

**ESTILO ESTRUCTURAL ASOCIADO AL SISTEMA DE FALLAS LAS
MERCEDES EN EL SECTOR DE LOURDES Y GRAMALOTE, NORTE DE
SANTANDER**

NELSON RICARDO LÓPEZ HERRERA



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2014

**ESTILO ESTRUCTURAL ASOCIADO AL SISTEMA DE FALLAS LAS
MERCEDES EN EL SECTOR DE LOURDES Y GRAMALOTE, NORTE DE
SANTANDER**

NELSON RICARDO LÓPEZ HERRERA

**Trabajo de Grado para optar al título de
Geólogo**

Director

**FRANCISCO ALBERTO VELANDIA PATIÑO
Geólogo Msc.**

Codirector

**ANA MILENA CARDOZO ORTÍZ
Geóloga**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2014

AGRADECIMIENTOS

Al Servicio Geológico Colombiano y a sus funcionarios Diego Ibáñez, Eduardo Castro, Marlene Melo y Alberto Ochoa, por la valiosa experiencia, su guía y apoyo.

A la Universidad Industrial de Santander, en especial a la Escuela de Geología por su gran contribución en mi formación académica y personal.

A mi Director el Profesor Francisco Velandia y mi Codirectora Ana Milena Cardozo por su constante apoyo y orientación en la realización de este proyecto.

A todos mis Profesores a lo largo de mi carrera.

Quiero también agradecer especialmente a Andrea Matajira por su constante apoyo, a Estefanía Castellanos, Hugo Patiño, María y Lina Cetina, por su ayuda incondicional.

Gracias a mis compañeros en la práctica empresarial y amigos Andrea, Mayra, Valentina, Paola y Giovanny.

DEDICATORIA

A MIS PADRES

CONTENIDO

	pág
RESUMEN	21
INTRODUCCIÓN	23
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	24
1.2 JUSTIFICACIÓN	24
2. OBJETIVOS	26
2.1 Objetivo general	26
2.2 Objetivos específicos	26
3. LOCALIZACIÓN	27
4. METODOLOGÍA.....	28
4.1 Fase 1 Recopilación de información bibliográfica.....	28
4.2 Fase 2 Interpretación Fotogeológica	28
4.3 Fase 3 Campo	30
4.4 Fase 4 Procesamiento e interpretación de datos	32
4.5 Fase 5 Elaboración del Informe Final	32
5. MARCO TEÓRICO.....	33
5.1 Deformación	36
5.2 Líneas y planos en el espacio	40
5.3 Indicadores cinemáticos	42
5.4 Fracturas Subsidiarias (Riedel)	43
5.5 Método de análisis poblacional de fallas	46

5.6 Estilos estructurales	50
5.7 Procesamiento de datos	53
6. ANTECEDENTES	59
7. MARCO GEOLÓGICO Y TECTÓNICO REGIONAL	69
7.1 ESTRATIGRAFÍA	72
7.1.1 Neis de Bucaramanga (PEb).....	72
7.1.2 Ortoneis (PDo)	73
7.1.3 Formación Silgará (pDs).....	73
7.1.4 Formación Girón (Jg)	73
7.1.5 Grupo Uribante (K1u)	74
7.1.6 Formación Capacho (Cenomaniano-Turoniano) (K1c).....	75
7.1.7 Formación La Luna (Coniaciano-Campaniano temprano).....	75
7.1.8 Formación Colón (Campaniano tardío a Maastrichtiano temprano).	76
7.1.9 Formación Mito Juan (Maastrichtiano temprano-Maastrichtiano tardío).....	76
8. GEOLOGÍA DEL ÁREA.....	78
8.1 Estratigrafía	78
8.1.1 Neis de Bucaramanga (PEb).....	79
8.1.2 Formación Silgará (pDs).....	81
8.1.3 Ortoneis? (pDo)	83
8.1.4 Formación Tibú, Mercedes y Aguardiente (K1u).....	90
8.1.5 Formación Capacho (K1c).....	92
8.1.6 Formación La Luna (K1l).	93
8.1.7 Formación Colon-Mito Juan (K2cmj).....	95
8.2 Planos de falla medidos en campo	97

9. ANÁLISIS CINEMÁTICO	107
10. RESULTADOS	113
10. 1 Procesamiento de estrías de falla.	113
10.1.1 Datos Neoformados y Reactivados	115
10.1.2 Datos Incompatibles	117
10.1.3 Datos Incompatibles-Compatibles	119
10.1.4 Datos Incompatibles-Incompatibles	121
10.2 Procesamiento por tipo de falla.	123
10.2.1 Fallas normales	123
10.2.2 Fallas inversas	126
10.2.3 Fallas inversas neoformadas y reactivadas	126
10.2.4 Fallas inversas “incompatibles”	127
10.2.5 Fallas inversas incompatibles-compatibles	128
10.2.6 Fallas de rumbo	129
10.2.7 Fallas de rumbo neoformadas y reactivadas	130
10.2.8 Fallas de rumbo incompatibles	132
10.3 Procesamiento por estructura.	133
10.3.1 Corredor falla Las Mercedes	134
10.3.2 Corredor falla Gramalote	135
10.3.3 Bloque colgante de la falla Las Mercedes (Macizo de Santander)	136
10.3.4 Bloque yacente de la falla Las Mercedes	139
10.4 Procesamiento de diaclasas	140
10.5 Datos de Foliación	142
11. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	147

12. CONCLUSIONES.....	151
13. RECOMENDACIONES	153
BIBLIOGRAFÍA.....	154
ANEXOS.....	160

LISTA DE FIGURAS

pág

Figura 1. Localización del área de trabajo.	27
Figura 2. Imagen LandSat en falso color del área de estudio. En Negro se visualizan algunos lineamientos y en recuadros azules las zonas urbanas.	29
Figura 3. Mapa de sombras del área de estudio. En rojo se visualizan los lineamientos.....	30
Figura 4. Círculo de Mohr. Representación de las regiones correspondientes a los dominios estable, de fallas reactivadas y dominio inestable.....	35
Figura 5. Esquema de una falla rotacional en tijera.	38
Figura 6. Orientación de los principales ejes de esfuerzos y representación en “balones de playa” para diferentes tipos de fallas. En gris se representa la compresión y en blanco la extensión.....	39
Figura 7. Orientación de una línea (a) Trend t, Plunge p; (b) Pitch o Rake r	40
Figura 8. Representación estereográfica de una lineación sobre un plano.....	41
Figura 9. Relación de las estructuras Riedel y los esfuerzos principales. La utilidad como indicador cinemático se basa en que entre R y R' se orienta el vector de presión σ_1	44
Figura 10. Esquema ilustrativo sobre el origen de escalones "opuestos al movimiento" y su relación con estructuras Riedel. En este caso los escalones se interpretarían como criterio de suavidad negativo. El vector de compresión (σ_1) se orienta entre R y R'.	46
Figura 11. Régimen tectónico en función de la orientación de los ejes de esfuerzos.	48

Figura 12. Régimen tectónico basado en el cálculo del tensor de esfuerzos (o paleoesfuerzos) y su representación en el círculo de Mohr.	49
Figura 13. Representación gráfica del estilo estructural de escamación delgada que afecta la cobertera sedimentaria, desarrollándose cabalgamientos con geometría controlada por zonas de rampa y zonas de llana.	51
Figura 14. Representación gráfica del estilo estructural de piel gruesa que involucra el basamento, donde los cabalgamientos presentan alto ángulo de falla con un despegue profundo.	52
Figura 15. Modelo de sistemas de cabalgamientos y estructuras asociadas.	53
Figura 16. Representación según Angelier de la cinemática de planos de falla. La falla 1 (punto color rojo) representa una falla de rumbo dextral, la falla 2 (punto verde) simboliza una falla normal (la flecha que representa el movimiento del bloque colgante apunta hacia la dirección del buzamiento), la falla 3 (color azul) representa una falla inversa.	55
Figura 17. Representación del análisis cinemático de fallas con una pelota de playa. En este caso el diagrama indica un régimen de fallamiento en rumbo. En rojo se observan 2 planos verticales con orientaciones NE-SW y NW-SE (falla y plano auxiliar)	57
Figura 18. Esquema tectono-estratigráfico de Norte de Santander. En recuadro café se resalta la zona de estudio.	63
Figura 19. Esquema estructural y corte geológico del departamento de Norte de Santander. En rojo el trazo de la falla Las Mercedes y en verde la Falla de Gramalote. En recuadro café se resalta la zona de estudio.	64
Figura 20. Contexto geodinámico del norte de Suramérica. En rojo se visualiza las direcciones de convergencia tectónica, relacionados a la interacción de las placas de Nazca, Suramericana y Caribe. En negro se ilustra la cinemática de las principales fallas regionales.	65
Figura 21. Sistema regional de Fallas Morronegro – Las Mercedes (27) y Pamplona – Chitagá (28).	66

Figura 22. Cartografía geológica antecedente del área de estudio y zonas adyacentes. A) Mapa geológico de la Plancha 86 “Ábrego”, B) Geología del Cuadrángulo G-13 Cúcuta, C) Mapa de Unidades Geológicas Superficiales de un Sector de Gramalote. D) Mapa Geológico de la Plancha 98 “Durania”. En el círculo negro nótese el desplazamiento sinistral de la falla Villa Caro, evidenciado en el contacto de la formación Silgará (pDs) y la formación Girón (Jg).....	67
Figura 23. Ubicación geográfica del Macizo de Santander. En el recuadro café se resalta el área de estudio.....	70
Figura 24. Columna Estratigráfica generalizada de la Cuenca Catatumbo, se resaltan las unidades presentes en la zona de estudio.	77
Figura 25. Mapa geológico de la Plancha 87-III con unidades cronoestratigráficas, las estaciones de trabajo se identifican con círculos morados.	78
Figura 26. Características generales del Neis anfibólico a) Afloramiento b) Bandeamiento sinuoso.	80
Figura 27. Características del Neis de Bucaramanga (Grado de alteración, cerro El Espartillo).....	80
Figura 28. Suelo residual color pardo rojizo areno-limoso de la Formación Silgará.	82
Figura 29. Filitas de la Formación Silgará a) Afloramiento y b) detalle.	83
Figura 30. NRL018-1: contacto intrusivo entre Ortoneis y Neis de Bucaramanga. Se aprecia el contraste entre los suelos residuales: de color claro y composición granular el suelo residual del Ortoneis y de composición areno-limosa y de tono café oscuro el suelo residual de Neis de Bucaramanga.	84
Figura 31. Contacto entre La Formación Noreán? (J1-2n) y el Ortoneis (pDo).....	85
Figura 32. Cristales de feldespato potásico tabulares de más de 1cm de diámetro en muestra de Ortoneis.	86
Figura 33. Suelos residuales areno-granulares producto de la meteorización del Ortoneis.	86
Figura 34. Afloramiento de Ortoneis en el río Sardinata, enriquecido en Feldespato potásico.	87

