principales teóricos fueron desbasculados  $15^\circ$  en sentido antihorario a lo largo de la recta N40E Horizontal, para de esta manera tratar de llevar los esfuerzos a su posición original (Pre-basculamiento).

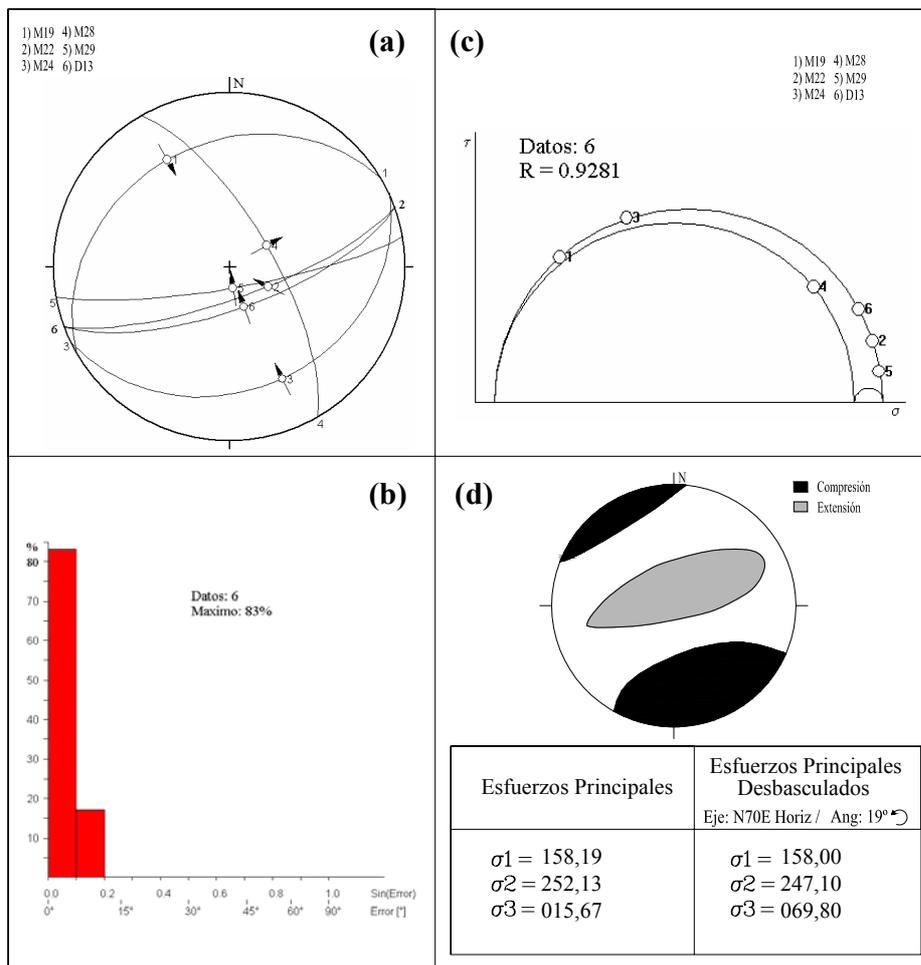
**-Subgrupo 3:** Este subgrupo consta de seis fallas (ver figura 3.14a) y está ubicado en la zona media de la sección M y la sección D (ver figura 3.11 y foto 3.11).

El histograma de fluctuaciones angulares (ver figura 3.14b) para este subgrupo posee forma de campana de Gauss, presentando dos clases de datos, en donde las dos barras del histograma representan los datos explicados por el sistema de esfuerzos teóricos (ver figura 3.14d), las cuales se encuentran entre 0 y 0,2 radianes ( $11^\circ$ ) de desviación angular entre las estrías prácticas y teóricas, evidenciando una aproximación muy precisa del tensor de esfuerzos.



**Foto 3.11. Muestra plano de falla con movimiento inverso y estrías de pitch  $70^\circ$  SE. Rumbo de la foto: E-W. Pto. M19.**

El círculo de Mohr (ver figura 3.14c) muestra que para el sistema de esfuerzos teórico mostrado en la figura 3.14d los planos de falla 2, 5 y 6 tienen poca probabilidad de haber llegado a sobrepasar la línea de resistencia intrínseca de la roca, sin embargo es posible la generación de estas fallas bajo este régimen de esfuerzos, al igual que para los demás planos. El “Rapport” generado es de 0,93 con el  $\sigma_3$  vertical, a partir de lo cual se interpreta que el régimen tectónico para la formación de estos planos de falla fue compresivo transcurrente.

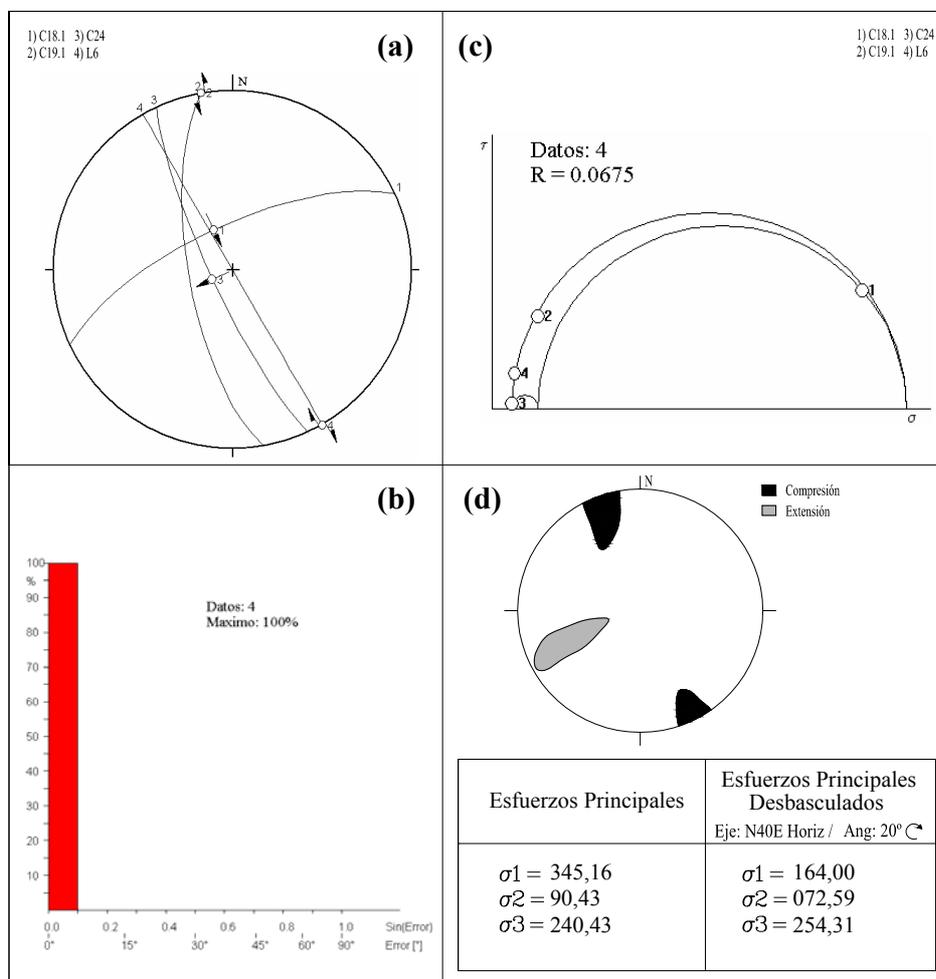


**Fig. 3.14. a) Representación en red Estereográfica de Schmidt de los planos de falla y sus estrías, b) Histograma de desviaciones angulares, c) Círculo de Mohr y Rapport (R), d) Diedro recto de Angelier (19798) y sistemas de esfuerzos teórico y desbasculados.**

Por otra parte en el diedro recto (ver figura 3.14d) se observa que la zonas compresivas tienen dispersión media y que existe semejanza entre las zonas

compresivas con el  $\sigma_1$  teórico y las zonas distensivas con el  $\sigma_3$  teórico. Además los esfuerzos principales teóricos fueron desbasculados  $19^\circ$  en sentido antihorario a lo largo de la recta N70E Horizontal, para de esta manera tratar de llevar los esfuerzos a su posición original (Pre-basculamiento).

**-Subgrupo 4:** Este subgrupo consta de cuatro fallas (ver figura 3.15a) y está ubicado al sur de la sección C y al sur de la sección L (ver figura 3.11 y Foto 310c). El histograma de fluctuaciones angulares (ver figura 3.15b) para este subgrupo presenta una sola clase de datos, la cual representa los datos explicados por el sistema



**Fig. 3.15. a) Representación en red Estereográfica de Schmidt de los planos de falla y sus estrías, b) Histograma de desviaciones angulares, c) Círculo de Mohr y Rapport (R), d) Diedro recto Angelier (1979) y sistemas de esfuerzos teórico y desbasculados.**

de esfuerzos teóricos (ver figura 3.15d), esta se encuentra entre 0 y 0,1 radianes ( $6^\circ$ ) de desviación angular entre las estrías prácticas y teóricas.

El círculo de Mohr (ver figura 3.15c) muestra que para el sistema de esfuerzos teórico mostrado en la figura 3.15d el plano de falla 1 tiene poca probabilidad de haber llegado a sobrepasar la línea de resistencia intrínseca de la roca y que es probable la generación de todas estas fallas bajo este régimen de esfuerzos. El “Rapport” generado es de 0,07 con el  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$  rotados, los cuales no alcanzaron la verticalidad ni la horizontalidad, posiblemente por la carencia de datos.

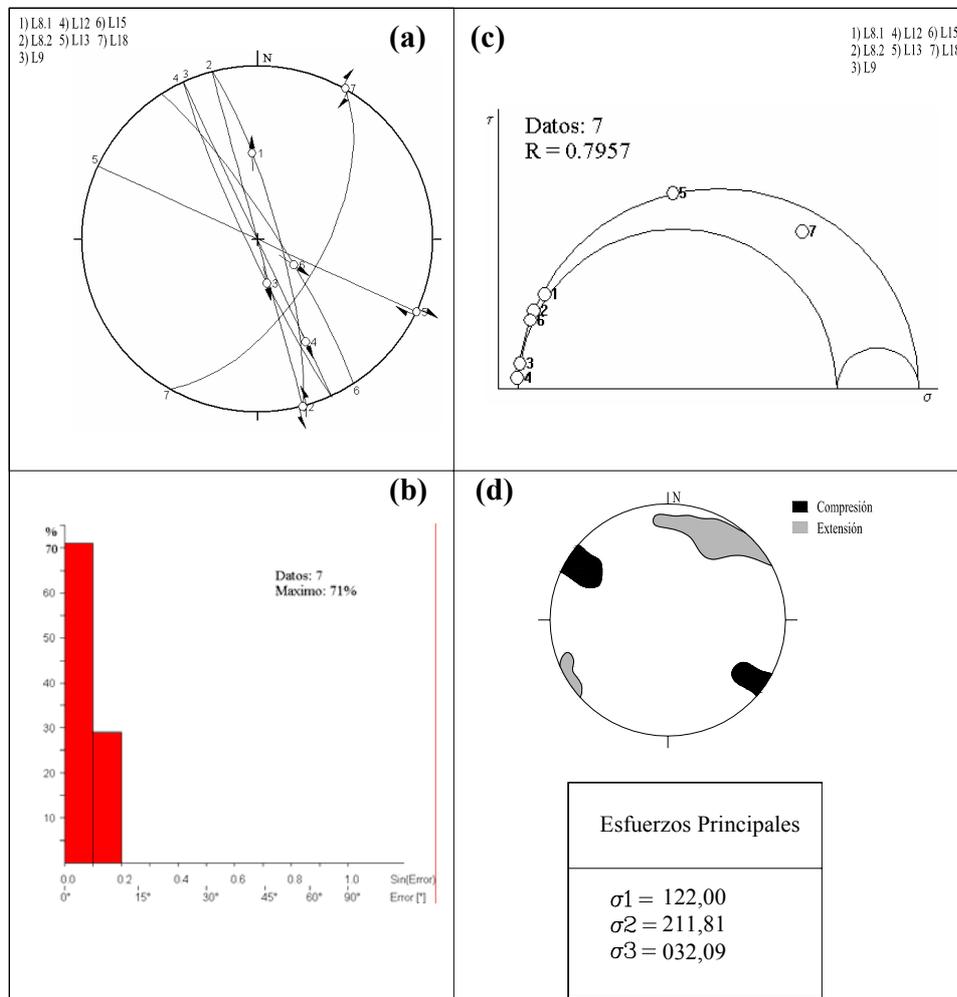
Por otra parte en el diedro recto (ver figura 3.15d) se observa que la zonas compresivas tienen poca dispersión y que existe semejanza entre las zonas compresivas con el  $\sigma_1$  teórico y las zonas distensivas con el  $\sigma_3$  teórico. Además los esfuerzos principales teóricos fueron desbasculados  $20^\circ$  en sentido horario a lo largo de la recta N40E Horizontal, para de esta manera tratar de llevar los esfuerzos principales a su posición original, sin embargo posiblemente, debido a la carencia de datos con un  $\sigma_1$  horizontal, el  $\sigma_3 = 254,31$  y el  $\sigma_2 = 072,59$ .

**-Subgrupo 5:** Este subgrupo consta de siete fallas (ver figura 3.16a) y está ubicado al norte de la sección L (ver figura 3.11).

El histograma de fluctuaciones angulares (ver figura 3.16b) para este subgrupo posee forma de campana de Gauss, presentando dos clases de datos, en donde las dos barras del histograma representan los datos explicados por el sistema de esfuerzos teóricos (ver figura 3.16d), las cuales se encuentran entre 0 y 0,2 radianes ( $11^\circ$ ) de desviación angular entre las estrías prácticas y teóricas, evidenciando una aproximación muy precisa del tensor de esfuerzos.

El círculo de Mohr (ver figura 3.16c) muestra que para el sistema de esfuerzos teórico mostrado en la figura 3.16d, los planos de falla tienen alta probabilidad de haber llegado a sobrepasar la línea de resistencia intrínseca de la roca, es decir, que es posible la generación de todas estas falla bajo este régimen de esfuerzos. El “Rapport” generado es de 0,79 con el  $\sigma_2$  vertical, a partir de lo cual se interpreta que

el régimen tectónico para la formación de estos planos de falla fue transcurrente extensivo.



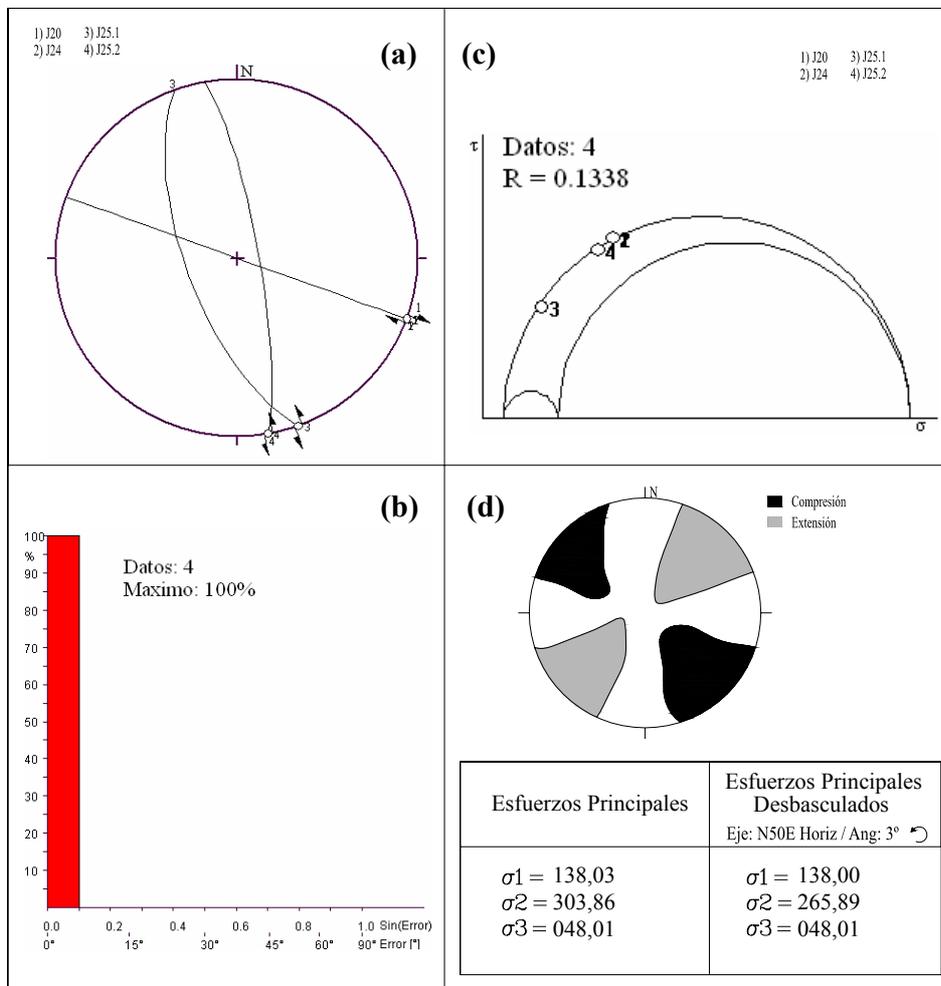
**Fig. 3.16. a) Representación en red Estereográfica de Schmidt de los planos de falla y sus estrías, b) Histograma de desviaciones angulares, c) Círculo de Mohr y Rapport (R), d) Diedro recto (según Angelier (1979)) y sistemas de esfuerzos teórico y desbasculados.**

Por otra parte en el diedro recto (ver figura 3.16d) se observa que la zonas compresivas tienen poca dispersión y que existe semejanza entre las zonas compresivas con el  $\sigma_1$  teórico y las zonas distensivas con el  $\sigma_3$  teórico. Además los esfuerzos principales teóricos no fueron desbasculados debido a que el  $\sigma_1$  se encuentra en posición horizontal al igual que  $\sigma_3$ , lo que indica que probablemente

estos esfuerzos no hayan sido afectados por alguna otra fase de deformación y quizás sean originados en una fase de deformación reciente

**-Subgrupo 6:** Este subgrupo consta de cuatro fallas (ver figura 3.17a) y está ubicado en la zona media de la sección J (ver figura 3.11).

El histograma de fluctuaciones angulares (ver figura 3.17b) para este subgrupo, presenta una sola clase de datos, es decir, 100% de los datos, la cual se encuentra entre 0 y 0,1 radianes (6°) de desviación angular entre las estrías prácticas y teóricas.



**Fig. 3.17.** a) Representación en red Estereográfica de Schmidt de los planos de falla y sus estrías, b) Histograma de desviaciones angulares, c) Círculo de Mohr y Rapport (R), d) Diedro recto de Angelier (1979) y sistemas de esfuerzos teórico y desbasculados.

El círculo de Mohr (ver figura 3.17c) muestra que para el sistema de esfuerzos teórico mostrado en la figura 3.17d la totalidad de los planos llegaron a sobrepasar la línea de resistencia intrínseca de la roca, es decir, es probable la generación de estas fallas bajo este sistema de esfuerzos. El “Rapport” generado es de 0,13 con el  $\sigma_2$  vertical, a partir de lo cual se interpreta que el régimen tectónico para la formación de estas fallas fue transcurrente compresivo.

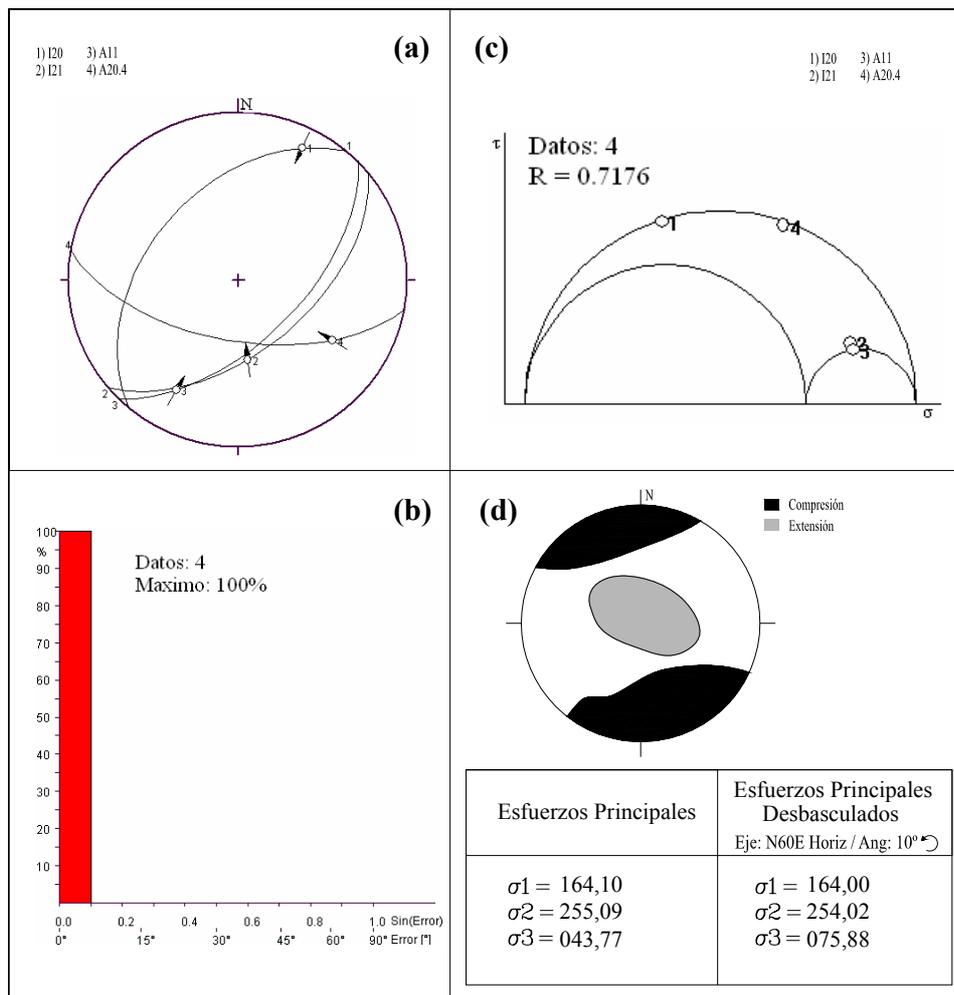
Por otra parte en el diedro recto (ver figura 3.17d) se observa que la zonas compresivas tienen dispersión media (producto de la carencia de datos) y que existe cierta semejanza entre las zonas compresivas con el  $\sigma_1$  teórico y las zonas distensivas con el  $\sigma_3$  teórico. Además los esfuerzos principales teóricos fueron desbasculados  $3^\circ$  en sentido antihorario a lo largo de la recta N50E Horizontal, lo cual es un ángulo despreciable (posible error de medición) y probablemente estos esfuerzos no hayan sido afectados por alguna otra fase de deformación y quizás sean originados en una fase de deformación reciente.

**-Subgrupo 7:** Este subgrupo consta de cuatro fallas (ver figura 3.18a) y está ubicado al norte de la sección A y al norte de la sección I (ver figura 3.11).

El histograma de fluctuaciones angulares (ver figura 3.18b) para este subgrupo, presenta una sola clase de datos, en la cual la barra del histograma representa los datos explicados por el sistema de esfuerzos teóricos (ver figura 3.18d), esta se encuentra entre 0 y 0,1 radianes ( $6^\circ$ ) de desviación angular entre las estrías prácticas y teóricas.

El círculo de Mohr (ver figura 3.18c) muestra que para el sistema de esfuerzos teórico mostrado en la figura 3.18d los planos de falla 2 y 3 tienen poca probabilidad de haber llegado a sobrepasar la línea de resistencia intrínseca de la roca, sin embargo es posible la generación de estas fallas bajo este régimen de esfuerzos, al igual que para los demás planos. El “Rapport” generado es de 0,71 con el  $\sigma_3$  vertical, a partir de lo cual se interpreta que el régimen tectónico para la formación de estos planos de falla fue compresivo transcurrente.

Por otra parte en el diedro recto (ver figura 3.18d) se observa que las zonas compresivas tienen dispersión media (producto de la carencia de datos) y que existe semejanza entre las zonas compresivas con el  $\sigma_1$  teórico y las zonas distensivas con el  $\sigma_3$  teórico. Además los esfuerzos principales teóricos fueron desbasculados  $10^\circ$  en sentido antihorario a lo largo de la recta N60E Horizontal, para de esta manera tratar de llevar los esfuerzos a su posición original (Pre-basculamiento).



**Fig. 3.18. a) Representación en red Estereográfica de Schmidt de los planos de falla y sus estrías, b) Histograma de desviaciones angulares, c) Círculo de Mohr y Rapport (R), d) Diedro recto de Angelier (1979) y sistemas de esfuerzos teórico y desbasculados**

**-GRUPO 2:** Éste grupo consta de fallas encontradas en rocas de edad Eoceno y contiene solo cinco mediciones de fallas y estrías (ver figura 3.19a), las cuales se

encuentran dispersas en el área de estudio, (ver figura 3.20 y Foto 3.12). Sin embargo se agruparon para estudiar un posible tensor de esfuerzos para este grupo.