Figura 35. a) Afloramiento del Ortoneis fuertemente alterado. b) detalle del Ortoneis. Los tonos grises se deben al avanzado estado de alteración.....	88
Figura 36. En verde se resalta la orientación preferencial de los cristales en el Ortoneis.	88
Figura 37. Ortoneis intruído por vena posiblemente de epidota a) Afloramiento b) detalle.	90
Figura 38. a) Afloramiento de lodolitas negras friables a la base suprayacidas en contacto neto con lodolitas más competentes con estratificación ondulosa. b) detalle de los óxidos	91
Figura 39. Alternancia de capas tabulares de calizas y arcillolita.	92
Figura 40. Boudinage en calizas de la Formación La Luna.	93
Figura 41. Capas tabulares de caliza esparítica alternada con chert en la vía Gramalote-Villa Caro. Formación La Luna.....	94
Figura 42. Nódulos ferruginosos. Formación Colón y Mito Juan.....	97
Figura 43. Silleta de falla y cauce desviado por un lomo de obturación por efecto de una falla con componente dextral. Fotografía tomada en dirección 280° de Azimuth.	99
Figura 44. Planos de fallas medidos.	101
Figura 45. Planos de falla estriados.	103
Figura 46. Planos de falla recristalizados de la estación NRL117. Alternancia de capas de caliza y chert de la Formación la Luna. Obsérvese a) plano N15W/30NE Pitch 80 al NE Tipo normal-dextral, b) plano axial con orientación N80W/75NE.	104
Figura 47. Plano de falla estriado con orientación N40W/29SW Pitch 46 al W o NW tipo inversa-sinestral. La superficie presenta recristalización con minerales fibrosos de caliza.....	105
Figura 48. Estructuras en NRL120. a) Plano de falla estriado con orientación N21E/47SE pitch 65 al SE tipo inversa-sinestral. La superficie presenta recristalización con carbonatos. En rojo se resalta la dirección de las estrías y en negro el rumbo del plano.	106
Figura 49. Clasificación de las fallas según Pitch y buzamiento del plano.....	107

Figura 50. Mapa estructural de la plancha 87-III. Con una estrella morada se señalizan las estaciones donde se midieron planos estriados. Las fallas rojas son las cartografiadas en el mapa de unidades geológicas superficiales del sector de Gramalote.	108
Figura 51. Ventana de entrada de datos en el programa FaultKin para el cálculo del tensor del valor de la orientación de la estría (StriaeTrend) y su inmersión (Plunge). Los datos de entrada son el Rumbo de la falla (Fault Strike) y su buzamiento (Dip), además del valor del Pitch (Rake)	109
Figura 52. Ventana de entrada de datos software WinTensor. En las celdas se introducen los datos correspondientes a Id (ej. número de estación), Format (21 para ingresar datos en Dip direction/Dip) Type (4 para datos de diaclasas), Dip Direction, Dip, Sense (C; para asumir origen de diaclasas debido a compresión), Level (Nivel de certeza del dato).....	111
Figura 53. Visualización de 67 Planos de falla medidos en Diagrama de Angelier	113
Figura 54. Planos de falla. Se aprecia un predominio de los planos con orientación NE/SW y los buzamientos predominantes son de 70 a 90°	114
Figura 55. Circulo de Mohr y datos de fallas representados en el. 34 datos compatibles y 32 incompatibles.	115
Figura 56. a) Diagrama de Angelier de los planos de falla Neo-formados y Reactivados, b) Círculo de Mohr, c) Balón de playa, d) Diagrama PBT	116
Figura 57. Localización de los planos de fallas estriados Neoformados y reactivados. Las estrellas amarillas representan las estaciones donde se midieron los planos de falla procesados.....	117
Figura 58. Resultado del procesamiento de los 32 datos de planos de falla incompatibles. a) Diagrama de Angelier, b) Círculo de Mohr, c) Balón de playa, d) Diagrama PBT.	118
Figura 59. Resultado del procesamiento de los 19 datos incompatibles-compatibles a) Diagrama de Angelier, b) Círculo de Mohr, c) Balón de playa, d) Diagrama PBT.	119

Figura 60. Localización de los planos de falla incompatibles-compatibles (estrellas amarillas).	120
Figura 61. Resultado del análisis a los datos incompatibles-incompatibles a) Diagrama de Angelier, b) Círculo de Mohr, c) Balón de playa, d) Diagrama PBT.	121
Figura 62. Distribución geográfica de los planos de fallas incompatibles-incompatibles.	122
Figura 63. Resultado del procesamiento a los datos de fallas normales a) Diagrama de Angelier, b) Círculo de Mohr, indica una buena correlación de las 19 fallas normales medidas; presentándose casi en su totalidad en el campo de reactivadas. c) Balón de playa, d) Diagrama PBT.	123
Figura 64. Distribución geográfica de los datos de fallas normales. Con estrellas amarillas se resaltan las estaciones donde se midieron los datos utilizados en el procesamiento. En estrellas blancas se visualizan otras estaciones con planos estriados que no se utilizaron para el análisis.	124
Figura 65. De los 25 planos de falla medidos 13 se encuentran en el campo de neoformadas y reactivadas.	126
Figura 66. Resultado del procesamiento del subconjunto de fallas inversas-neoformadas y reactivadas. a) Diagrama de Angelier, b) Círculo de Mohr c) Balón de playa, d) Diagrama PBT.	127
Figura 67. Círculo de Mohr del subconjunto de fallas inversas incompatibles. Se observa que los datos están muy dispersos.	128
Figura 68 a) Diagrama de Angelier, b) Círculo de Mohr, c) Balón de playa, d) Diagrama PBT; para el subconjunto Fallas inversas incompatibles-compatibles,	128
Figura 69. Fallas de rumbo en el círculo de Mohr. Cinco datos son incompatibles.	130
Figura 70. Resultado del procesamiento de las fallas de rumbo neoformadas-reactivadas. a) Círculo de Mohr, b) Diagrama de Angelier c) balón de playa para el sub-subconjunto fallas de rumbo neoformadas y reactivadas, d) diagrama PBT.	130

Figura 71. Resultado del análisis de las fallas de rumbo incompatibles.a) diagrama de Angelier b) Círculo de Mohr, c) balón de playa para el sub-subconjunto fallas de rumbo neoformadas y reactivadas, d) diagrama PBT.	132
Figura 72. Asociación de datos por estructura. Los datos en la región celeste corresponden al bloque colgante de la falla Las Mercedes y en la región naranja al bloque yacente. En la región delimitada por la línea morada se encuentran los datos asociados al corredor de la falla Las Mercedes, en la región delimitada con color rojo, se encuentran los datos asociados a la falla Gramalote.	133
Figura 73. Procesamiento de los planos estriados a lo largo del corredor de la falla Las Mercedes. a) Diagrama de Angelier, b) Círculo de Mohr, se observa gran compatibilidad entre los datos c) Balón de playa (método NDA), d) Diagrama PBT.	134
Figura 74. Procesamiento de los datos asociados al corredor de la falla Gramalote. a) Diagrama de Angelier, b) Círculo de Mohr sugiriendo un régimen transpresivo, también se observa que la gran mayoría de datos son compatibles mecánicamente entre sí. c) Balón de playa calculado por el método NDA, se observa la orientación N-S del plano principal. d) Diagrama PBT.	135
Figura 75. Datos de planos de falla estriados en el bloque colgante de la falla Las Mercedes. a) Diagrama de Angelier, b) Círculo de Mohr clasificando los datos en neoformados-reactivados e incompatibles.....	137
Figura 76. Resultado del procesamiento de los planos estriados en el bloque colgante de la falla Las Mercedes. a) Diagrama de Angelier, b) Círculo de Mohr sugiriendo un régimen transcurrente, también se observa que la gran mayoría de datos son compatibles mecánicamente entre sí. c) Balón de playa calculado por el método NDA, d) Diagrama PBT.....	137
Figura 77. Resultado del procesamiento de datos del bloque yacente de la falla Las Mercedes. . a) Diagrama de Angelier, b) Círculo de Mohr, se observa gran compatibilidad entre los datos c) Balón de playa (método NDA), d) Diagrama PBT.	139

- Figura 78.** Diagrama de rosa de los datos de diaclasas. Aunque bastante dispersos, predominan los planos con rumbo NNW-SSE y los buzamientos entre 70-90° ...140
- Figura 79.** Resultado del análisis PBT para los datos de diaclasas. Orientación de σ_1 10/309 (plunge/trend). En la parte izquierda se visualizan los parámetros estadísticos obtenidos por WinTensor al calcular la orientación del eje de máxima presión P (σ_1).141
- Figura 80.** Diagrama de rosa de los datos de foliación mediante TectonicsFP...142
- Figura 81.** Esquema ilustrando la inversión cinemática de la falla Villa Caro. Bajo una máxima compresión en sentido E-W la cinemática sería sinistral. Con un vector de presión en azimuth 147°, la cinemática sería dextral.147
- Figura 82.** Gancho de flexión asociado a la falla Villa Caro, sugiriendo movimiento dextral.148

LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Síntesis del modelo tectono-estratigráfico de la Cuenca Catatumbo61

Tabla 2. Síntesis de los resultados del análisis de los indicadores cinemáticos. 143

LISTA DE ANEXOS

pág.

ANEXO A. MAPA GEOLÓGICO Y ESTRUCTURAL. PERFILES160

ANEXO B. TABLA DE DATOS DE PLANOS DE FALLA ESTRIADOS162

ANEXO C. TABLA DE DATOS DE DIACLASAS MEDIDAS.....170

ANEXO D. TABLA DE DATOS DE PLANOS DE ESTRATIFICACIÓN185

RESUMEN

TÍTULO: ESTILO ESTRUCTURAL ASOCIADO AL SISTEMA DE FALLAS LAS MERCEDES EN EL SECTOR DE LOURDES Y GRAMALOTE, NORTE DE SANTANDER*

AUTOR: NELSON RICARDO LÓPEZ HERRERA.**

PALABRAS CLAVE: Estilo Estructural, Falla Las Mercedes, Lourdes, Gramalote, Villa Caro.

Este documento es el resultado del trabajo de grado realizado bajo la modalidad de Práctica Empresarial, llevada a cabo con el Servicio Geológico Colombiano. El área de estudio comprende territorio de los municipios de Villa Caro, Lourdes y Gramalote, en la plancha 87-III del IGAC. El estudio comprende el levantamiento, compilación y procesamiento de indicadores cinemáticos con el fin de obtener tensores de esfuerzos que permitan modelar y definir el estilo estructural del sector.

El análisis poblacional de fallas se realizó mediante el método de Análisis Numérico Dinámico (DNA) y P-T, para conjuntos de datos agrupados por su coherencia mecánica, la cual se estableció mediante el círculo de Mohr, así, se establecieron 3 subconjuntos de datos. Las soluciones obtenidas al tensor de esfuerzo con estos 3 sets de planos de falla estriados sugieren una variación temporal en el campo de esfuerzos, desde una compresión máxima en dirección E-W a NW-SE, esta última dirección de compresión se obtuvo también mediante el análisis de los datos agrupados según su relación con el trazo de las fallas principales, asociados al bloque colgante de la falla Las Mercedes (secuencia sedimentaria) y mediante el estudio de las diaclasas.

Como resultado del procesamiento de los datos asociados a la traza de la falla Las Mercedes y la falla Gramalote se obtuvieron resultados similares, un régimen transpresivo con una dirección NW-SE para el eje de presión máxima, sugiriendo una relación genética entre estas estructuras, manifestada en un estilo estructural de escamación de piel delgada que afecta la secuencia sedimentaria cretácica y escamación de piel gruesa que afecta el Macizo de Santander en un arreglo en abanico imbricado con vergencia hacia el este. Este sistema de fallas bajo el tensor de esfuerzos reciente de máxima compresión en sentido NW-SE presentaría una cinemática oblicua inversa-sinistral.

* Proyecto de Grado. Modalidad: Práctica Empresarial.

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Universidad industrial de Santander.

ABSTRACT

TITLE: STRUCTURAL STYLE ASSOCIATED WITH THE SYSTEM FAILURES LAS MERCEDES IN THE AREA OF LOURDES AND GRAMALOTE, NORTE DE SANTANDER *.

AUTHOR: NELSON RICARDO LÓPEZ HERRERA.**

KEY WORDS: Structural Style, Mercedes Fault, Lourdes, Gramalote, Villa Caro.

This document is the result of the work realized in the modality “internship” with the Geological Colombian Service, the study was developed in the municipalities of Villa Caro, Lourdes and Gramalote, in the topographic sheet 87-IGAC; The study area comprehends the lifting, compilation and processing of kinematic indicators in order to obtain stress tensor that allow to model and define the structural sector.