**Foto 3.12. Plano de falla con movimiento normal dextral y estrías de pitch 75° SW**

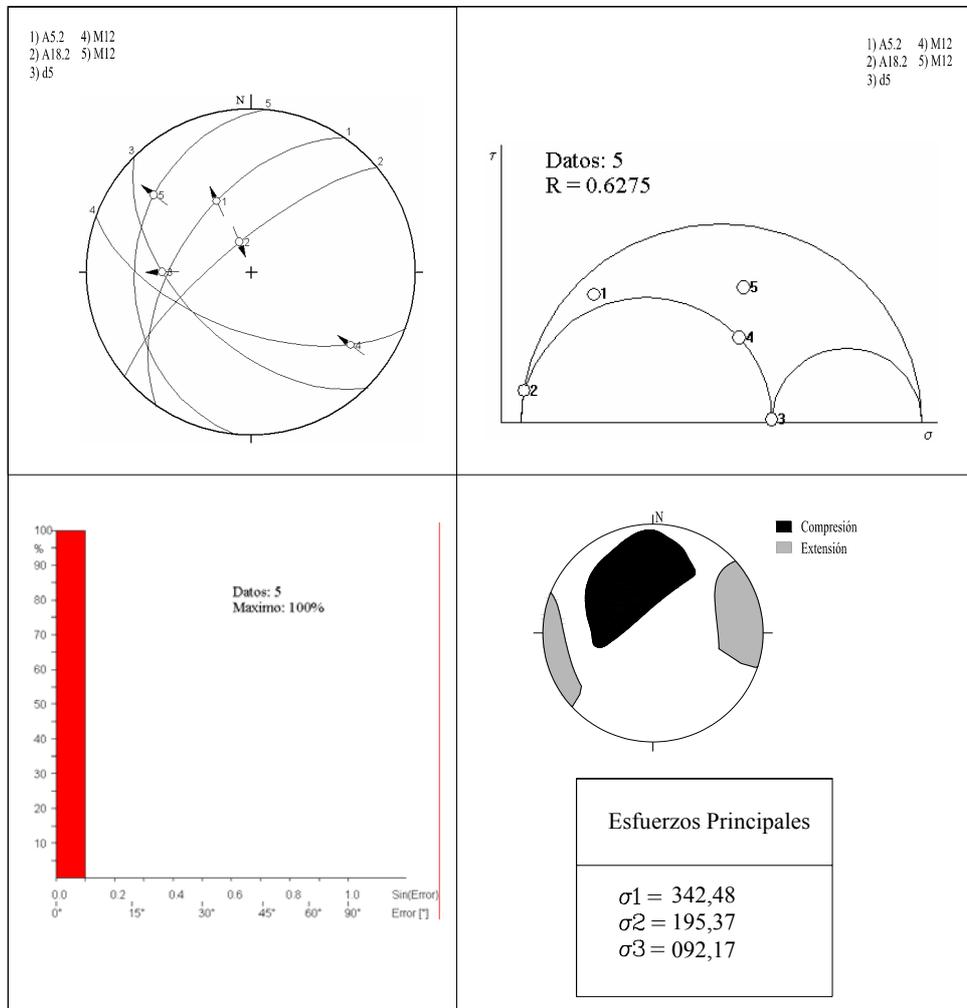
**Rumbo de la Foto: N50W  
Pto. M12**

El histograma de fluctuaciones angulares (ver figura 3.19b) para este grupo, presenta una sola clase de datos, lo cual representa los datos explicados por el sistema de esfuerzos teóricos (ver figura 3.19d), esta se encuentra entre 0 y 0,1 radianes ( $6^\circ$ ) de desviación angular entre las estrías prácticas y teóricas.

El círculo de Mohr (ver figura 3.19c) muestra que para el sistema de esfuerzos teórico mostrado en la figura 3.19d los planos de falla 3, 4 y 5 tienen poca probabilidad de haber llegado a sobrepasar la línea de resistencia intrínseca de la roca, sin embargo es posible la generación de estas fallas bajo este régimen de esfuerzos, al igual que para los demás planos. El “Rapport” generado es de 0,62 con el  $\sigma_1$  vertical, a partir de lo cual se interpreta que el régimen tectónico para la formación de estos planos de falla fue extensivo transcurrente.

Por otra parte en el diedro recto (ver figura 3.19d) se observa que las zonas compresivas tienen dispersión media y que existe semejanza entre las zonas compresivas con el  $\sigma_1$  teórico ( $\sigma_1$  es el más vertical = 342,48) y las zonas distensivas son muy difusas. Estos datos no son muy confiables, debido a la carencia de los

mismos y a lo dispersos que se encuentran en la zona de estudio. Sin embargo al agruparse, estos reflejan un régimen general extensivo.



**Fig. 3.19. a) Representación en red Estereográfica de Schmidt de los planos de falla y sus estrías, b) Histograma de desviaciones angulares, c) Círculo de Mohr y Rapport (R), d) Diedro recto(según Angelier (1979)) y sistemas de esfuerzos teórico y desbasculados**

**-GRUPO 3:** Éste grupo consta de fallas encontradas en rocas de edad Oligoceno y contiene solo seis mediciones de fallas y estrías (ver figura 3.21a), las cuales se encuentran dispersas en el área de estudio (ver figura 3.20). Sin embargo estas se agruparon para estudiar un posible tensor de esfuerzos, ya que estas se encontraron en rocas horizontales a subhorizontales (ver foto 3.13) y que la existencia



de dos direcciones predominantes de fallas normales en la misma zona de estudio puede ser consecuencia de la presencia de al menos dos fases de deformación.



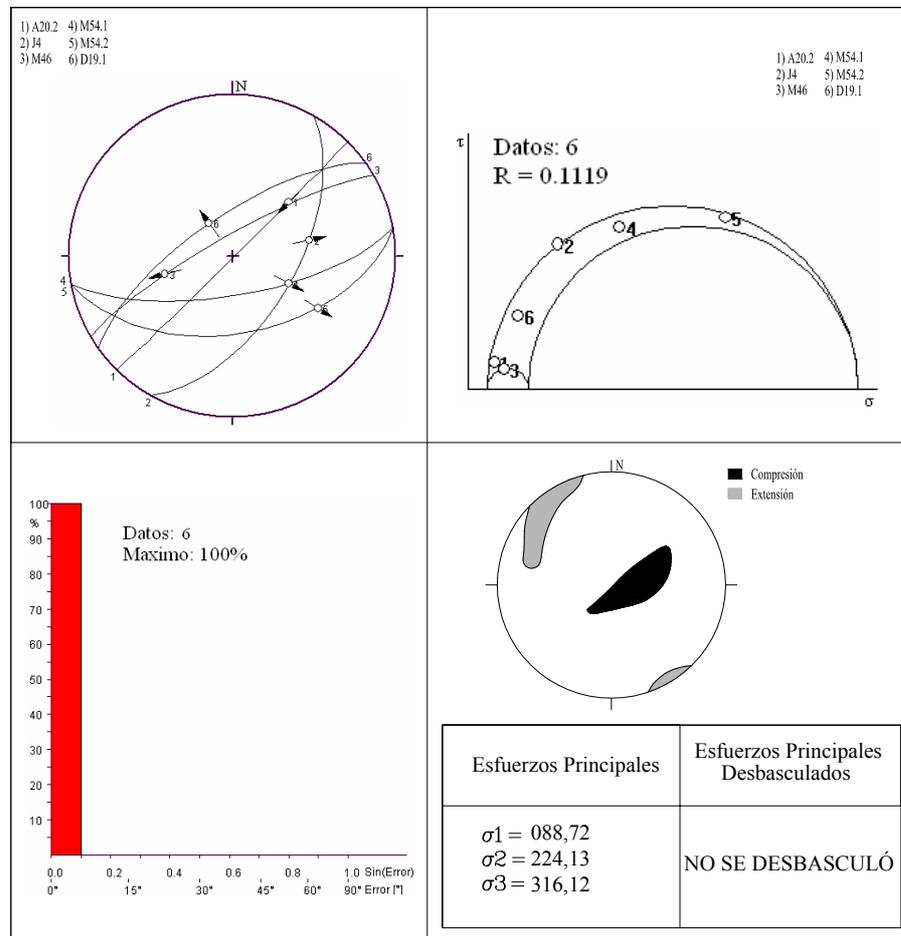
**Foto 3.13.**  
**Muestra plano de falla**  
**con movimiento normal**  
**sinistral.**  
**El plano es N80E70S**  
**Rumbo de la foto: E-W.**  
**Pto. M54.**

El histograma de fluctuaciones angulares (ver figura 3.121b) para este grupo, presenta una sola clase de datos, la cual representa los datos explicados por el sistema de esfuerzos teóricos (ver figura 3.21d), esta se encuentra entre 0 y 0,1 radianes ( $6^\circ$ ) de desviación angular entre las estrías prácticas y teóricas.

El círculo de Mohr (ver figura 3.21c) muestra que para el sistema de esfuerzos teórico, todos los planos de falla tienen alta probabilidad de haber llegado a sobrepasar la línea de resistencia intrínseca de la roca, es decir, que es posible la generación de estas fallas bajo este sistema de esfuerzos. El “Rapport” generado es de 0,1 con el  $\sigma_1$  vertical, a partir de lo cual se interpreta que el régimen tectónico para la formación de estos planos de falla fue extensivo radial.

Por otra parte en el diedro recto (ver figura 3.21d) se observa que las zonas compresivas tienen poca dispersión y que existe semejanza entre las zonas compresivas con el  $\sigma_1$  teórico ( $\sigma_1$  es el pseudovertical) y las zonas distensivas con  $\sigma_3$

teórico. Estos datos no fueron rotados debido a que los mismos se encuentran en capas horizontales a subhorizontales.

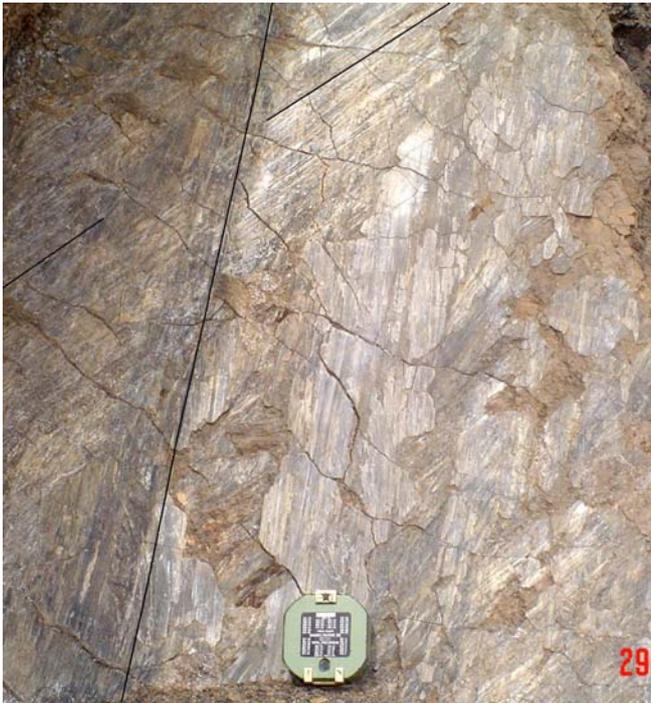


**Fig. 3.21. a) Representación en red Estereográfica de Schmidt de los planos de falla y sus estrías, b) Histograma de desviaciones angulares, c) Círculo de Mohr y Rapport (R), d) Diedro recto de Angelier (1979) y sistemas de esfuerzos teórico y desbasculados**

**-GRUPO 4:** Este grupo consta de 10 mediciones de estrías en cinco planos de fallas, en donde cada uno contiene dos direcciones de estrías, una cortando a la otra (ver fotos 3.14 y figura 3.22). Estas fallas se encuentran en rocas de edad Oligoceno y están distribuidas en las secciones A, L y M.

En el estereograma de planos y estrías de falla (ver figura 3.22) se encuentran representados los cinco planos de falla (a, b, c, d y e), con sus respectivas estrías. El plano (a) tiene las estrías 1 y 2, en donde 1 corta a 2. El plano (b) tiene las estrías 3 y

4, en donde 3 corta a 4. El plano (c) tiene las estrías 5 y 6, en donde 5 corta a 6. El plano (d) tiene las estrías 7 y 8, en donde 7 corta a 8 y el plano (e) tiene las estrías 9 y 10, en donde 9 corta a 10.



Estos datos no fueron tomados para el análisis de paleoesfuerzos porque el sentido de la falla representado por las primeras estrías (en tiempo geológico) es borrado por el de las segundas. Además es probable que como están dispersos en toda el área se encuentren basculados de distintas maneras.

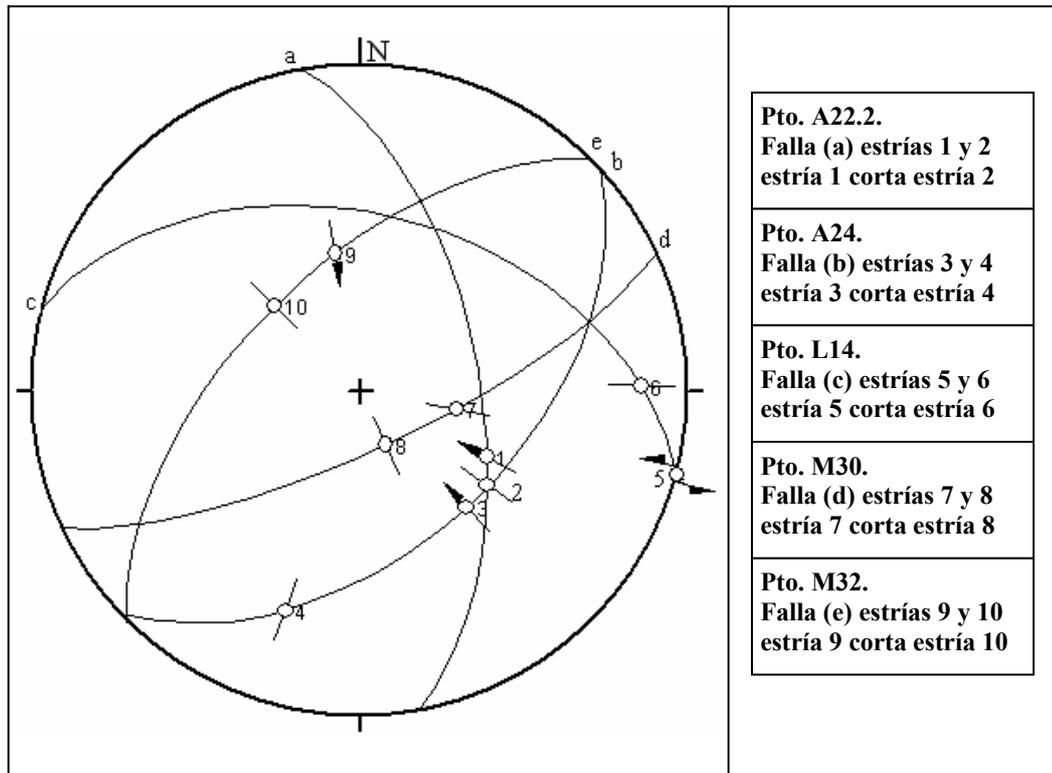


Fig. 3.22. Representación en red Estereográfica de Schmidt de los planos de falla con dos estrías y sus estrías.