The poblational analysis of the faults was made by the method of Dynamic Numerical Analysis (DNA) and PBT for data sets grouped by their mechanical coherence, which was established by Mohr's circle, like that three subsets of data were established. The solutions obtained to the stress tensor with these three sets of splined fault planes suggest a temporal variation in the stress field, from maximum compression to EW NW-SE the compression direction of the last one was obtained analyzing the data grouped according to their relation with the stroke of the main faults, associated to the hanging block of the Las Mercedes (sedimentary sequence) faults and by the study of the joints.

As a result of the data processing associated to the trace of the Las Mercedes and the Gramalote faults, similar results were obtained, a transpressive regimen with a NW -SE direction to the axis of maximum pressure suggesting a genetic relation between these structures, manifested as an structural style of peeling thin skin that affects the Cretaceous sedimentary sequence and scaling of thick skin that affects the Santander Massif in a verging fix imbricated range eastward. This fault system under the stress tensor of recent maximum compression in direction NW-SE would present an oblique sinistral- reverse kinematics.

* Grade Work Modality “Internship”

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Geology. Universidad Industrial de Santander

Director: M.Sc. Francisco Alberto Velandia.

Codirector: Ana Milena Cardozo Ortiz.

INTRODUCCIÓN

A través de un convenio entre la Universidad Industrial de Santander (UIS) y el Servicio Geológico Colombiano (SGC) se realizó la vinculación de estudiantes de pregrado en Geología bajo la Modalidad de Práctica Empresarial para participar en el Proyecto de “Cartografía Geológica y Muestreo Geoquímico de las planchas No. 87 y 88” correspondiente a los municipios Sardinata y Cúcuta respectivamente, realizado por la Subdirección de Geología Básica del SGC, el cual en cumplimiento de sus objetivos misionales adelanta labores de actualización de la cartografía geológica del país.

El presente documento corresponde al Trabajo de Grado en modalidad de Práctica Empresarial llevado a cabo de forma paralela a otros cinco Proyectos de Grado en los que se abarcan específicamente los temas de análisis sedimentario y estratigráfico, geología estructural, estudios petrográficos y amenazas naturales. Este trabajo se enfoca en la parte estructural y tiene como objetivo definir el estilo estructural de la zona, para lo cual se realizó el levantamiento y procesamiento de indicadores cinemáticos apoyado en la cartografía geológica realizada en conjunto con geólogos del SGC.

Debido a las cláusulas de confidencialidad, los mapas geológicos y estructurales presentados en este trabajo, son modificados y adaptados del mapa geológico de la plancha 6 a escala 1:500.000 del Atlas Geológico de Colombia, así mismo los perfiles geológicos se adaptaron a esta cartografía y sus unidades cronoestratigráficas.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la zona de estudio no se cuenta con suficiente información detallada de carácter geológico, la cartografía existente se basa principalmente en fotointerpretación, razón por la cual aún no se conoce muy bien la geología del sector. La cuenca Catatumbo y el Macizo de Santander son regiones de gran interés debido a su potencial en recursos naturales minero-energéticos, razón por la cual se hace necesario conocer y comprender la geología presente en la región y su evolución a través del tiempo.

Al identificar el estilo estructural de la Falla Las Mercedes se contribuye al conocimiento geológico de la región, aportando valiosa información que será útil para posteriores estudios y programas de exploración y aprovechamiento de los recursos naturales y evaluación de amenazas geológicas de la región; para esto se hace necesario llevar a cabo la cartografía geológica del sector y además el levantamiento y procesamiento de indicadores cinemáticos que permitan la obtención del tensor de esfuerzos (o paleoesfuerzos).

1.2 JUSTIFICACIÓN

La zona comprendida entre el municipio Lourdes y Gramalote ha sido poco estudiada. La información geológico-cartográfica oficial pre-existente corresponde a la publicada por Servicio Geológico Nacional e Inventario Minero Nacional, (1967) “Geología del Cuadrángulo G-13 Cúcuta” producto de la compilación de mapas de la compañía *Colombia Petroleum Co.* (Colpet) y mapas fotogeológicos aportados por *Geofoto Services Inc.* Razón por la cual se hace realizó un control de campo con el fin de complementar la geología de la región.

Este trabajo en modalidad de Práctica Empresarial está enmarcado en el Proyecto “Cartografía Geológica y Muestreo Geoquímico de las planchas 87 y 88” de la Subdirección de Geología Básica del Servicio Geológico Colombiano, pretende realizar control de campo y cartografía a escala 1:100.000 enfocado en la toma de datos estructurales e indicadores cinemáticos que soporten el planteamiento del estilo estructural de la zona, asociado a la Falla Las Mercedes.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Definir el estilo estructural asociado al sistema de Fallas Las Mercedes en el sector de Lourdes Gramalote, Norte de Santander.

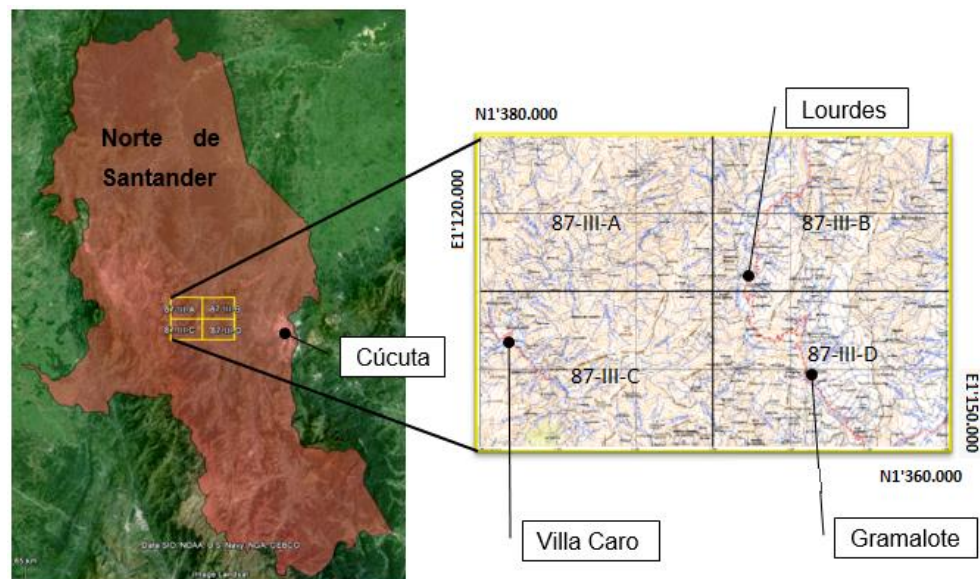
2.2 Objetivos específicos

- Participar en la cartografía geológica a escala 1:25000 de las planchas 87-III-A y 87-III-B, 87-III-C, 87-III-D
- Levantamiento, procesamiento e interpretación de indicadores cinemáticos y datos estructurales.
- Obtener tensores locales (y campo de esfuerzos) de la zona estudiada basado en indicadores cinemáticos.
- Proponer un modelo estructural basado en cortes geológicos transversales de la zona afectada por la Falla Las Mercedes y estructuras asociadas.

3. LOCALIZACIÓN

La zona de estudio se encuentra en el departamento de Norte de Santander, planchas 87-III-A, 87-III-B, 87-III-C y 87-III-D (Figura 1) entre las coordenadas E1'120.000 a E1'150.000 y N1'360.000 a N1'380.000 (Origen Bogotá, Datum MAGNA-SIRGAS); un total de 600Km², comprendiendo territorio de los municipios de Villa Caro, Lourdes, Bucarasica y Gramalote. Fisiográficamente la zona Este corresponde a la cuenca del Catatumbo-Zulia y el Oeste a la Cordillera Oriental; Macizo de Santander el cual se limita al este por el sistema de fallas Las Mercedes y Chitagá-Chucarima (INGEOMINAS, 2008). El acceso a la zona desde Cúcuta se hace por la vía Al Zulia, Cornejo, Santiago y Gramalote en donde se encuentra el desvío a los Municipios de Lourdes por vía pavimentada y a Villa Caro por vía no pavimentada.

Figura 1. Localización del área de trabajo.



Fuente: Tomado y modificado; *Google Earth*, departamento Norte de Santander (Consultado, Octubre de 2013) e *IGAC*, plancha topográfica 87 (2006).

4. METODOLOGÍA

La metodología llevada a cabo para cumplir a cabalidad los objetivos planteados comprende las siguientes fases:

4.1 Fase 1 Recopilación de información bibliográfica

Se consultaron y analizaron libros, artículos científicos, revistas, trabajos de grado, informes internos de INGEOMINAS (Actualmente SGC) y Esquemas de Ordenamiento Territorial (EOT), con el fin de obtener información de carácter geológico sobre la zona de estudio; estudios anteriores en el sector, mapas geológicos, columnas estratigráficas y cualquier otra información pertinente. Además se consultó información bibliográfica correspondiente a propuestas metodológicas para la cartografía geológica, toma, procesamiento e interpretación de datos estructurales (estrías, diaclasas y foliaciones). Así mismo, se consultaron guías de fotointerpretación.

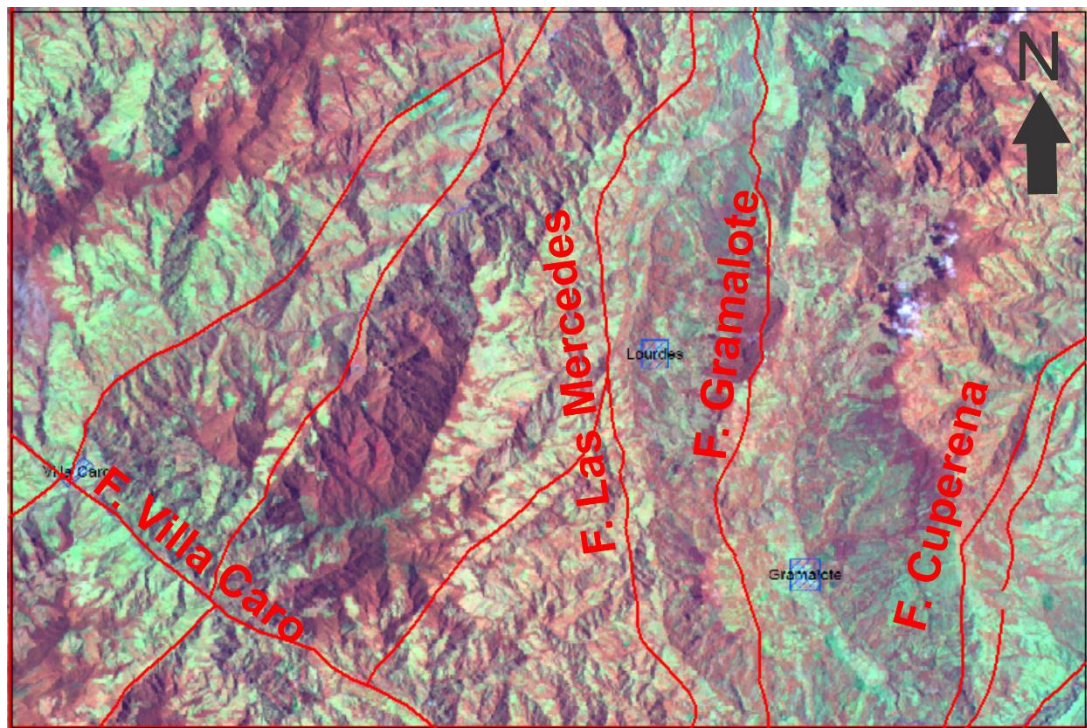
4.2 Fase 2 Interpretación Fotogeológica

Con el uso de fotografías aéreas en pares estereoscópicos, imágenes de Radar, LandSat ETM+ (*Figura 2*) en falso color (combinación de bandas RGB 4,5,2,) además de Modelos Digitales del Terreno y mapa de sombras (*Figura 3*) en escala 1:100.000 de la plancha 87 y, con el uso de los Software *Google Earth*, *SAS Planet* y *ArcGIS* se realizó la fotointerpretación en la cual se utilizaron criterios de reflectividad, color, tonos, texturas y forma para delimitar zonas con características similares; en busca de contactos geológicos entre distintas formaciones geológicas. Además, se interpretaron y trazaron los lineamientos y rasgos geomorfológicos asociados (silletas de falla, facetas triangulares, cauces desviados etc.). Como guía

metodológica se utilizó el Curso de fotogeología, geomorfología y aplicaciones de la percepción remota (Mendivelso, 2008).

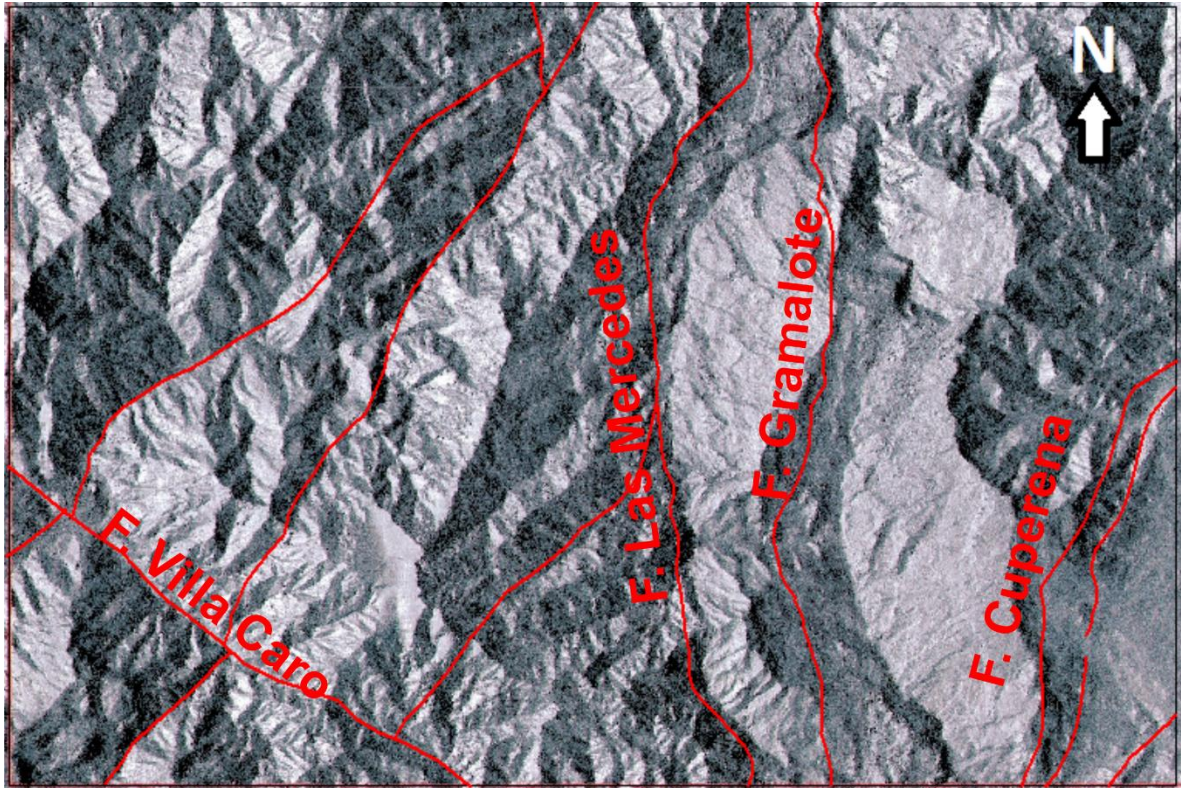
Se elaboró, en colaboración con todos los integrantes del grupo de trabajo, un mapa fotogeológico preliminar a escala 1:100.000 de la plancha topográfica 87 “Sardinata” del IGAC (2006).

Figura 2. Imagen LandSat en falso color del área de estudio. En Negro se visualizan algunos lineamientos y en recuadros azules las zonas urbanas.



Fuente: Servicio Geológico Colombiano.

Figura 3. Mapa de sombras del área de estudio. En rojo se visualizan los lineamientos.



Fuente: Servicio Geológico Colombiano.

4.3 Fase 3 Campo

Durante esta fase se realizaron transectas sobre el área correspondiente a las planchas 87-III-A y 87-III-C, donde se cubrió desde el Municipio de Villa Caro. En esta zona se recorrió la principal vía que conduce al Municipio de Gramalote y los distintos caminos hacia las veredas de Bella Vista, El Silencio, El Silicio y La Cueva.

Desde el municipio de Lourdes se cubrió áreas pertenecientes a las planchas 87-III-B Y 87-III-D (Gramalote), veredas El Edén, La Primavera, El Alto entre otras.

En campo se cartografió la geología de la zona teniendo en cuenta la fotointerpretación realizada y la cartografía preexistente del sector (cuadrángulo G13). Se realizó el estudio de rigor a los afloramientos encontrados. Se tomaron datos estructurales y especial atención a los planos estriados. Además se recolectaron muestras para posteriores estudios petrográficos llevados a cabo como parte de otros proyectos de grado vinculados a este proyecto del SGC.

En cada estación se determinaron características litológicas, estructurales y algunos aspectos de movimientos de remoción en masa, entre las cuales se encuentran: el tipo de roca, componentes principales, abundancia de los mismos, atribuyendo porcentajes relativos utilizando para ello, tablas de comparación visual, con lo cual, se clasificaron textural y composicionalmente. Siguiendo los protocolos y estándares del SGC.

Para los rasgos estructurales, en especial, los planos estriados se midieron el rumbo y el buzamiento del plano, además el pitch y su dirección. Se observó si el plano presentaba en su superficie recristalización y se determinó el tipo de falla y el sentido del movimiento relativo de los bloques mediante estructuras *Riedel* y escalones en caso de presentarse.

Como resultado de la fase de campo se definieron y cartografiaron 7 unidades geológicas informales para su posterior correlación con las unidades descritas en la literatura. Se elaboró un mapa geológico y estructural preliminar de la zona.

4.4 Fase 4 Procesamiento e interpretación de datos

En oficina se recopilaron los datos de estratificación, diaclasas y planos de falla estriados medidos en campo, se adaptaron a los formatos requeridos para su procesamiento a través de software como TectonicsFP 1.7.7, FaultKin 5 y WinTensor 4.0. Se digitalizaron los mapas de campo, se agruparon los datos según criterios geológicos de tal forma que su procesamiento permitiera deducir el carácter de los esfuerzos actuantes en la zona. Se representó gráficamente la información obtenida (diagramas de roseta, densidades etc.) con el fin de evaluar de forma cuantitativa y cualitativa los datos para encontrar tendencias que permitan dilucidar el comportamiento estructural de la zona.

4.5 Fase 5 Elaboración del Informe Final

Para esta fase se realizó la redacción del informe final donde se presenta un breve marco teórico en el cual se explican los fundamentos teóricos que soportan la metodología utilizada, el procesamiento e interpretación de los datos, los resultados obtenidos, la discusión sobre los mismos. Las conclusiones se presentarán en este trabajo de forma clara y concisa para dar cumplimiento a los objetivos planteados.

5. MARCO TEÓRICO

La geología estructural emplea métodos gráficos y numéricos que se han desarrollado en las últimas décadas, gracias a estos estudios (teóricos y experimentales) que permiten mediante datos de deformación medidos en campo, se pueden determinar la naturaleza (tipo y dirección) de los esfuerzos que la provocaron.

A continuación se presentan algunas de las técnicas utilizadas en la obtención de tensores de esfuerzos a partir de conjuntos de datos de estrías de falla medidos en campo y algunos conceptos teóricos que soportan el desarrollo de la presente investigación.

El planeta Tierra es dinámico, se encuentra en constante cambio debido a fuerzas internas que se manifiestan en el movimiento de la corteza terrestre y fuerzas externas que generan fenómenos erosivos y acumulativos que moldean la superficie. La Geología Estructural se encarga de estudiar las causas y los mecanismos por los cuales se producen deformaciones en la corteza terrestre.

A continuación se presentan algunos conceptos indispensables para el desarrollo de este estudio.

Esfuerzo: Es la fuerza por unidad de área. Cuando la fuerza actúa perpendicular a un plano se denomina **esfuerzo normal** y se simboliza con (σ). La componente del esfuerzo que actúa paralela a la superficie del plano se denomina **esfuerzo de corte o de cizalla** y se representa con el símbolo (τ).

Tensor de esfuerzos: Es una entidad matemática que describe la relación entre 2 vectores vinculados: el vector de fuerza y el vector de orientación del plano (Burg, 2011). El estado de esfuerzos en un punto es completamente descrito por nueve

componentes pero; debido a la simetría ($\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$) las nueve componentes se reducen a 6. Esta situación se simplifica más debido a que en un campo homogéneo de esfuerzos es posible encontrar tres planos mutuamente ortogonales intersectándose en un punto y orientados de tal forma que los esfuerzos de cizalla se vuelvan cero: $\tau_{12} = \tau_{23} = \tau_{31} = 0$. En este caso permanecen sólo las componentes normales del esfuerzo y

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \text{ Se vuelve } \begin{bmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{bmatrix}$$

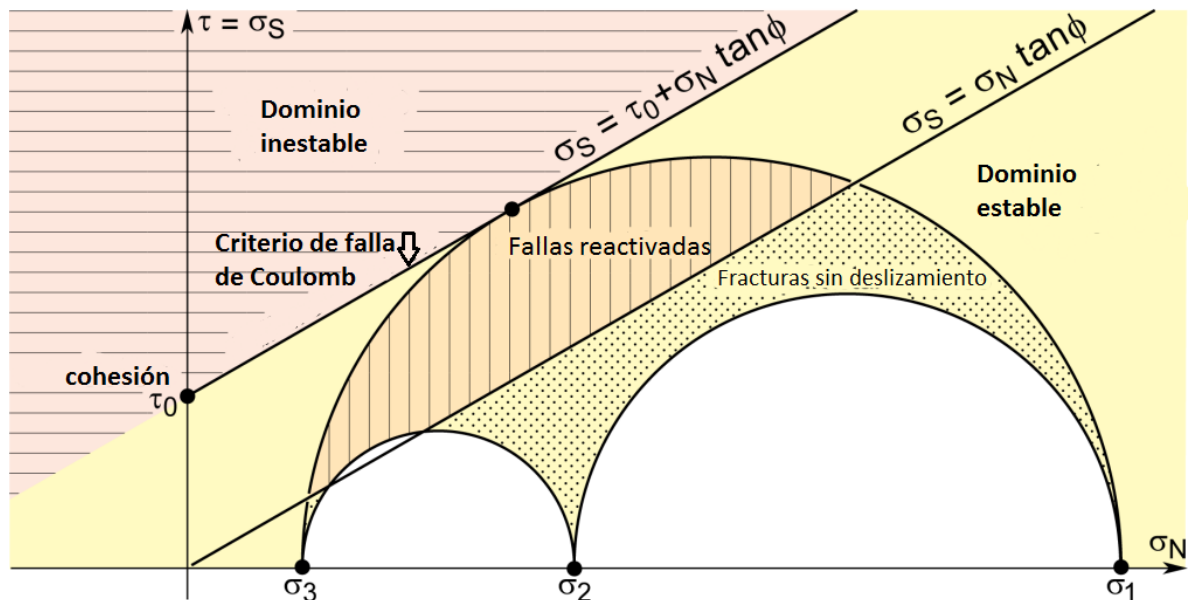
Esos tres planos sin esfuerzos de cizalla son los planos de esfuerzos principales e intersectan en tres líneas mutuamente perpendiculares conocidas como los **ejes de esfuerzos principales**. Los esfuerzos actuando a lo largo de esos tres ejes son los **esfuerzos principales** σ_{11} , σ_{22} , σ_{33} son denominados σ_1 , σ_2 y σ_3 con la convención de que $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$, el máximo, intermedio y mínimo esfuerzo principal respectivamente.