#### 3.2.1.4. Pliegues

Se realizó la medición de 23 pliegues a lo largo de todas las secciones estudiadas, los cuales fueron caracterizados a partir del rumbo y buzamiento de los limbos, planos axiales y ejes; también se midieron los ángulos interlimbares (ver apéndice 1).

El 57% de los planos axiales son verticales a subverticales y 40% de los mismos están en 60° y 70° de buzamiento (26% buzamiento norte y 14% buzamiento sur). El 57% de los pliegues son abiertos (ángulo interlimbar entre 70° y 120°), el 26% son muy abiertos (ángulo interlimbar entre 70° y 120°) y el 14 % son cerrados (ángulo interlimbar entre 70° y 120°). Las zonas de charnela de la gran mayoría de los

pliegues son tipo Chevron/Kink y angulares (ver foto 3.15), siendo estos en un 72% simétricos y en un 28% asimétricos.



**Foto 3.15.**

**Arriba: Pliegue del Tipo Kink band anticlinal, abierto, volcado.  
Rumbo de la Foto: S80W  
Pto. M75 Panorámica**

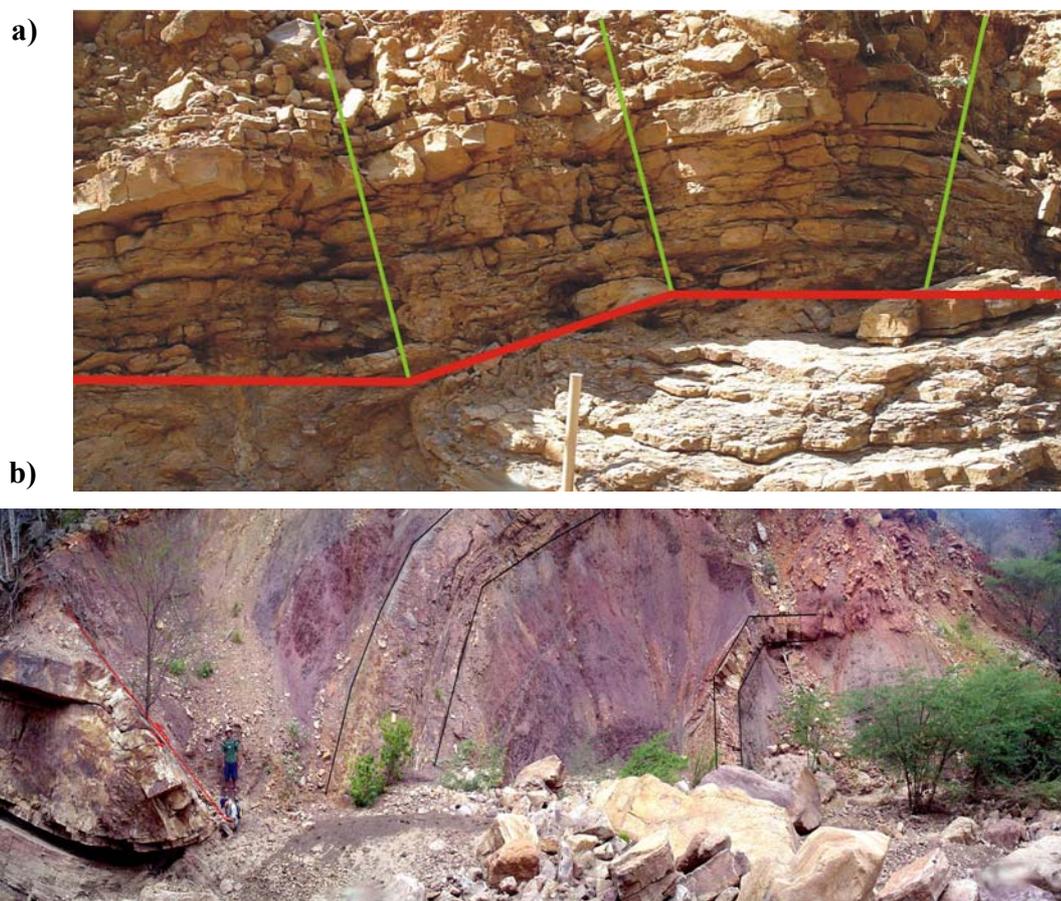


**Abajo: Pliegue del tipo Kink band sinclinal, con ángulo interlimbar muy abierto  
Rumbo de la Foto: N35E  
Pto. A22. Panorámica**

Las charnelas de los pliegues fueron graficadas en diagramas de rosas en proyección unipolar (ver figura 3.23) y muestran que en magnitud de buzamiento el 65.22% de las mismas son horizontales a subhorizontales y además que la orientación preferencial de las mismas es en una dirección N(45-75)E, siendo esto el 51% de los datos obtenidos. Aquí también se observa que existe un grupo importante de charnelas orientadas en dirección N(60-75)W, que representan el 14,3% de la población, las cuales son pertenecientes a los pliegues ubicados en el sector “B”.

El diagrama de densidad de la misma figura también muestra una distribución uniforme de los ejes en una dirección N(45-75)E, siendo la gran mayoría de los ejes de forma horizontal a subhorizontal.

En los afloramientos, también se encontró que casi todos estos pliegues son pliegues relacionados a fallas, en donde, en algunos se observan las fallas y en otros estas se interpretaron tomando en cuenta la geometría de los pliegues (ver foto 3.16 a y b).



**Foto. 3.16. Pliegues relacionados a fallas. a) Fault-bend-fold con rampa de ángulo igual a  $18^\circ$  y con  $\theta = \phi$  ver apéndice 2, rumbo de la foto: S55W, Pto. B16. b) Fault-propagation-fold con rampa de ángulo igual a  $30^\circ$  y con  $\theta = \phi$  ver apéndice 2, rumbo de la foto: S55E, Pto. I20.**

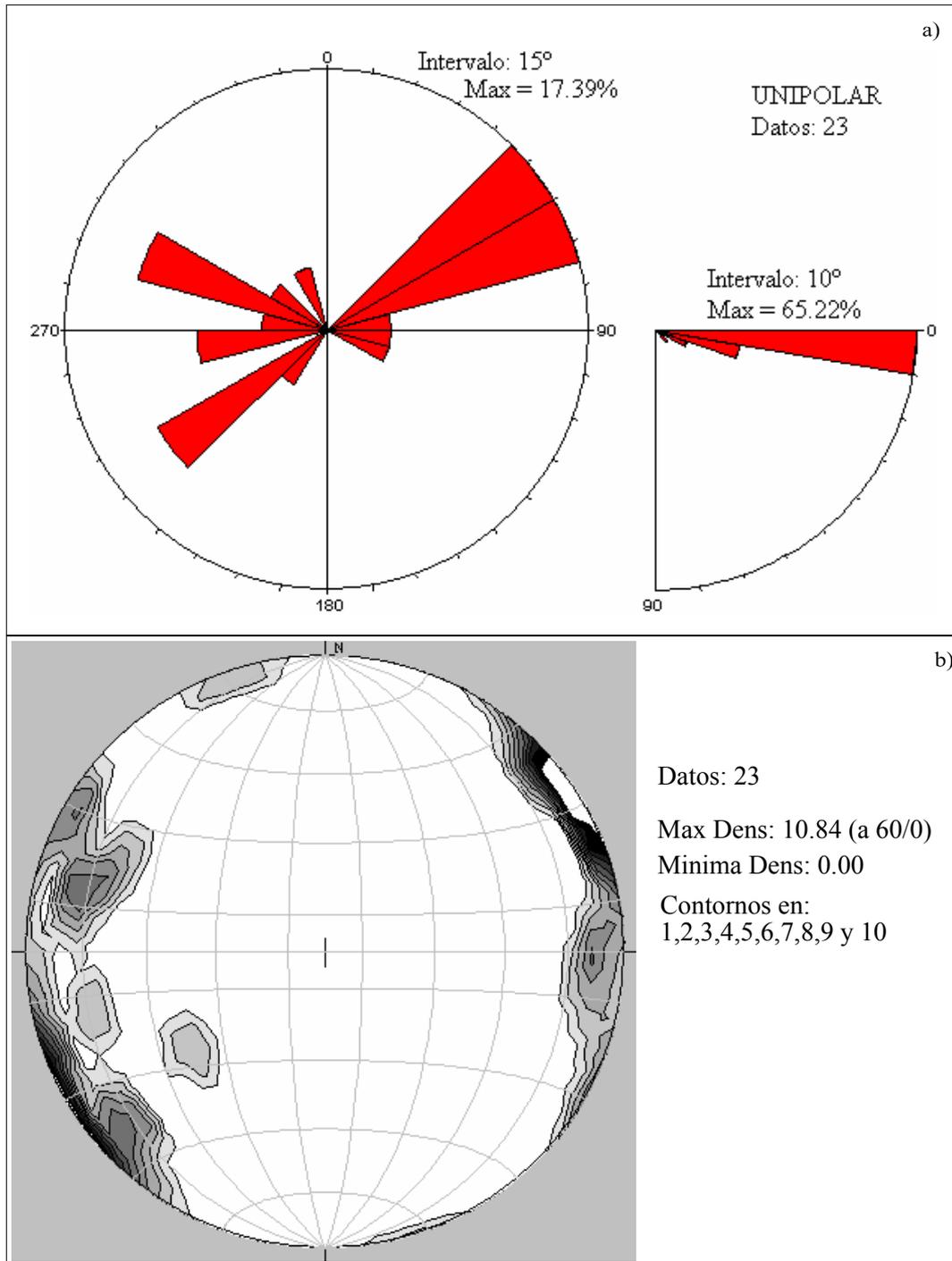


Fig. 3.23. a) Diagrama de rosas (uniauxil)de la actitud de los ejes de los pliegues.  
b) Diagrama de densidad de lineaciones de los ejes de los pliegues.

## **3.2.2 Secciones Balanceadas**

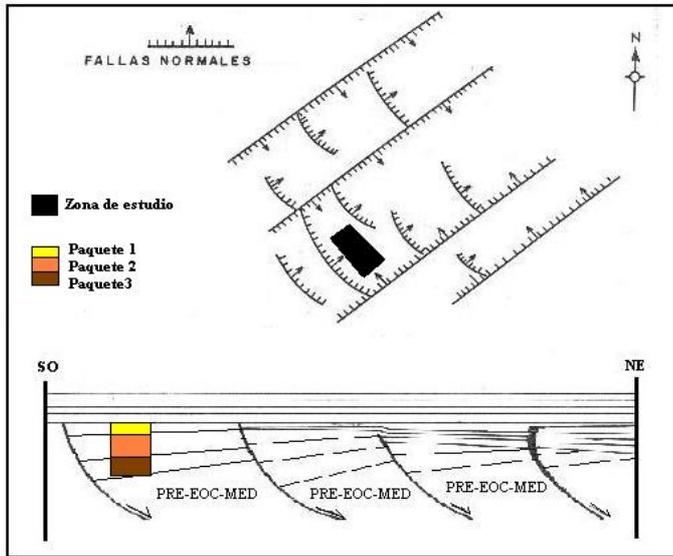
### **3.2.2.1 Generalidades**

Debido a la geometría de la mayoría de los pliegues encontrados en la zona de estudio y de sus zonas de charnela, las secciones geológicas fueron construidas mediante el método Kink de construcción de cortes geológicos. De esta manera, la interpretación y la geometría de las estructuras fueron realizadas según las teorías de Suppe (1983) y Suppe & Medwedeff (1984) para pliegues relacionados a fallas y secciones balanceadas.

En la construcción de los cortes geológicos se tomaron en cuenta los datos de estructuras planares, en especial los datos de estratificación, fallas y algunos datos de plegamientos. Una de las condiciones necesarias para realizar los cortes geológicos fue la de agrupar las unidades litoestratigráficas por paquetes, diferenciándolos por edades, de esta manera, se tiene que el paquete 1 (Eoceno medio – superior) comprende a las Formaciones Paují, Santa Rita y Jarillal, el paquete 2 (Oligoceno - Mioceno inferior) comprende a las Formaciones El Paraíso, Pecaya y Churuguara–Castillo sin diferenciar y el paquete 3 (Mioceno inferior) la Formación Agua Clara.

Los espesores de los paquetes fueron deducidos a partir de la geometría de las estructuras y de la ubicación de los afloramientos de los contactos formacionales que dividen a dichos paquetes. Así mismo el espesor para el paquete 1 es 1425 mts, para el paquete 2 es 1135 mts y para el paquete 3 es 330 mts.

Otra condición importante en la realización de las secciones balanceadas es que se asume que la zona de estudio se encuentra ubicada sobre un bloque estructural, el cual no está afectado por la presencia de estructuras de orden mayor. También se asume que el adelgazamiento o engrosamiento de las unidades litoestratigráficas, en el momento de sus depositaciones, es despreciable según la escala de la zona, es decir, que la acción de las fallas normales sin-sedimentarias no es significativa (ver figura 3.24).



**Fig. 3.24. Croquis esquemático representativo del bloque estructural y su ubicación al momento de la expansión de la cuenca y deposición de las unidades litoestratigráficas en el área de estudio**

**Tomado y Modificado de Audemard & De Mena (1985).**

### 3.2.2.2 Descripción de las Secciones

El estilo estructural predominante encontrado en el área es el de pliegues relacionados a fallas, los cuales se desarrollan como *fault-bend-fold* (FBF) hacia el norte de la zona de estudio y como *fault-propagation-fold* (FPF) hacia el sur de la misma. Todas las estructuras observadas poseen vergencia sur, por lo tanto, los limbos posteriores (frontlimbs) son todos aquellos que buzcan al sur y los anteriores (backlimbs) son los que buzcan al norte.

En superficie solo se encontró la expresión superior de estas estructuras, es decir, los pliegues, a excepción de algunas zonas en donde se encontraron trazas de fallas que fueron relacionadas con las rampas que generaron estos pliegues, de las cuales algunas fueron interpretadas en fotografía aérea.

#### 3.2.2.2.1 Sección 1

Esta sección tiene una orientación S30E, en estado deformado presenta una longitud de 18485 m. En ella todas las estructuras a excepción del primer anticlinal encontrado en dirección N-S son generadas por la interacción de dos despegues regionales (dA y dB), con diferentes rampas. Estos despegues se han ubicado en las cercanías de lo que se cree es el tope y la base de la Formación Paují, estando el

despegue (dA) a 1900 m de profundidad y el (dB) a 1017 m de profundidad. Como consecuencia de esta interacción se desarrollaron estructuras tipo FBF y FPF a lo largo de toda la sección (ver anexo 2a).

Los FBF encontrados en esta sección son dos y son los generados por las fallas F1 y F3 junto a los despegues regionales dA y dB. Ambas estructuras son producto de deformaciones de las unidades estratigráficas sobre rampas inversas paralelas, separadas 4136 m de longitud en la horizontal, las cuales parten desde un despegue inferior (dA) y se conectan con un despegue superior (dB), siendo  $\theta = \varphi$ , en donde  $\theta$  es el ángulo de buzamiento de la rampa y  $\varphi$  es el ángulo de buzamiento del despegue superior (ver figura A2. 4, 5, 6 y 7 en apéndice 2 y anexo 2a).

El ángulo ( $\theta$ ) de la rampa para ambos FBF es  $28^\circ$  y por consiguiente, éste es también el ángulo de buzamiento de los respectivos limbos anteriores del FBF ( $28^\circ$  N). El ángulo del limbo posterior del FBF ( $\beta$ ) para ambas estructuras es  $43^\circ$  (buzamiento =  $43^\circ$  S) y el ángulo interlimbar medio del anticlinal ( $\gamma$ ) para estas es de  $68^\circ$ .

El desplazamiento entrante ( $S_e$ ) para el FBF generado por la rampa inversa F1 es  $S_{eF1} = 2599$  mts y la relación de desplazamiento para dicha estructura es  $R_{F1} = 0.77$ , para lo cual el desplazamiento saliente es  $S_{sF1} = 2013$  mts. El desplazamiento entrante para el FBF generado por la rampa inversa F3 es  $S_{eF3} = 1560$  mts y la relación de desplazamiento para dicha estructura es  $R_{F1} = 0.68$ , para lo cual el desplazamiento saliente es  $S_{sF3} = 1067$  m.

Los *fault-propagation-folds* (FPF) encontrados en esta sección son cinco y son los generados por las fallas F2, F4.1, F4.2, F5 y fd12 y los despegues regionales dA, dB y dC. Todas estas estructuras son asumidas como deformaciones sobre rampas inversas, las cuales parten desde un despegue inferior (dA, dB ó dC) y que propagan la generación de pliegues asimétricos, es decir:  $\theta = \varphi$ . F2 parte de despegue (dC) situado a 110 mt de profundidad), F4.1, F4.2 y fd12 parten del despegue (dB) y F5 parte del despegue (dA).

El ángulo de la rampa para los FPF generados por las rampas inversas F2, F4.1, F4.2 y F5 es de  $30^\circ$ , por consiguiente este es también el ángulo de buzamiento de los

respectivos limbos anteriores ( $30^{\circ}\text{N}$ ) y el ángulo del limbo posterior para ambas estructuras es de  $72^{\circ}$  ( $72^{\circ}\text{S}$ ). El ángulo interlimbar medio de los anticlinales ( $\gamma^*$ ) generados en estas estructuras es de  $39^{\circ}$  y el de los sinclinales ( $\gamma$ ) es de  $54^{\circ}$ . Los FPF generados por las fallas F2 y F4.1, son estructuras rotadas  $28^{\circ}$  y  $30^{\circ}$ , respectivamente, en sentido antihorario, que conservan sus relaciones angulares de formación. El FPF generado por fd2 es una estructura de ruptura del limbo anterior del FBF generado por la falla F1 y sus relaciones angulares son:  $\theta = \varphi$ ,  $\theta = 28^{\circ}$ ,  $\gamma^* = 37$  y  $\gamma = 51$ . Cabe destacar que las fallas inversas F2 y F5 son fallas aflorantes, de las cuales F2 es vista en afloramiento y F5 es vista en fotografía aérea.

Para el FPF generado por la rampa inversa F2, el desplazamiento entrante a través de la falla y consumido por el pliegue (Sec) es  $\text{Sec}_{F2} = 307$  m. Para el FPF generado por la rampa inversa F4.1 es  $\text{Sec}_{F4.1} = 320$  m. Para el FPF generado por la rampa inversa F4.2 es  $\text{Sec}_{F4.2} = 729$  m y para el FPF generado por la rampa inversa F5, el desplazamiento entrante a través de la falla y consumido por el pliegue es  $\text{Sec}_{F5} = 3063$  m.

En el FPF generado por fd12, el nivel de despegue (dB), plegado en el limbo anterior del FBF generado por la falla F1, actúa como la rampa de rompimiento inverso, la cual tiene un desplazamiento de  $S_{fd12} = 880$  m.

Al extremo sur de la sección (después del FPF generado por F4.2) existen capas de buzamiento  $55^{\circ}\text{N}$  (D39-D43), las cuales están representadas en la sección, pero no están relacionadas a ninguna estructura debido a la falta de datos, por estar estas en el límite de la zona de estudio. Estos buzamientos pueden ser relacionados con cualquier tipo de estructura (FPF, FBF, cuñas, estructuras de intersección, etc) y es por esto que no presentan interpretación.

### 3.2.2.2 Sección 2

Esta sección tiene una orientación S27E, en estado deformado presenta una longitud de 18992 m. En ella todas las estructuras a excepción del primer anticlinal encontrado en dirección N-S son generadas por la interacción de dos despegues

regionales (dA' y dB'), con diferentes rampas. Estos despegues se han ubicado en las cercanías de lo que se cree es el tope y la base de la Formación Paují, estando el despegue (dA') a 2020 m de profundidad y el (dB') a 1137 m de profundidad. Como consecuencia de esta interacción se desarrollaron estructuras tipo *fault-bend-fold* (FBF) y *fault-propagation-fold* (FPF) a lo largo de toda la sección (ver anexo 3a).

También existe la presencia de tres fallas transcurrentes sinistral (F6.a, ubicada en el pto. K1; F6.b, ubicado en el pto M37; y F6.c, ubicado en el pto. M46, ver anexo 1), las cuales generan pliegues de arrastre parásitos en los contactos de las mismas y rotación de algunos bloques. Sin embargo el desplazamiento generado por estas es asumido lo suficientemente pequeño como para no afectar la geometría final de la sección.

Los FBF encontrados en esta sección son dos y son los generados por las fallas F1' y F3' y los despegues regionales dA' y dB'. Ambas estructuras son deformaciones sobre rampas inversas paralelas, separadas 5720 mts en horizontal, las cuales parten desde un despegue inferior (dA') y se conectan con un despegue superior (dB'), es decir:  $\theta = \phi$  (ver figura A2. 4, 5, 6 y 7 en apéndice 2 y anexo 3a).

El ángulo de la rampa para ambos FBF es de 29° y por consiguiente este es también el ángulo de buzamiento de los respectivos limbos anteriores (29°N). El ángulo del limbo posterior ( $\beta$ ) para ambas estructuras es de 50° (50°S) y el ángulo interlimbar medio ( $\gamma$ ) para estas es de 65°.

El desplazamiento entrante ( $Se'$ ) para el FBF generado por la rampa inversa F1' es  $Se_{F1'} = 3080$  m y la relación de desplazamiento para dicha estructura es  $R_{F1'} = 0.78$ , para lo cual el desplazamiento saliente es  $Ss_{F1'} = 2409$  m. El desplazamiento entrante para el FBF generado por la rampa inversa F3' es  $Se_{F3'} = 1511$  m y la relación de desplazamiento para dicha estructura es  $R_{F3'} = 0.63$ , para lo cual el desplazamiento saliente es  $Ss_{F3'} = 956$  m.

Los FPF encontrados en esta sección son cuatro y son los generados por las fallas F2', F4.1', F4.2' y F5' y los despegues regionales dA', dB' y dC'. Todas estas estructuras son asumidas como deformaciones sobre rampas inversas, las cuales parten desde un despegue inferior (dA', dB' ó dC') y que propagan la generación de

pliegues asimétricos, es decir:  $\theta = \varphi$ . F2' parte del despegue (dC' = 220 mt de profundidad), F4.1', F4.2' parten del despegue (dB') y F5 parte del despegue (dA').

El ángulo de la rampa para el FPF generado por la rampa inversa F2' es de 28°, y el ángulo de buzamiento de los limbos anteriores es 57°N, esto es debido a la rotación de 29° en sentido antihorario de esta estructura. El ángulo del limbo posterior para esta es de 78° (buzamiento: 51°S, explicado por la misma razón). El ángulo interlimbar medio del anticlinal ( $\gamma^*$ ) generado en esta estructuras es de 37° y el del sinclinal ( $\gamma$ ) es de 51°.

El ángulo de la rampa para el FPF generado por la rampa inversa F5' es de 30°, por consiguiente éste es también el ángulo de buzamiento de los respectivos limbos anteriores (30°N) y el ángulo del limbo posterior para ambas estructuras es de 72° (72°S). El ángulo interlimbar medio de los anticlinales ( $\gamma^*$ ) generados en estas estructuras es de 39° y el de los sinclinales ( $\gamma$ ) es de 54°. Cabe destacar que las fallas inversas F2' y F5' son fallas aflorantes, de las cuales F2' es vista en afloramiento y F5' es vista en fotografía aérea.

El ángulo de la rampa para los FPF generados por las fallas inversas F4.1' y F4.2' es de 20°, siendo estos de tipo imbricados, en donde la estructura generada por la falla F4.1' es rotada en forma de FBF 19° en sentido antihorario.

$$(\theta_2' = \text{Tan}^{-1}[1/((1/\text{Tan}(\theta_2)) + (2\text{Tan}(\theta_1/2)))] = 19^\circ)$$

Por consiguiente el ángulo de buzamiento de los limbos anteriores es de 20°N para el generado por F4.2' y de 39°N para el generado por F4.1'; además el ángulo de buzamiento de los limbos posteriores de estas estructuras es 76°N y 85°S respectivamente. El ángulo interlimbar medio de los anticlinales ( $\gamma^*$ ) generados en estas estructuras es de 28° y el de los sinclinales ( $\gamma$ ) es de 38°.

Para el FPF generado por la rampa inversa F2', el desplazamiento entrante a través de la falla y consumido por el pliegue (Sec) es  $\text{Sec}_{F2'} = 449$  m. Para el FPF generado por la rampa inversa F4.1' es  $\text{Sec}_{F4.1'} = 955$  m. Para el FPF generado por la rampa inversa F4.2' es  $\text{Sec}_{F4.2'} = 955$  mt y para el FPF generado por la rampa inversa F5', el desplazamiento entrante a través de la falla y consumido por el pliegue es  $\text{Sec}_{F5'} = 2710$  m.

### 3.2.2.3 Restauración de las Secciones

Las secciones se restauraron mediante el método de conservación de longitud, debido a que el espesor de las capas (paquetes) es asumido y trabajado constante, así de esta manera se puede asumir que el balanceo es también por conservación de área. Para la restauración de las secciones, se tomó en cuenta la secuencia de fallamiento o edad relativa de las fallas, las cuales fueron restauradas desde la más joven hasta la más antigua hasta que las capas llegaron a su nivel regional manteniendo el buzamiento general (ver anexos 2 y 3). De esta manera:

#### 3.2.2.3.1 Sección 1

Debido a lo explicado en las generalidades y que además el área de estudio es relativamente pequeña, el buzamiento regional de las diferentes unidades litoestratigráficas situadas en los paquetes es asumido horizontal en la dirección del corte. El nivel regional observado en esta sección es deducido a partir de los datos estratigráficos (afloramiento de las Formaciones y sus contactos) y de la geometría de las estructuras mayores, la cual es obtenida a partir de las mediciones de estructuras planares y la interpretación de estas. Para este caso el contacto entre los paquetes 1 y 2 (Eoceno-Oligoceno) se encuentra de manera horizontal y a una profundidad de 480 m (ver anexo 2 a y b).

El *pin line* propuesto para esta restauración está a 30 m al sur del punto D16 (ver anexo 2a y figura 3.21) y se encuentra de manera perpendicular a las capas en este sector (*pin line* vertical). Por esta razón se tomaron dos *lose line*, el *lose line 1* es vertical y es perpendicular a los planos de estratificación encontrados al comienzo de la sección (norte de A30). El *lose line 2* es también vertical y esta ubicado entre los puntos D38 y D3, ya que las estructuras que solo pueden ser restauradas y explicadas según los datos que se poseen son las que se encuentran entre estas dos *lose lines* (distancia restaurada =  $L_0 = 17667 \text{ m}$ ). De esta manera, el *lose line 2* es perpendicular a las capas que están por debajo de la intersección entre el plano axial del sinclinal del FPF generado por F4.2 y el plano axial que cambia de buzamiento a

estas capas a 55°N. Por encima de esta intersección (que lleva por nombre X) el *lose line 2* es oblicuo a las capas.