Círculo de Mohr: Es una representación gráfica de las ecuaciones que relacionan los esfuerzos normales y los esfuerzos de corte actuando en un plano. Por convención, en geología se consideran los esfuerzos compresivos con signo positivo (+) y los esfuerzos de tracción o tensionales con signo negativo (-). Cuando el esfuerzo actúa en dirección perpendicular al plano se denomina **esfuerzo normal** y se representa con la letra griega (σ). Si el esfuerzo es tangencial (o paralelo) al plano se denomina **esfuerzo de corte o de cizalla** y es representado por la letra griega (τ). En la abscisa se representa σ y en el eje de ordenadas (τ).

Cada plano de falla puede ser representado como un punto en el círculo de Mohr, esto se utiliza para discriminar poblaciones de fallas correspondientes a distintos eventos o régimen tectónico. Las fallas que son compatibles con un único tensor de esfuerzos van a tender a agruparse cerca de la línea envolvente al círculo de Mohr

(Figura 4) la cual representa el punto de fracturación (criterio de fractura de Coulomb); estas fallas se denominan *neo-formadas*. La línea paralela a la envolvente al círculo de Mohr que corta el eje de τ en el origen (*cohesión cero*) limita la región de planos (de falla) que son reactivadas por el tensor de esfuerzos. Los puntos que representan planos de falla que se encuentran por fuera de la región delimitada por la envolvente al círculo de Mohr y su paralela en el origen; se encuentran en un dominio estable, lo que significa que bajo el campo de esfuerzos o régimen tectónico representado en el círculo de Mohr (Figura 4) no se deslizan por lo tanto estas fallas son incompatibles con el tensor de esfuerzos calculado.

Figura 4. Círculo de Mohr. Representación de las regiones correspondientes a los dominios estable, de fallas reactivadas y dominio inestable.



Fuente: Tomado y Modificado de Burg, (2011).

5.1 Deformación

La deformación es cualquier cambio en el tamaño, posición, forma y orientación de un cuerpo debido a los esfuerzos actuantes sobre él.

Deformación finita: Es la cantidad total de deformación que se ha acumulado incrementalmente a lo largo de un periodo de tiempo mediante la suma de deformaciones menores. (Diccionario Ciencias de la Tierra, 2004).

Deformación progresiva: Acumulación a lo largo del tiempo de deformaciones incrementales en un cuerpo en respuesta a los esfuerzos. Las distorsiones y rotaciones acumuladas dentro del cuerpo deformado se suman hasta alcanzar un estado de deformación finita. (Diccionario Ciencias de la Tierra, 2004).

La deformación se puede dividir en tres tipos:

- Deformación frágil: consiste en la pérdida de continuidad en el cuerpo deformado, generalmente se producen bajo condiciones de baja presión y temperatura como las encontradas en las zonas más superficiales de la corteza terrestre.

La deformación frágil se divide en dos grupos principales: Fracturas sin desplazamiento (diaclasas) y fracturas con desplazamiento (fallas).

- Deformación plástica: no hay superficies de discontinuidad ni pérdida de cohesión. Se producen en condiciones de alta temperatura y presión; a grandes profundidades.
- Deformación elástica: se caracteriza por ser de carácter temporal; una vez los esfuerzos actuantes cesan, el cuerpo deformado vuelve a su estado original.

- **Diaclasas**

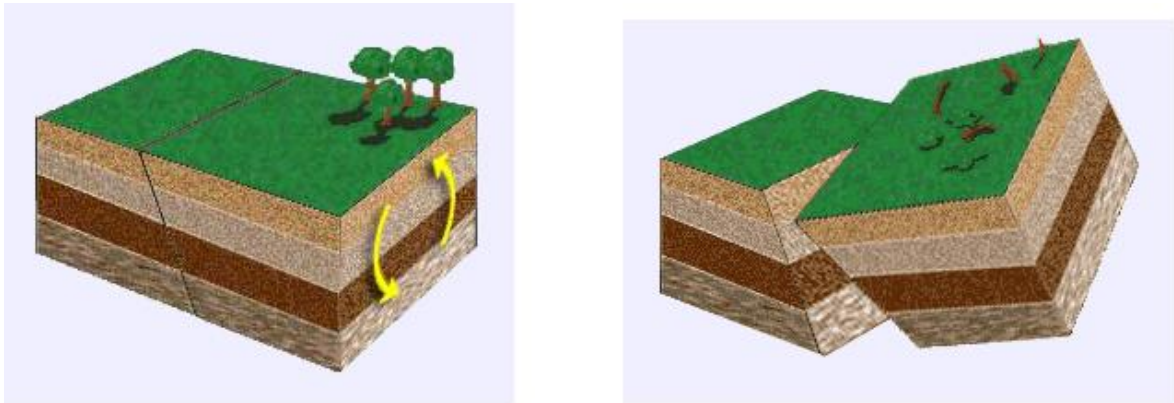
Son superficies de fracturas a lo largo de las cuales ha habido movimiento imperceptible, en donde la separación ni el deslizamiento pueden ser medidos, excepto en circunstancias especiales. Incluso cuando la separación a lo largo de una diaclasa puede ser medida, la magnitud y el sentido de la separación debe ser visto como una suma de todos los movimientos pasados y generalmente no como el producto de un simple movimiento. Las diaclasas pueden ser formadas de muchas maneras por lo que es comúnmente imposible distinguir entre los numerosos modelos interpretativos posibles que pueden explicar adecuadamente su formación (Davis, 1984).

- **Fallas**

Una falla es una fractura en la corteza terrestre que presenta un movimiento diferencial a lo largo del plano de fractura. Comúnmente una falla consiste de una fractura, pero en ocasiones consiste de una zona estrecha que contiene varias fracturas. Además una vez desarrollada como resultado de esfuerzos en la corteza terrestre, una falla forma una zona de debilidad en la que deformaciones posteriores fácilmente se pueden llevar a cabo. (Belousov, 1979)

Basados en su cinemática, las fallas se clasifican en tres tipos básicos: normales, inversas y de rumbo. Otro tipo de falla son las conocidas como rotacionales de tijera (Figura 6), en las que el bloque colgante rota con respecto a un eje perpendicular al plano de falla. Nótese que en este tipo de fallas hay un punto de nulo desplazamiento (circulo blanco en la Figura 6), que separa una región en la que la falla se comporta localmente como normal y otra región con movimiento inverso.

Figura 5. Esquema de una falla rotacional en tijera.



Fuente: Tomado de: Fallas Tectónicas {En Línea} Fecha {Enero 20 de 2014}

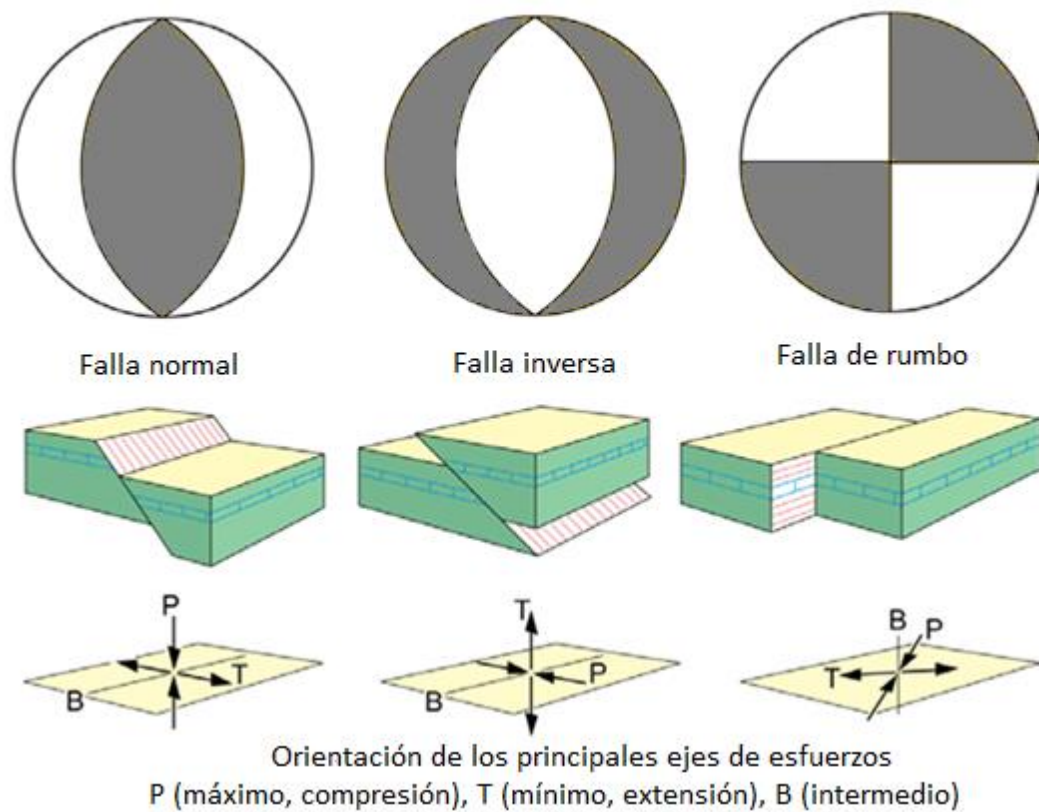
Disponible en: <http://platea.pntic.mec.es/~cmarti3/GEO/tect/fallas/index.htm>

En la Figura 6 se aprecia la clasificación de las fallas según su cinemática; cada tipo de falla se asocia con una disposición particular de los ejes de esfuerzos. En fallas normales el esfuerzo principal mayor (σ_1) es vertical provocando compresión en esta dirección (eje P), y extensión horizontal (eje T); esto se representa mediante un diagrama de balón de playa en el cual la región central corresponde a la compresión. En fallas Inversas σ_1 (eje P) es horizontal y en dirección perpendicular al rumbo de la falla, σ_3 (eje T) es vertical; en su correspondiente balón de playa la compresión se encuentra en la zona central. Por su parte; en las fallas de rumbo σ_1 y σ_3 son horizontales y σ_2 (eje B) es vertical, los diedros que representan la compresión y la extensión se alternan entre sí.

En la naturaleza son comunes las fallas con un movimiento oblicuo (movimiento con componente horizontal y vertical), esto es evidenciado en las marcas que quedan como resultado de la fricción entre las caras de la roca al desplazarse. Estas marcas, generalmente son rasgos lineales a lo largo del plano de falla, que indican

la dirección del movimiento y en ocasiones el sentido de este, más no necesariamente su magnitud.

Figura 6. Orientación de los principales ejes de esfuerzos y representación en “balones de playa” para diferentes tipos de fallas. En gris se representa la compresión y en blanco la extensión.



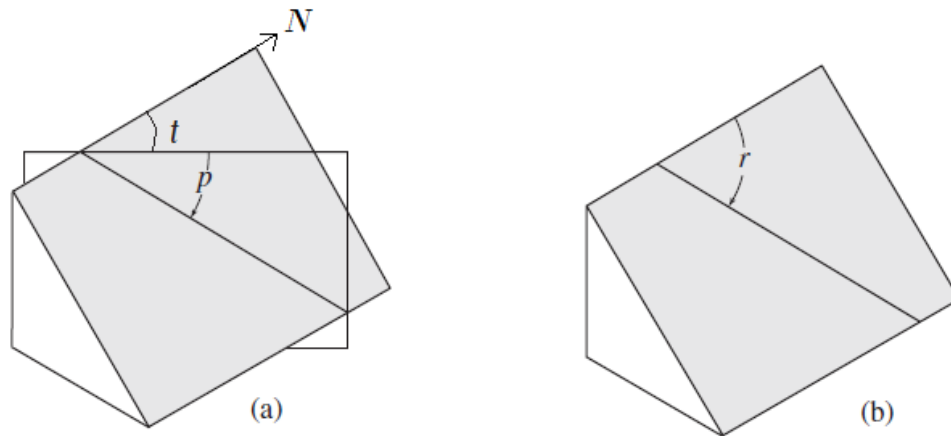
Fuente: Tomado y adaptado de Burg (2011).