Al realizar la restauración de las unidades de rocas deformadas bajo la metodología de conservación de longitud de capas se tiene lo siguiente (ver anexo 2 a y b):

-L1 = 24900 m. Esta es la longitud restaurada de todas las capas que se encuentran desde la base del paquete 1 (posible base de la Formación Paují) hasta el despegue dB.

-L2 = 23630 m. Esta es la longitud restaurada de todas las capas que se encuentran desde el despegue dB hasta el tope del paquete 1 (tope de la Formación Jarillal).

-L3 = 23630 mts. Esta es la longitud restaurada de todas las capas que se encuentran desde la base del paquete 2 (base de las unidades del Oligoceno inferior) hasta el despegue dC.

-L4 = 23875 m. Esta es la longitud restaurada de todas las capas que se encuentran desde el despegue dC hasta la capa que pasa por el punto X (intersección de los planos axiales).

-L5 = 23330 m. Esta es la longitud restaurada de todas las capas que se encuentran desde la capas que pasa por el punto X hasta el tope del paquete 2 (tope de las unidades del Oligoceno superior-Mioceno inferior).

-L6 = 23330 m. Esta es la longitud restaurada de todas las capas que se encuentran en el paquete 3 (Formación Agua Clara).

Al restaurar las secciones se tiene que la estructura más joven es el FPF generado por la propagación de F5 y por consiguiente es el primero que se restauró, desplazando las estructuras al norte de la falla una distancia igual a  $Se_{F5}$  y rotando el FPF generado por F4.1, 30° en sentido horario (ver figura 3.25).

Luego la segunda estructura a restaurar fue el FPF generado por F4.2 y ésta se realizó desde el *pin line* al *lose line 2*. Debido a que el *pin line* corta el despegue dB el *lose line 2* va a presentar un desplazamiento a lo largo de este despegue el cual, es igual a  $Sec_{F4.2}$ . También se localizó un error (E) de la longitud de las capas reflejando



un desplazamiento en el *lose line 2* desde el punto X hacia arriba y esto es debido a la oblicuidad de las capas con respecto a este mismo.

$$E = L4 - L5 = 545 \text{ m.}$$

La siguiente estructura más antigua fue el FPF propagado por la falla F4.1, el cual, se retrodeformó un desplazamiento equivalente a  $Sec_{F4.1}$ , para de esta manera completar el desplazamiento total saliente (Sst) de los FBF generados a partir de F1 y F3. Esto quiere decir que los FPF formados a partir de F4.1 y F4.2 fueron generados a partir del Sst de estos FBF (ver figura 3.21).

$$Sst = S_{SF1} + S_{SF3} = 3080 \text{ m.}$$

y que el desplazamiento sobrante sobre el despegue dB en el estado final es igual a:

$$Ssob = Sst - Sec_{F4.1} - Sec_{F4.2} = 2030 \text{ m.}$$

y  $Ssob = L1 - L2 + Sec_{F4.2} = 2000 \text{ m}$  con un error de 30 mts que equivale al 0,012%.

En este orden cronológico la siguiente estructura es el FBF generado por la rampa inversa F3, el cual, desplazó las estructuras que se encuentran al norte de este una distancia igual a  $Se_{F3}$ . Al retrodeformar esta estructura el Sst es igual a  $S_{SF1}$ .

La siguiente retrodeformación es la del FPF generado por F2, el cual, parte del despegue (dC) quien es plegado por el limbo anterior del FPF generado por fd12. Este FPF se desplazó hacia el norte una distancia  $Sec_{F2}$  a lo largo de la rampa que rompe por este mismo limbo.

$$\text{También } Sec_{F2} = (L3 - L4) + E = 307 \text{ m.}$$

La siguiente estructura más antigua es el FPF generado por la ruptura del limbo anterior del FBF generado por F1, el cual, al retrodeformarse se desplazó una distancia igual a  $S_{fd12}$ , quien es la necesaria para llegar a la configuración geométrica inicial del FBF generado por F1(ver figura 3.21).

La última estructura en restaurarse para esta sección fue el FBF generado por F1, el cual, se retrodeformó un desplazamiento de  $Se_{F1}$  para de esta manera hacer el Sst igual a cero.

El acortamiento máximo ( $Ac$ ) para estas estructuras en la zona de estudio va a ser igual al acortamiento entrante de las estructuras mayores que se generan a partir

del despegue (dA), esto es debido a que las demás estructuras son estructuras menores, para F4.1 y F4.2, generadas a partir de los desplazamientos salientes de los FBF y para F2 y fd12, estructuras parásitas de ruptura del limbo del FBF generado por F1 (ver figura 3.21). Es decir:

$$Ac = Se_{F1} + Se_{F3} + Sec_{F5} = 7222 \text{ m} = 7,2 \text{ K.}$$

El acortamiento máximo también puede ser visto de la siguiente manera:

$$Ac \text{ para } L1 = L1 - L0 = 7233 \text{ m} = 7,2 \text{ K.}$$

$$Ac \text{ para } L2 = (L2 + Ssob) - (L0 + Sec_{F4.2}) = 7263 \text{ m} = 7,2 \text{ K.}$$

$$Ac \text{ para } L3 = (L3 + Ssob) - (L0 + Sec_{F4.2}) = 7263 \text{ m} = 7,2 \text{ K.}$$

$$Ac \text{ para } L4 = (L4 + Ssob + Sec_{F2}) - (L0 + Sec_{F4.2} + E) = 7271 \text{ m} = 7,2 \text{ K.}$$

$$Ac \text{ para } L5 = (L5 + Ssob + Sec_{F2} + E) - (L0 + Sec_{F4.2} + E) = 7271 \text{ m} = 7,2 \text{ K.}$$

$$Ac \text{ para } L6 = (L5 + Ssob + Sec_{F2} + E) - (L0 + Sec_{F4.2} + E) = 7271 \text{ m} = 7,2 \text{ K.}$$

### 3.2.2.3.2 Sección 2

Debido a lo explicado en las generalidades y en la sección 1, el buzamiento regional de las diferentes unidades litoestratigráficas situadas en los paquetes es asumido horizontal en la dirección del corte. El nivel regional observado en esta sección es también deducido a partir de los datos estratigráficos (afloramiento de las formaciones y sus contactos) y de la geometría de las estructuras mayores, la cual es obtenida a partir de las mediciones de estructuras planares y la interpretación de estas. Para este caso el contacto entre los paquetes 1 y 2 (Eoceno-Oligoceno) se encuentra de manera horizontal y a una profundidad de 590 m (ver anexo 3 a y b).

El *pin line* propuesto para esta restauración se encuentra ubicado en el extremo sur de la sección (ver figura 3.22), en las capas horizontales que se encuentran al sur de M77, el cual es atinado de manera perpendicular a las capas en este sector (*pin line* vertical). De esta manera se definió un solo *lose line*, el cual es vertical y es perpendicular a los planos de estratificación encontrados al comienzo de la sección (norte de I29). La distancia restaurada desde su estado deformado (L0') es igual a 18992 m.

Al realizar la restauración de las unidades de rocas deformadas bajo la metodología de conservación de longitud de capas (ver anexo 3 a y b) se tiene lo siguiente:

-L1' = 26235 m. Esta es la longitud restaurada de todas las capas que se encuentran desde la base del paquete 1 (posible base de la Formación Paují) hasta el despegue dB'.

-L2' = 24752 m. Esta es la longitud restaurada de todas las capas que se encuentran desde el despegue dB' hasta el tope del paquete 1 (tope de la Formación Jarillal).

-L3' = 24752 m. Esta es la longitud restaurada de todas las capas que se encuentran desde la base del paquete 2 (base de las unidades del Oligoceno inferior) hasta el despegue dC'.

-L4' = 24269 m. Esta es la longitud restaurada de todas las capas que se encuentran desde el despegue dC' hasta el tope del paquete 2 (tope de las unidades del Oligoceno superior-Mioceno inferior).

-L5' = 24269 m. Esta es la longitud restaurada de todas las capas que se encuentran en el paquete 3 (Formación Agua Clara).

Al restaurar las secciones se tiene que la estructura más joven es el FPF generado por la propagación de F5' y por consiguiente es el primero que se restauró, desplazando las estructuras al norte de la falla una distancia igual a  $Se_{F5'}$  (ver figura 3.26).

Luego la segunda estructura a restaurar fue el FPF generado por F4.2', esta estructura desplaza una distancia  $Sec_{F4.2'}$  al FPF generado por F4.1' y además lo rota un ángulo  $\theta_2 = 19$ . También debido a que el *pine line* corta el despegue dB'; el *lose line* va a presentar un desplazamiento a lo largo de este despegue, el cual es igual a  $Sec_{F4.2'}$ .

La siguiente estructura más antigua fue el FPF propagado por la falla F4.1', el cual, se retrodeformó un desplazamiento equivalente a  $Sec_{F4.1'}$ , para de esta manera completar el desplazamiento total saliente (Sst') de los FBF generados a partir de F1'



y F3'. Esto quiere decir que los FPF formados a partir de F4.1' y F4.2' fueron generados a partir del Sst' de estos FBF.

$$Sst' = S_{SF1'} + S_{SF3'} = 3365 \text{ m.}$$

y que el desplazamiento sobrante sobre el despegue dB' en el estado final es igual a:

$$Ssob' = Sst' - Sec_{F4.1'} - Sec_{F4.2'} = 1455 \text{ m.}$$

También,  $Ssob' = L1' - L2' = 1483 \text{ m}$  con un error de 27 m que equivale al 0,012%.

En este orden cronológico la siguiente estructura es el FBF generado por la rampa inversa F3', el cual desplazó las estructuras que se encuentran al norte de este una distancia igual a  $Se_{F3'}$ . Al retrodeformar esta estructura el Sst' es igual a  $S_{SF1'}$ .

La siguiente retrodeformación es la del FPF generado por F2', el cual parte del despegue (dC'), quien es plegado por el limbo anterior del FBF generado por F1'. Este FPF se desplazó hacia el norte una distancia  $Sec_{F2'}$  a lo largo de la rampa que rompe por este mismo limbo.

$$\text{También } Sec_{F2'} = L3 - L4 = 449 \text{ m.}$$

La última estructura en restaurarse para esta sección fue el FBF generado por F1', el cual se retrodeformó un desplazamiento de  $Se_{F1'}$ , para de esta manera hacer el Sst' igual a cero.

El acortamiento máximo (Ac) para estas estructuras (ver figura 3.22) en la zona de estudio, va a ser igual al acortamiento entrante de las estructuras mayores que se generan a partir del despegue (da), esto es debido a que las demás estructuras son estructuras menores; para F4.1' y F4.2', generadas a partir de los desplazamientos salientes de los FBF y para F2', una estructura parásitas originada en el limbo del FBF generado por F1'. Es decir:

$$Ac' = Se_{F1'} + Se_{F3'} + Sec_{F5'} = 7301 \text{ m} = 7,3 \text{ K.}$$

El acortamiento máximo también puede ser visto de la siguiente manera:

$$Ac' \text{ para } L1' = L1' - L0' = 7250 \text{ m} = 7,25 \text{ K.}$$

$$Ac' \text{ para } L2' = (L2' + Ssob') - (L0') = 7243 \text{ m} = 7,24 \text{ K.}$$

$$Ac' \text{ para } L3' = (L3' + Ssob') - (L0') = 7263 \text{ m} = 7,26 \text{ K.}$$

$$Ac' \text{ para } L4' = (L4' + Ssob' + Sec_{F2'}) - (L0') = 7201 \text{ m} = 7,2 \text{ K.}$$

$$Ac' \text{ para } L5' = (L4' + Ssob' + Sec_{F2'}) - (L0') = 7201 \text{ m} = 7,2 \text{ K.}$$

### 3.2.3 Discusión

A pesar de la carencia de trabajos previos detallados, es de notar una gran similitud entre las rocas que se encontraron en los afloramientos, con las descritas en las distintas referencias bibliográficas consultadas (por ejemplo: Wheeler, 1960), al igual que con los contactos entre las unidades litoestratigráficas plasmados en los mapas geológicos de la Creole.

En este estudio se identificaron y refirieron algunas estructuras sedimentarias que en trabajos previos no estaban, un ejemplo de esto se puede observar en los afloramientos que van desde el punto A12 hasta el punto A17, los cuales pertenecen a la Formación Jarillal. Allí se identificaron estructuras sedimentarias tales como, rizaduras y estratificación cruzada, las cuales, no habían sido descritas en trabajos previos para las rocas de dicha formación.

Una dificultad que se presenta en esta etapa ocurre al momento de incluir las rocas descritas en campo dentro de sus formaciones formales establecidas. Este problema se debe a la poca información estratigráfica disponible para efectuar dicha agrupación. Para realizar esta labor, se contó sólo con la descripción hecha en campo, la cual, no es suficiente, debido a que, para tener una buena definición de las formaciones se requieren estudios de laboratorio más específicos, tales como, análisis de secciones finas, micropaleontológicos, geoquímicos y otros, los cuales, proporcionarían una información más completa del área de estudio y por ende sería más preciso incluir las rocas descritas en campo dentro de las formaciones formales ya establecidas.