5.2 Líneas y planos en el espacio

Las estrías de falla son rasgos geométricos lineales localizados en un plano (Figuras 8 y 9), para orientar estas líneas (estrías) y representarlas en un diagrama de *stereonet* es necesario entender los siguientes conceptos:

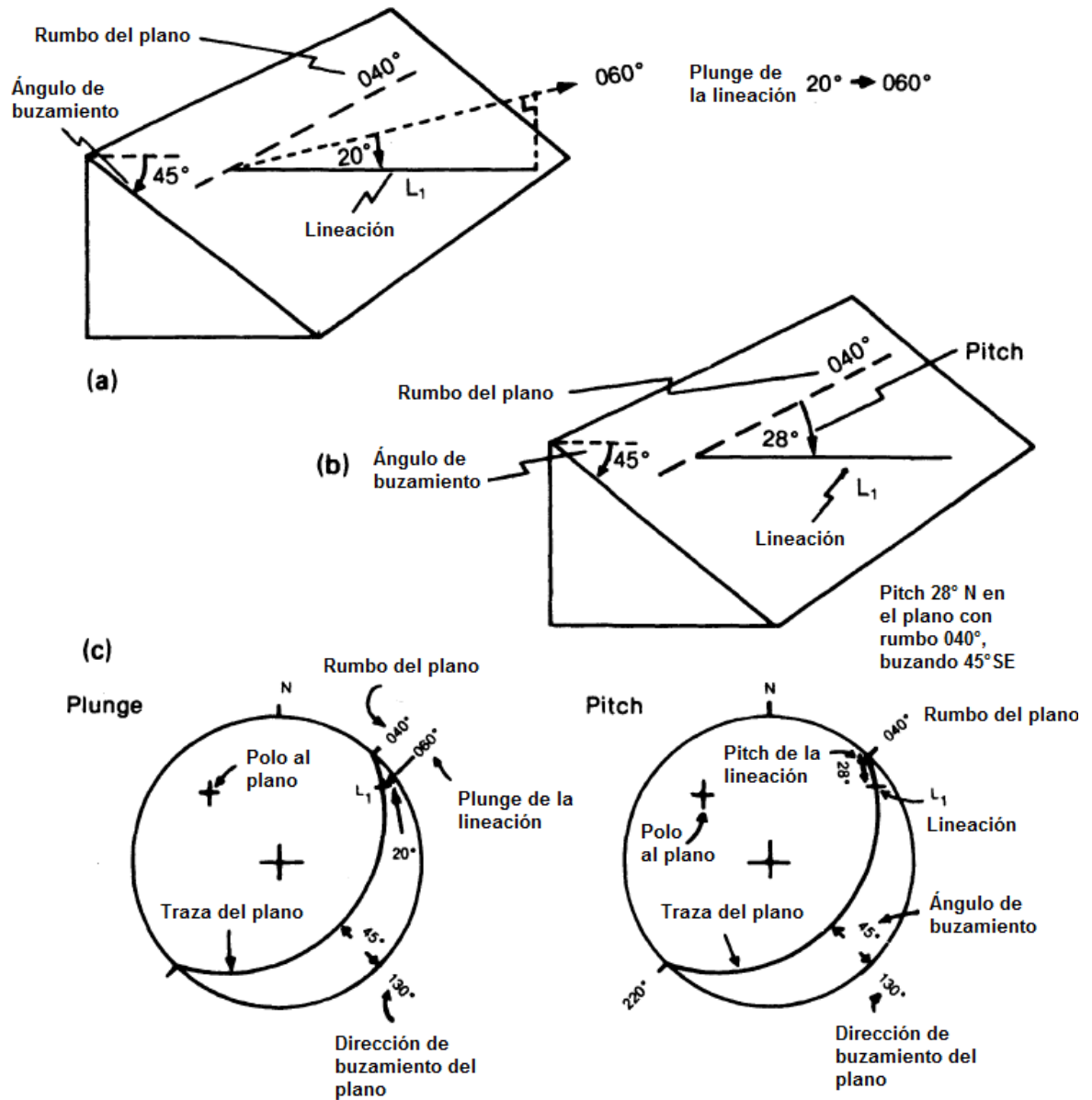
- **Trend:** Ángulo horizontal medido desde el norte hasta la línea; en otras palabras es el rumbo de una línea.
- **Plunge (Inmersión):** Ángulo vertical entre una línea y la horizontal.
- **Pitch o Rake (Cabeceo):** Ángulo medido en algún plano específico, entre una línea y la horizontal. (Ragan, 1980)

Figura 7. Orientación de una línea (a) *Trend* t , *Plunge* p ; (b) *Pitch* o *Rake* r



Fuente: Modificado de Ragan, (1980).

Figura 8. Representación estereográfica de una lineación sobre un plano.



Fuente: Adaptado de McClay (1987).

5.3 Indicadores cinemáticos

- **Estrías de falla “*Slickensides*”**

Son superficies lisas y brillantes. Estos deben su origen tanto a la acción pulidora de las rocas de los bloques de la grieta, que resbalan uno por el otro, como a la formación de nuevos minerales planos y brillantes en la zona de rozamiento (Belousov, 1979).

Al desplazarse las rocas por el plano de falla, los bloques que contactan, rozan entre sí. En las superficies de deslizamiento se originan estrías; líneas paralelas entre sí, que pueden utilizarse para determinar la dirección del desplazamiento. Sin embargo los desplazamientos en una misma zona de fractura pueden ser reiterados, al mismo tiempo que, de una sacudida a otra, las direcciones de desplazamiento pueden variar considerablemente. Algunas lentes aisladas pueden girar, lo que conduce a que las rayas y rasguños en los diversos tramos de una misma lente tengan diferente dirección. De tal modo, el desplazamiento total por la fractura, que se revela mediante la cartografía geológica, siempre es el resultado de la suma de los numerosos movimientos pequeños en diferentes direcciones (Belousov, 1979).

La deducción del sentido de cizalla en superficies de falla a partir de “*Slickensides*” ha sido un procedimiento común en geología estructural por muchos años. Incluso esos criterios han sido elementos claves en muchos estudios geodinámicos. (Doblas, 1998).

- **Escalones (*Steps*)**

Son encontrados en secciones normales a la superficie de falla en dirección del movimiento, y son comúnmente sub-perpendiculares a las estrías. El criterio se basa en la orientación de las elevaciones de los escalones, en la misma dirección

del movimiento del bloque opuesto. Este criterio puede ser descrito como la “cantidad relativa de fricción que se siente cuando la mano del observador se mueve en sentido opuesto, paralelo a la lineación del *slickenside* sobre el plano de falla” (Doblas, 1998)

En el presente trabajo este indicador se utilizó con prudencia; como “criterio de suavidad positivo” (*el sentido en que menos resistencia tenga el movimiento de la mano indica el sentido del movimiento del bloque faltante*) siempre y cuando la superficie de falla presentara re-cristalización. Esto con el fin de evitar malas interpretaciones en el sentido del movimiento, debido a que en ocasiones los *steps* corresponden a características de “criterio de suavidad negativa” en el que la elevación del escalón se enfrenta al movimiento del bloque opuesto, generalmente cuando su origen se debe a una cizalla *Riedel*.

La presencia de re-cristalización superficial ya sea por cualquier mecanismo (ver *Slickenside kinematic indicators*, Doblas M., 1998), permite un elevado grado de certeza, garantizando su utilidad como un “criterio positivo”.

5.4 Fracturas Subsidiarias (Riedel)

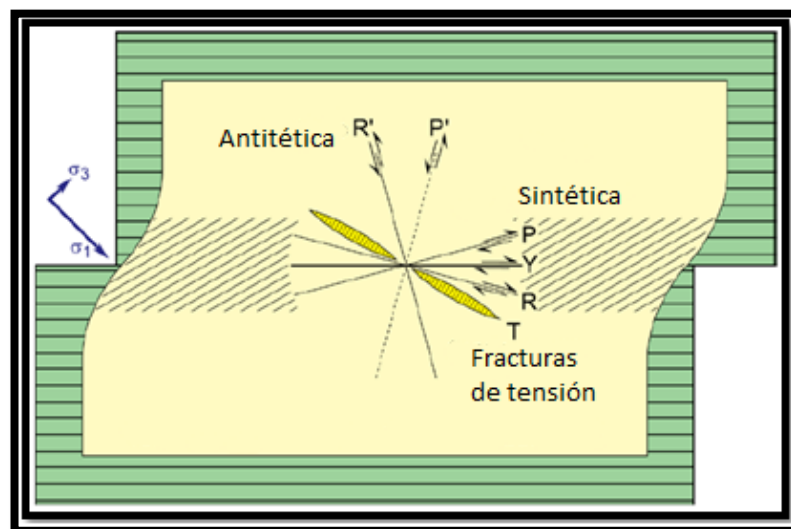
Las fracturas que por cizalla se propagan una distancia corta del trazo principal de una falla pero son coevas con esta son llamadas Riedel. Este término también es usado en patrones de fallas de escalas grandes y se refieren a seis familias de fracturas como lo muestra la *Figura 9*.

- **Fallas tipo R**

Son generalmente las primeras Fallas subsidiarias que ocurren y generalmente constituyen el set de fracturas más prominente. Se desarrollan a un ángulo agudo, Típicamente 10-20° (Dependiendo del ángulo de fricción interno del material ϕ según la ecuación $(\phi/2)$ en sentido de las manecillas del reloj para una falla dextral

y en sentido contrario a las manecillas del reloj para las fallas sinestrales. Estas a menudo forman un arreglo en échelon y un arreglo de saltos sintéticos a la falla principal; ellas evolucionan como una secuencia de superficies de desplazamiento unidas. (Burg, 2011)

Figura 9. Relación de las estructuras Riedel y los esfuerzos principales. La utilidad como indicador cinemático se basa en que entre R y R' se orienta el vector de presión σ_1 .



Fuente: Tomado y modificado de Burg, (2011).

- **Fallas tipo R'**

Son fallas antitéticas (con sentido de desplazamiento contrario al principal) orientadas a un alto ángulo (aproximadamente 75°, dependiendo del ángulo de fricción interno del material ϕ según la ecuación $(90^\circ - (\phi/2))$ en sentido de las

manecillas del reloj para una falla dextral y en sentido contrario a las manecillas del reloj para las fallas sinestrales, conjugadas con las Fallas Riedel. Estas ocurren en la zona de traslape entre dos fallas paralelas R y a menudo conectan estas dos fallas R. estas fallas se pueden desarrollar con las fallas R o después. (Burg, 2011)

- **Fallas tipo P**

Las fallas tipo P son fallas sintéticas menores simétricamente orientadas a las fallas R con respecto al plano de falla (α ($\phi/2$) del plano de falla, en sentido contrario a las manecillas del reloj y en sentido de las manecillas del reloj para las fallas dextrales y sinestrales respectivamente) las fallas tipo P también forman un arreglo en échelon contemporáneo con las fallas R o posteriormente como uniones entre fallas R. las fallas P son contraccionales y acomodan acortamiento paralelo a la falla cuando el cizallamiento se da. Estas son menos comunes que las fallas R y R' y requieren más desplazamiento para formarse.