Sin embargo, al solapar la información de campo sobre los mapas de la Creole se observa una gran concordancia entre la información disponible con la de los trabajos previamente consultados, pudiendo con esto, concretar cada una de las formaciones establecidas y además las secciones son restaurables.

La discordancia angular observada en el punto D1 ratifica la existencia del comienzo de un evento progradacional, dado que ambientalmente es difícil que rocas

pertenecientes a un ambiente transicional (Formación Santa Rita) se encuentren por encima y en contacto directo con rocas de un ambiente marino profundo (Formación Paují) y más aún cuando se observa angularidad entre la estratificación. Lo que quiere decir que ha ocurrido un evento tectónico probablemente relacionado con la apertura de la cuenca, que según esto es de edad Eoceno Tardío (edad de la base de la Formación Santa Rita).

En cuanto a la parte estructural, la estratigrafía (discordancia), el plegamiento y el análisis de paleoesfuerzos a partir de microestructuras reflejó la existencia de al menos tres fases de deformación frágiles, una distensiva y dos compresivas de edades Pre-Mioceno y Post-Mioceno inferior respectivamente.

*-Fase de deformación extensiva:* esta fase se observó en las estaciones microtectónicas registradas en los grupos 2 y 3. Estas estaciones muestran fallas que afectan a las rocas del Eoceno y Oligoceno. A pesar de la amplia distribución de las estaciones medidas con esta fase, es de notar la similitud en los resultados arrojados en cada uno de los métodos de análisis estadístico de paleoesfuerzos utilizados para estos grupos, en especial en el grupo 3. De esta manera, probablemente para un  $\sigma_1$  vertical exista un  $\sigma_3$  en dirección 140,0 (N140) siendo esta la dirección de expansión de la zona de estudio para esta fase de deformación, la cual comienza en el Eoceno Medio Tardío hasta finales del Mioceno Temprano, ya que las últimas rocas afectadas por estas fallas pertenecen a estas unidades litoestratigráficas.

*-Fase de deformación compresiva:* Esta fase compresiva es evidenciada por un cambio en el régimen tectónico, inversión tectónica, el cual pasa de ser de un estado extensivo a uno compresivo y este último se ve evidenciado por el plegamiento y los regímenes tectónicos observados en los análisis de paleoesfuerzos para el grupo 1. En esta fase también se pueden diferenciar dos fases compresivas, las cuales fueron distinguidas gracias a que en el análisis estadístico de paleoesfuerzos, para las fallas del grupo 1, se obtuvieron dos muestras de sistemas de esfuerzos para toda la población de datos. Una de las muestras observadas necesitó que se le aplicara el desbasculamiento de las capas mientras que a la otra no, dichas fases compresivas se describen a continuación:

*-Primera fase de deformación compresiva:* esta fase se encuentra reflejada dentro de los grupos 1, 2, 3, 4 y 7, los cuales son los grupos de fallas que necesitaron ser desbasculados. Por estar estos sistemas de esfuerzos basculados según el plegamiento mayor encontrado en la zona de estudio se entiende que estas fallas son generadas en una etapa anterior. El rango de esfuerzos principales  $\sigma_1$  encontrado para esta etapa de deformación en los diferentes grupos se encuentra entre N140 y N168, siendo el más representativo el de N160. Para esta relación de esfuerzos el  $\sigma_3$  se encuentra en posición vertical para las estaciones situadas en los limbos posteriores de los dos pliegues principales (anticlinal de Taparoy y anticlinal de Buena Vista) y el  $\sigma_2$  vertical para las demás estaciones.

Los datos analizados para los grupos 1, 3, 4 y 7 presentan problemas en los círculos de Mohr, sin embargo, gracias a la consistencia del sistema de esfuerzo obtenido para cada uno de estos y su relación con los diedros rectos respectivos, estos datos se toman como significantes. Estos errores pueden ser justificados por el alto ángulo de las fallas inversas y por la poca cantidad de estaciones microtectónicas analizadas.

La edad relativa estimada del comienzo de esta fase compresiva es posterior a la etapa de extensión, siendo ésta entonces, posterior a la depositación de la Formación Agua Clara, lo que quiere decir que es equivalente a la etapa anterior al plegamiento y durante el mismo. El final de esta etapa de deformación va a estar al comienzo de la segunda etapa compresiva o al final de la formación de los pliegues.

*-Segunda fase de deformación compresiva:* esta fase se encuentra reflejada dentro de los grupos 5 y 6, los cuales son los grupos de fallas que no necesitaron ser desbasculados, ya que los esfuerzos principales para estos se encuentran en su posición original. Por estar estos sistemas de esfuerzos no basculados según el plegamiento mayor encontrado en la zona de estudio se entiende que estas fallas son generadas en una etapa posterior a dicho plegamiento. El rango de esfuerzos principales  $\sigma_1$  encontrado para esta etapa de deformación en los diferentes grupos se encuentra entre N122 y N138 con un  $\sigma_2$  en posición vertical, siendo el más representativo el de N122 que es el reflejado en las estaciones del grupo 5.

Los datos analizados para los grupos 5 y 6 son datos bastante uniformes y cumplen con las condiciones estadísticas de los métodos utilizados, es decir, todas las variantes del método de Etchecopar *et al* (1981) son validadas y presentan muy buena semejanza con los diedros rectos respectivos.

La edad estimada del comienzo de esta fase compresiva es posterior a la formación de los pliegues y también es equivalente a la etapa final de la primera fase de compresión. El final de esta etapa de deformación es desconocido, sin embargo esta se cree una fase compresiva de edad mas joven.

En general, en la zona de estudio, la edad del comienzo del plegamiento está marcada por el final de la depositación de la Formación Agua Clara, el cual representa, según la estratigrafía regional la parte final del Mioceno Inferior. Por lo tanto la edad del comienzo de la fase compresiva 1 es Post-Mioceno inferior y el final de la misma es el final del plegamiento el cual es de edad desconocida. La fase compresiva 2 probablemente se encuentre evidenciada en el mapa por todas las fallas transcurrentes E-W (Dextrales) y NW (Sinestrales) que cortan a los pliegues mayores, por lo tanto esta fase de deformación es diacrónica y continua posterior a la primera fase compresiva.

En el siguiente cuadro (tabla 3.1) se expresa una síntesis de las distintas fases de deformación, sus edades relativas y la orientación de los esfuerzos principales:

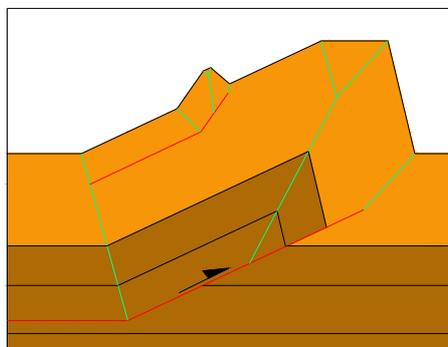
<b>Fase de Deformación</b>	<b>Edad Relativa de la Deformación</b>	<b>Esfuerzo principal asociado (<math>\sigma_1</math>)</b>
Segunda Compresión	Post-Plegamiento	$\sigma_1 = N122; 122,00$ $\sigma_2 = 211, 81$ $\sigma_3 = 032, 09$
Primera Compresión	Pre-Plegamiento y durante el Plegamiento hasta el final del mismo	$\sigma_1 = N160 160,00$ $\sigma_2$ y $\sigma_3$ : varían
Extensión	Post-Eoceno Medio - Pre-Mioceno Temprano	$\sigma_1 = 090, 80$ $\sigma_2 = 225, 10$ $\sigma_3 = 140,00$

**Tabla # 3.1. Fases de deformación: sus edades relativas y la orientación de los esfuerzos principales**

En el análisis de diaclasas se obtiene que la mayoría de estas son verticales y están orientadas principalmente en dirección del  $\sigma_1$  de la primera fase compresiva, para la cual, si se asume un ángulo de fricción interna de los materiales de  $30^\circ$  y un ángulo de ruptura  $2\theta$  igual a  $60^\circ$  se tiene que la mayoría de las diaclasas estén probablemente ubicadas en este espectro y el resto en un segundo espectro de diaclasas consecuente de la segunda etapa de deformación compresiva. Además, es probable que las diaclasas encontradas en dirección SW-NE estén asociadas a sistemas de esfuerzos locales en los limbos de los pliegues.

En el análisis de pliegues se tiene que los ejes de la mayoría de dichos pliegues están orientados de manera perpendicular al  $\sigma_1$  de la primera etapa compresiva, es decir, probablemente este sea el sistema de esfuerzos que originó dichos plegamientos. Tomando esto en cuenta, también se observa que la mayoría de estos ejes son horizontales lo cual es indicativo de que no existe basculamiento de los bloques. Por su parte, en el caso de los ejes orientados en dirección NW (sector B-B') se tiene que estos pliegues son de arrastre asociados al movimiento de fallas transcurrentes dextrales.

Debido a que la mayoría de los planos axiales de los pliegues medidos en campo son verticales se entiende que estos son plegamientos parásitos (en forma de FBF y FPF) ubicados en los limbos anteriores de los plegamientos principales y el alto ángulo en las rampas inversas también se justifica por la misma razón, tal y como se muestra en la figura 3.27.



**Fig. 3.27. Croquis esquemático de un Fault-propagation-fold, donde hay generación de pliegues parásitos en el limbo anterior del mismo y que poseen planos axiales verticales**

Los datos de rumbo y buzamiento de la estratificación medida en campo, al ser ubicados en los diferentes cortes topográficos definieron la geometría de lo que es el plegamiento mayor, el cual, define el estilo estructural reinante en la zona. Es por ello que los diferentes grupos de estratificaciones antes descritos en el diagrama de densidad de polos demuestran la existencia de dos tipos de plegamientos principales, pliegues simétricos o *fault-bent-fold* y pliegues asimétricos o *fault-propagation-fold*. Cabe destacar que estos plegamientos principales debieron ser generados por el  $\sigma_1$  de la primera fase compresiva.

En cuanto a las secciones geológicas, se puede decir que estas presentan una gran similitud en cuanto a la geometría y la cinemática modelada, es decir, las estructuras interpretadas a lo largo de las secciones en dirección norte-sur son muy parecidas. En la parte sur de las secciones, al sur del anticlinal de Buena Vista, se observa que la disposición espacial de los *fault-propagation-folds* es un poco distinta para ambas, esto se puede explicar como que, las distintas unidades rocosas al estar siendo comprimidas tomaran el camino mas fácil para deformarse y posiblemente encontraron en su camino rampas diferentes para consumir el desplazamiento saliente de los *fault-bend-folds* originados al comienzo de la deformación. En general se puede decir que las dos secciones son balanceadas y cumplen el principio de consistencia de secciones.

Teniendo en cuenta lo anteriormente descrito y además que la distancia de separación de ambas secciones no supera los 7 km en promedio, se asume que existe relación genética entre las estructuras presentes. Esto significa que las rampas y despegues descritos para cada sección son los mismos si se interpola entre estas dos, es decir,  $dA=dA'$ ,  $dB=dB'$ ,  $dC=dC'$ ,  $F1=F1'$ ,  $F2=F2'$ ,  $F3=F3'$ , y  $F5=F5'$ , en donde la diferencia en los espaciamentos de dichas rampas es explicado por el hecho de que las rampas inversas actúan como superficies inversas en la tercera dimensión y también por la acción de fallas transcurrentes que desplazan los bloques menores encontrados dentro de estas fallas.

Existe una leve diferencia en cuanto a la profundidad de los despegues y el nivel regional de depositación de estos paquetes, esta es de 120 metros de una con

respecto a la otra, aproximadamente  $1,06^\circ$  de inclinación en dirección oeste, o sea, los despegues de la sección dos se encuentran 120 mts mas profundos. Esta diferencia se ha tomado como despreciable para los efectos de la interpretación y correlación entre las secciones. Otro punto importante es que en las secciones restauradas el tope interpretado de la Formación Agua Clara se encuentra cercano a los 1000 m sobre el nivel del mar actual. Asumiendo que el nivel del mar no ha sufrido cambios significativos desde entonces, se tiene que el bloque estructural en el cual se encuentra la zona de estudio ha sufrido levantamiento, probablemente originado por las fases compresivas antes mencionadas.

El acortamiento general promedio en la dirección de las secciones es de 7,25 K, lo cual se puede interpretar como 40% para la sección 1 y 38 % para la sección 2, es decir, que en promedio el área ha sufrido un acortamiento de sus unidades litoestratigráficas de un 39%. La diferencia entre los acortamientos es explicada por la presencia del FPF originado por fd12 como una ruptura del limbo anterior del FPB originado por F1 y por el diferencial de acomodación de los desplazamientos.

El desplazamiento total entrante en las secciones o acortamiento no es totalmente consumido en las estructuras presentes en la zona de estudio, es probable que este esté consumido en estructuras ubicadas más al sur de la misma. De esta manera es explicado el porqué los *lose lines* de las secciones se encuentran desplazados sobre los despegues comunes dB y dC; y además el porqué estas diferencias en los largos de las capas son compensados con los desplazamientos calculados para cada estructura ( $S_{sob}$ ,  $Sec_{F2}$ ,  $Sec_{F4.1}$  y  $Sec_{F4.2}$ ). Se encontró un error de 0.012% de diferencia entre los resultados teóricos y los resultados gráficos, el cual es el error presentado por la herramienta de dibujo utilizada (Autocad 2004).