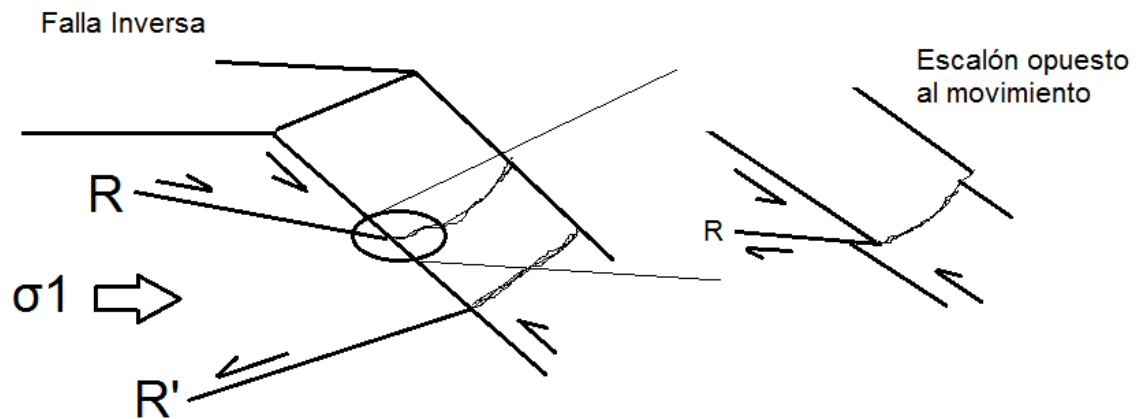
Al igual que para las fallas R, puede haber fallas tipo P' que se conjuguen con fallas tipo P pero estas tienen una importancia relativa menor (Burg, 2011).

- **Fallas tipo Y**

Son microfallas sintéticas subparalelas a la falla principal. Aparentemente son las últimas en formarse. Estas microfallas pueden unirse con otras para formar una red anastomosada de fracturas en una zona superficial de falla cuyos bordes como un todo son paralelos al trazo principal de la falla. Se introducen complicaciones adicionales cuando Fallas tipo Riedel se forman dentro de otras Riedel (Burg, 2011).

En la *Figura 10* Se observa un ejemplo en el cual mediante el uso de fracturas tipo R y R' se puede deducir la dirección de compresión y así determinar la cinemática de una falla. Además se observa cómo estas estructuras pueden originar escalones contrarios al movimiento, y dar lugar a malinterpretaciones al momento de determinar la cinemática de la falla.

Figura 10. Esquema ilustrativo sobre el origen de escalones "opuestos al movimiento" y su relación con estructuras Riedel. En este caso los escalones se interpretarían como criterio de suavidad negativo. El vector de compresión (σ_1) se orienta entre R y R'.



Fuente: Autor.

5.5 Método de análisis poblacional de fallas

Los métodos de análisis poblacional de fallas proporcionan el tensor de esfuerzos reducido. Para estimar los valores reales de los esfuerzos principales, es necesario recurrir a métodos indirectos, como estimar el valor de la carga litostática en el momento de la fracturación, o a través de ensayos de mecánica de rocas. También hay algunas técnicas que permiten obtener valores cuantitativos de la diferencia de esfuerzos (ej. maclado mecánico de la calcita, paleopiezómetros). Muñoz y de Vicente (Documento en línea Disponible en: <http://pendientedemigracion.ucm.es/info/geodina/docencia/doctorado/DOCTESEF.pdf>)

El método de Análisis Numérico Dinámico (NDA) (Spang, 1972) se basa en la ecuación de Bott, estos métodos en general buscan un tensor de esfuerzos que minimice la diferencia entre las estrías teóricas que produciría el tensor obtenido sobre los planos de falla existentes, y las estrías reales que se han medido en el campo.

Los resultados que el método proporciona son:

1 - Orientaciones (dirección e inmersión) de los 3 ejes principales del tensor de esfuerzos (σ_1 , σ_2 y σ_3).

2 - Magnitudes relativas de los tres ejes, definidas por el R (factor de forma):

$$R = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$$

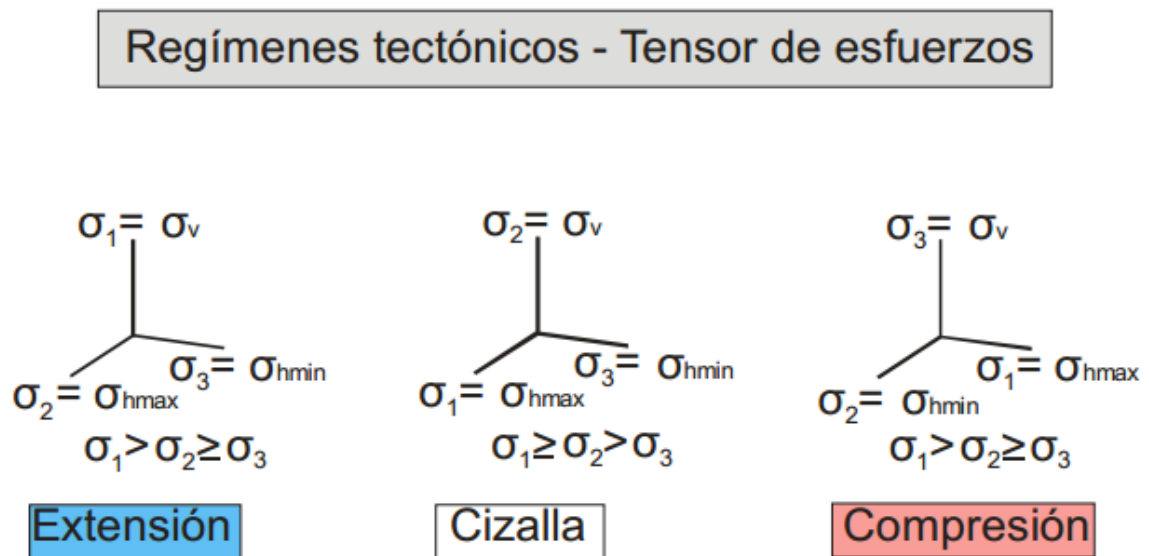
Una vez obtenido el tensor de esfuerzos (orientación de los esfuerzos principales) y el valor de R, es posible inferir la cinemática de las fallas asociadas a este régimen tectónico basándose en el rumbo de la falla con respecto a los ejes de los esfuerzos principales.

- **Tipos de régimen de esfuerzos**

En función de las magnitudes relativas de los esfuerzos principales, la forma del tensor puede variar considerablemente. Para visualizar el estado de esfuerzos, se recurre al elipsoide de esfuerzos, que puede caracterizarse mediante el parámetro R (factor de forma). De este modo el tensor reducido está compuesto por los 3 ejes principales, con su orientación y magnitud relativa, definido por el factor de forma R.

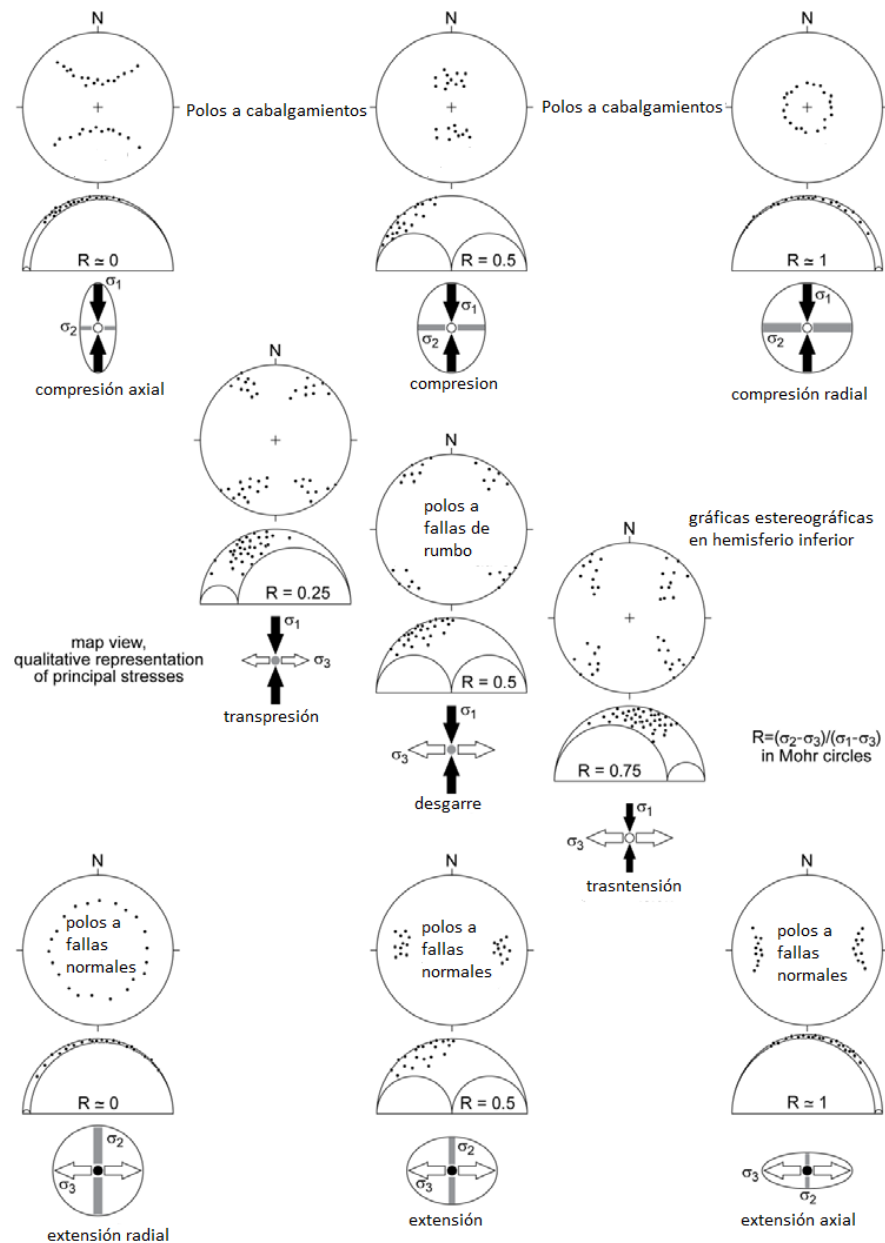
En función de la orientación de los ejes principales y la relación existente entre sus magnitudes relativas podemos describir el régimen tectónico según tres tipos puros, con casos intermedios, como veremos más adelante: Extensión (σ_1 vertical, dominante en dorsales y rifts), Cizalla (σ_2 vertical, dominante en zonas de falla transformante) y Compresión (σ_3 vertical, predominantemente en zonas orogénicas, zonas de subducción) (Figuras 12 y 13).

Figura 11. Régimen tectónico en función de la orientación de los ejes de esfuerzos.



Fuente: Tomado de Muñoz y de Vicente, (2010).

Figura 12. Régimen tectónico basado en el cálculo del tensor de esfuerzos (o paleoesfuerzos) y su representación en el círculo de Mohr.