Cabe destacar que los resultados obtenidos en este trabajo son concordantes con otros modelos geodinámicos regionales de la Cuenca de Falcón (Muessig, 1984, Audemard & De Mena, 1985, Boesi & Goddard, 1991, Audemard, 1995, Macellari, 1995 y Porras, 2000) en los que se plantea la inversión de la Cuenca Terciaria de Falcón para finales del Mioceno Temprano con la reactivación de fallas normales pertenecientes a la fase de expansión de la misma. Otra concordancia más específica

es dada con los trabajos de Audemard & De Mena (1985) y Audemard (1995) quienes plantean la existencia de al menos tres fases de deformación para la Cuenca de Falcón, con edades y esfuerzos principales similares a los encontrados en esta zona de estudio.

A pesar de la poca cantidad de datos que definen la fase extensiva estos concuerdan con los presentados por estos autores (Audemard & De Mena, 1985 y Audemard, 1995), ya que por la geometría y los regímenes tectónicos obtenidos del estudio de paleoesfuerzos para estas fallas, estas estructuras no pueden haberse generado en un régimen transtensivo.

## **CAPITULO IV**

### **CONCLUSIONES**

Se ha desarrollado un modelo estructural para un área ubicada entre los poblados Purureche, estado Falcón y Baragua, estado Lara, a partir del análisis de paleoesfuerzos de la población de fallas y de la construcción de dos secciones balanceadas que abarcan el área de estudio. Dichas secciones fueron construidas aplicando las teorías cuantitativas que relacionan la geometría de fallas y pliegues en cinturones de corrimiento (Suppe, 1983 y Suppe & Medwedeff, 1984).

El área objeto de este estudio está caracterizada por una configuración estructural compleja. Bajo estas condiciones los métodos cuantitativos de balanceo de secciones resultan sumamente útiles, dado que limitan las posibles interpretaciones a generar y otorgan cierto nivel de control sobre las características de las estructuras en aquellas zonas donde los datos disponibles no ofrecen un control total.

El modelo geométrico y cinemático generado a través de la aplicación de esta metodología, proporciona un excelente control sobre la validez de la sección estructural, demostrando que las estructuras interpretadas explican de manera satisfactoria la deformación observada.

Al comparar los datos estratigráficos recolectados en el campo con los referidos en las distintas referencias bibliográficas consultadas se puede apreciar la gran semejanza existente entre ambos, siendo de esta manera corroborada la estratigrafía que se encuentra referida en el mapa de la Creole, la cual sirvió como referencia para la ubicación de las rocas en unidades litoestratigráficas formales.

La orientación y cinemática general de las estructuras medidas en campo es semejante a las planteadas en los trabajos previos relacionados a la tectónica del anticlinorio de Falcón. De esta manera se validan las mediciones estructurales realizadas en la zona de estudio.

Los datos obtenidos en el estudio de paleoesfuerzos siguiendo las metodologías de Etchecopar *et al.*, (1981) y diédro recto de Angelier (1979) tienen alta similitud con los referidos en modelos geodinámicos regionales de la Cuenca de

Falcón, por los autores Audemard & De Mena (1985) y Audemard (1995). De esta manera se evidencia la eficacia de la aplicación de estas metodologías para dichos análisis en el área de estudio.

La evolución del plegamiento comienza con la formación de *fault-bend-folds* compuestos por rampas y despegues, en donde estos despegues se encuentran en la base y el tope de la Formación Paují. La continuación en la evolución del plegamiento es con la formación de *fault-propagation-folds* que parten de estos mismos despegues y son generados a partir del desplazamiento sobrante de los *fault-bend-folds*.

La vergencia general de estos sistemas plegados es SE con una profundidad somera (1500 m) de las rampas y los despegues asociados, los cuales actúan como estructuras de propagación de estructuras de carácter regional (fallas normales reactivadas como inversas).

La zona de estudio presenta varias fases de deformación las cuales tienen su comienzo en el Eoceno Medio en donde se genera una fase extensiva. De esta manera en la zona de estudio se observa que la Cuenca de Falcón se abre en forma de graben durante esta época, generando la formación de un depocentro sedimentario el cual es invertido por procesos compresivos a finales del Mioceno Temprano, plegando todas estas rocas con ejes de orientación WSW-ENE. Esta región está sometida a un esfuerzo horizontal máximo más reciente de dirección NNW-SSE, responsable de la generación de estructuras que cortan a los pliegues antes descritos, siendo ésta la última fase compresiva de al menos dos que se han relevado desde el Mioceno Temprano.

## BIBLIOGRAFÍA

- Allmendinger, R. W. (1999) *Introduction to structural geology*. Cornell University.  
[Documento en Línea] Disponible: <http://www.geo.cornell.edu/geology/classes>.  
[Consulta: 2004, Enero]
- Anderson, E. M. (1942) *The dynamics of faulting and dyke formation, with applications to Britain*, Oliver and Boyd Edinburgh, 191p.
- Angelier, J. (1979) *Determination of the mean principal directions of stresses for a given fault population*. *Tectonophysics*, 56, p: T17-T26.
- Audemard, F. y De Mena, J. (1985) *Falcón oriental, nueva interpretación estructural*. Ponencia presentada en el VI Congreso Geológico Venezolano, (p: 2317-2329), Caracas.
- Audemard, F. (1993) *Neotectonique, sismotectonique et aléa sismique du nordouest du Venezuela (Système de failles d'Oca-Ancón)*. Ph.D. Thesis, France, Université de Montpellier, 369p.
- Audemard, F. (1995) *La cuenca terciaria de Falcón, Venezuela noroccidental, síntesis estratigráfica génesis e inversión tectónica*. Ponencia presentada en el IX Congreso Latinoamericano de Geología, Caracas.
- Boesi, T. y Goddard, D. (1991) *A new geologic model related to the distribution of hydrocarbon source rocks in the Falcon basin, northwestern Venezuela*. in Biddle, K., (ed.) AAPG, Memoir 48, p: 303-319.
- Boyer S. E. y Elliott D. (1982) *Thrust system*. in Foster N. H. y Beamont E. A. (eds.) *Structural concepts and techniques I. Basic concept, folding and structural techniques*. AAPG publicación especial N° 9, p: 260-296.
- Butler, R. W. H. (1987) *thrust sequences*. London. *Journal of the Geological Society*, 144, p: 619-634.
- Casas Sainz, A. M.; Gil Peña, I. y Gómez, S. J. L. (1990) *Los métodos de análisis de paleoesfuerzos a partir de poblaciones de fallas: sistemática y técnicas de aplicaciones*. *Estudios Geol.* 46, p: 385-398.

- Castilla, R. (2001) *Interpretación estructural de un transecto regional ubicado en el flanco suroriental de la cordillera de los Andes, estado Táchira*. Trabajo especial de grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Cooper M. y Trayner P. M. (1986) *Thrust-surface geometry: implications for thrust-belt evolution and section-balancing techniques*. Great Britain, Journal of Structural Geology, 8 (3), p: 305-312.
- Creole Petroleum Corporation (1958) *Mapa de geología de superficie a escala 1:50000, hoja C-5-C*.
- Creole Petroleum Corporation (1965) *Mapa de geología de superficie a escala 1:50000, hoja C-4-D*.
- Dahlstrom, C. D. A. (1969) *Balanced cross sections*. Canadian J. Earth Sci 6, p: 743-757.
- Díaz de Gamero, M. L. (1977) *Estratigrafía y micropaleontología del oligoceno y mioceno inferior del centro de la cuenca de Falcón*. Venezuela, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Geos 22, p: 3-60.
- Elliott D. (1982) *The construction of balanced cross-section* in Foster N. H. & Beamont E. A. (eds.) *Structural concepts and techniques I. Basic concept, folding and structural techniques*. AAPG publicación especial N° 9, p: 651.
- Escorihuela, N. y Rondon, J. (2002) *Estudio de las rocas ígneas que afloran en la parte central de Falcón*. Trabajo especial de grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Espínola, E. y Ollaves, R. (2002) *Estudio tectonoestratigráfico del borde septentrional de la cuenca de Barlovento, estado Miranda: Implicaciones neotectónicas*. Trabajo especial de grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Etchecopar, A.; Vasseur, G. y Daignieres, M. (1981) *An inverse problem in microtectonics for the determination of stress tensor from fault striation analysis*. Journal of Structural Geology, 3 (1), p: 51-65.
- Gamond, J. F. (1987) *Bridge structures as sense of displacement criteria in brittle fault zones*. Journal of Structural Geology, 9 (5/6), p: 609-620.

- González de Juana, C.; Iturralde, J. y Picard, X. (1980) *Geología de Venezuela y de sus cuencas petrolíferas*. Caracas, Editorial Foninves, II, 624 p.
- González, R. (1999) *Interpretación de un área y balanceo de una sección regional del flanco suroriental de Perijá (Sierra de Perijá-Costa occidental del lago de Maracaibo)*. Trabajo especial de grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Guevara, E. H. (1967) *The Santa Rita, Jarillal, and La Victoria formations*. Asoc. Ven. Geol. Min. Pet., Bol. Inform., 10, p: 51-70.
- Hancock, P. L.; Al-Kahdi, A.; Barka, A. A. y Bevan, T. G. (1987) *Aspects of analysing brittle structures*. Annales Tectonicae, 1, p: 5-19.
- Lisle, R. J. (1987) *Principal stress orientations for faults: and additional constraint*. Annales Tectonicae, 1 (2), p: 155-158.
- Macellari, C. E. (1995) *Cenozoic sedimentation and tectonics of the southwestern caribbean pull-apart basin, Venezuela and Colombia*. AAPG Memoir 62, p: 757-780.
- Marshak, S. y Mitra, G. (1988) *Basic methods of structural geology*. New Jersey, Prentice Hall, 446p.
- Marshak, S. y Woodward, N. (1988) *Introduction to cross section balancing*, in Marshak, S y Mitra, G., *Basic Methods of Structural Geology*, New Jersey, Prentice Hall, p:303-332.
- McClay K. R. (1990) *Glossary of thrust tectonics term*. in McClay K. R. (ed) *Thrust tectonic*. London. Chapman & Hall, p: 419-433.
- McClay K. R. y Buchanan, P. G. (1992) *Thrust fault in inverted extensional basins*. in McClay K. R. (ed) *Thrust tectonic*. London. Chapman & Hall, p: 93-104.
- Medwedeff, D. y Suppe, J. (1997) *Multibend fault-bend-folding*. Journal of Structural Geology, 19 (2-3), p: 279-292.
- Ministerio de Energía y Minas (1999). *Léxico Estratigráfico de Venezuela* [Documento en línea] Disponible: <http://www.pdv.com.ve/lexico/>. [Consulta: 2003, Noviembre]

- Mitra, S (1986) *Duplex structures and imbricate thrusts systems: Geometry structural position and hydrocarbon potential*. AAPG Bulletin 70 (9), p: 1087-1112.
- Mitra, S. (1992) *Balanced structural interpretations in fold and thrust belts*. in Mitra, S. y Fisher, G. *Structural Geology of Fold and Thrust Belt*, Baltimore, USA, Johns Hopkins University, p: 53-77.
- Mitra, S. (1993) *Geometry and kinematics evolution of inversion structures*. AAPG 77 (7), p: 1159-1191.
- Mount V.; Suppe J. y Hook S. (1990) *A forward modeling strategy for balancing cross-sections*. AAPG 74 (5), p: 521-531.
- Muessig, K. (1984) *Structure and cenozoic tectonics of the Falcon basin, Venezuela, and adjacent areas*. Geological Society of America, Memoir 162, p: 217-230.
- Parra, M. (2001) *Interpretación estructural y balanceo de un transecto regional del flanco sur de los Andes Venezolanos, estado Táchira*. Trabajo especial de grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Porras, L. (2000) *Evolución tectónica y estilos estructurales de la región costa afuera de las cuencas de Falcón y Bonaire*. Ponencia VII Simposio Bolivariano, Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas. Memoria, (p: 279-292), Caracas, Venezuela, Sociedad Venezolana de Geólogos.
- Ramsay, J. G. y Huber, M. I. (1983) *The techniques of modern structural geology*. London, UK, Academic Press INC, p: 700.
- Suppe, J. (1983) *Geometry and kinematics of fault-bend folding*. American Journal of Science, 283 (7), p: 684-721.
- Suppe, J. y Medwedeff, D. A. (1984) *Fault-propagation folding, Abstracts with Programs*. Geological Society of America, Bulletin 16, p: 670.
- Suppe, J. y Medwedeff, D. A. (1990) *Geometry and kinematics of fault-propagation-folding*. Eclogae Geol. Helv., 83 (3), p: 409-454.
- Suppe J. (1985) *Principles of structural geology*. New Jersey, Prentice Hall, 537p.
- Sutton, F. A. (1946) *Geology of the Maracaibo basin, Venezuela*. AAPG, Bulletin 30, p: 1621-1741.

- Tearpock, D. y Bischke, R. (1991) *Applied subsurface geological mapping*. New Jersey, Prentice Hall, p: 646.
- Wheeler, C. (1960) *Estratigrafía del oligoceno y mioceno Inferior de Falcón occidental y nororiental*. Ponencia presentada en el III Congreso Geológico Venezolano, Boletín Geológico, Publicación Especial 3, p: 407-465.
- Williams, G D.; Powell, C. M. y Cooper, M. A. (1989) *Geometry and kinematics of inversion tectonics*, in Cooper M. A. & William, G. D. *Inversion Tectonics*, London, The Geological Society, p: 3-15.

# **ANEXOS**