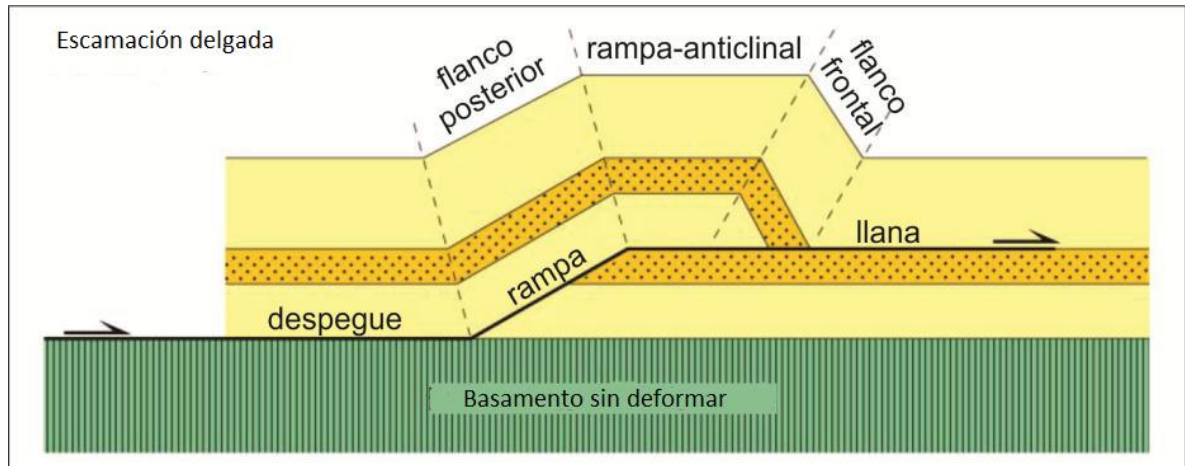
Fuente: Tomado y modificado de Burg, (2011)

5.6 Estilos estructurales

En ambientes convergentes se presenta el desarrollo de varios estilos estructurales; las observaciones en campo, el análisis de líneas sísmicas y el desarrollo de varios modelos análogos, han permitido definir estilos de deformación asociados a los cinturones de plegamiento y cabalgamiento. Dahlstrom (1969), definió el concepto de zonas de transferencia en cabalgamientos como una zona de solapamiento entre dos o más cabalgamientos que están vinculados por una capa de despegue en común, una especie de traslape en la que la falla, cuyo desplazamiento está disminuyendo, es reemplazado por una falla en échelon cuyo desplazamiento es cada vez mayor (Lebel, 2014).

- Estilo de escamación delgada (*thin-skinned tectonics*): Se refiere a los cabalgamientos que no afectan el basamento, donde se desarrollan conjuntos de pliegues y fallas que deforman la cobertura sedimentaria. La secuencia sedimentaria inicialmente subhorizontal se separa a lo largo de horizontes de despegues generados en unidades incompetentes (por ejemplo, unidades de evaporitas, shale, capas sobrepresionadas) y se deforman independientemente del sustrato subyacente. Comúnmente ramificaciones lítricas de fallas inversas con actitudes similares se unen en la superficie de despegue sobre el basamento. En conclusión la deformación se limita a la cobertura sedimentaria, mientras que el basamento se desliza debajo rígidamente (sin cortes axiales a través de él). En este estilo se desarrolla una geometría de falla caracterizada por zonas de rampa donde se corta la estratificación de unidades competentes y zonas de llana donde se desliza por unidades blandas (Burg, 2013).

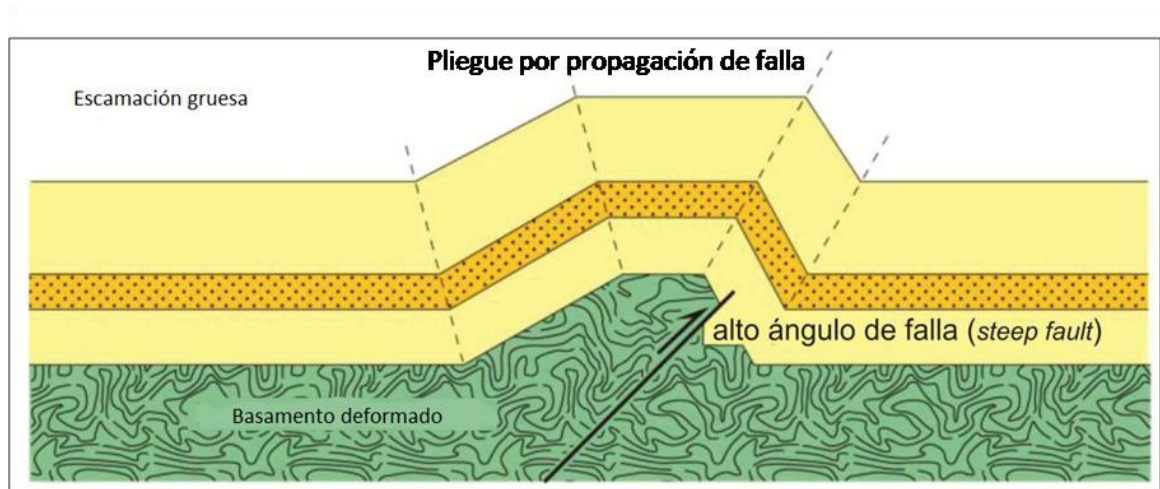
Figura 13. Representación gráfica del estilo estructural de escamación delgada que afecta la cobertera sedimentaria, desarrollándose cabalgamientos con geometría controlada por zonas de rampa y zonas de llana.



Fuente. Tomado y modificado de Burg (2013).

- Estilo estructural de escamación gruesa: se desarrolla en los *hinterland* (región de un cinturón orogénico), donde el basamento cristalino de los cinturones montañosos se deforma. Éste estilo estructural está controlado principalmente por cabalgamientos de alto ángulo (Figura 15), los cuales tienen un despegue profundo cerca de las zonas de deformación frágil-dúctil (Burg, 2013).

Figura 14. Representación gráfica del estilo estructural de piel gruesa que involucra el basamento, donde los cabalgamientos presentan alto ángulo de falla con un despegue profundo.



Fuente. Tomado y modificado de Burg (2013).

En sistemas de cabalgamiento es común el desarrollo de estructuras en arreglos imbricados, conformados por cabalgamientos subsidiarios con geometrías generalmente lítricas que comparte un mismo plano de despegue. También son posibles retrocabalgamientos de alto ángulo, estas estructuras al interactuar pueden dar origen a la expulsión de bloques en estructuras denominadas pop-up (Figura 16)

Figura 15. Modelo de sistemas de cabalgamientos y estructuras asociadas.



Fuente: Tomado y modificado de Burg, (2011).

5.7 Procesamiento de datos

La deformación frágil se cuantifica frecuentemente utilizando métodos de análisis cinemáticos. Estos métodos están basados en mediciones en la mesoescala de fallas y sus estrías asociadas (*Slickensides*). El análisis de cinemática de las fallas comúnmente determina tensores de esfuerzos reducidos (p ej. Direcciones de los ejes principales de esfuerzo ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$)), y la relación de esfuerzos $R = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ en una localidad determinada. El análisis cinemático de fallas de esta forma produce información de la orientación y forma del elipsoide de esfuerzos pero no produce información de los valores absolutos del esfuerzo.

Básicamente se asumen tres cuestiones básicas del análisis cinemático el cual tiene que ser verificado si los datos de cinemática de falla son interpretados en términos de esfuerzo:

- 1) El tensor de esfuerzo es simétrico, la deformación es coaxial es decir cizalla pura.
- 2) La deformación es homogénea.
- 3) El fallamiento es consistente con los criterios producidos por Mohr-Coulomb.
P ej. Las fallas se desarrollan paralelas a σ_2 y con un ángulo de fractura inherente del material (el ángulo de fricción Interna) a σ_1

Cuando se interpreta datos cinemáticos de falla, se debe tener siempre en cuenta que la mayoría de esas condiciones no se cumple en la naturaleza.

Las presunciones 1 y 2, cizalla pura y deformación homogénea deben ser simplificaciones realistas de afloramiento pero probablemente no en escala regional. Consecuentemente, Tensores de esfuerzo inferidos reflejan estados locales de esfuerzo.

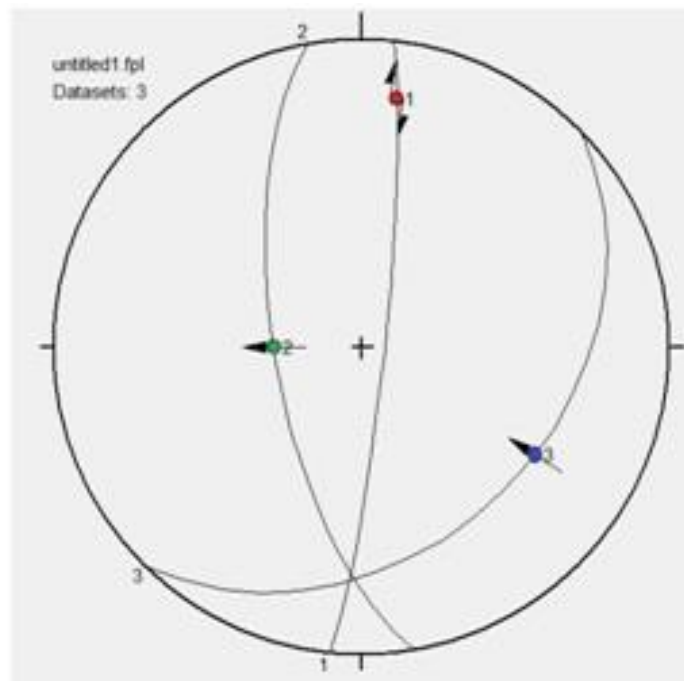
La asunción 3 es estrictamente válida en rocas isotrópicas, donde las fallas se deben desarrollar paralelas a σ_2 en un ángulo de fractura que varía entre 0° y 40° y están en su mayoría alrededor de 30° , lo cual debe ser así una aproximación razonable en la mayoría de los casos naturales. Sin embargo, en las rocas anisotrópicas, las discontinuidades preexistentes se pueden reactivar sin importar su orientación con respecto a σ_1 . Si el esfuerzo diferencial aplicado es bajo y la presión de poro es suficientemente alta para exceder la presión litostática, incluso ángulos de 45° - 90° se observan.

Los datos cinemáticos de fallas se procesaron con el programa TectonicsFP, Version 1.7.7. Tras poner los datos crudos en el programa estos son corregidos de tal forma que todas las estrías se ponen en los respectivos planos de falla; corrigiendo cualquier error instrumental al momento de medir los datos. Para hacer esto, las estrías de falla son rotadas por el Gran Circulo, el cual es definido por la

estría y el polo del plano de falla, para alinearlos en el plano de falla. Esta operación necesita ser llevada a cabo antes de un procesamiento más profundo de los datos.

Las estrías de falla son representadas gráficamente en una estereonet de hemisferio inferior según el método Angelier que muestra las fallas como grandes círculos y una flecha localizada sobre un punto que representa la estría y apunta en la dirección del movimiento relativo del bloque colgante.

Figura 16. Representación según Angelier de la cinemática de planos de falla. La falla 1 (punto color rojo) representa una falla de rumbo dextral, la falla 2 (punto verde) simboliza una falla normal (la flecha que representa el movimiento del bloque colgante apunta hacia la dirección del buzamiento), la falla 3 (color azul) representa una falla inversa.



Fuente: Autor a partir del software TectonicsFP.

Para el análisis cinemático de las fallas se utilizó el método de análisis numérico dinámico, **NDA** y el método **P-T (o PBT)**

El método P-T descrito por (Turner, 1953) calcula para cada plano de falla un eje de compresión (P) y de extensión (T), y el eje intermedio (B). El método se basa en la determinación del plano de movimiento, el cual contiene la línea de movimiento (estría) y el polo del plano de falla, siendo por tanto perpendicular a este. Se asume que éste plano de movimiento contiene el tensor de mayor presión (P) y tensión (T), y el tensor intermedio (B) se ubica cercano o en el polo del plano de movimiento. De acuerdo al criterio de fractura de Mohr-Coulomb, el ángulo entre σ_1 y el plano de falla es una función de la pendiente μ del círculo de Mohr pero los valores experimentales para este ángulo están alrededor de 30° razón por la cual se utilizó este valor ($\Theta=30^\circ$). Los tensores de Presión-Tensión se asumen que son equivalentes a σ_1 y σ_3 , y el tensor intermedio a σ_2 . Para cada plano de falla, un

Para un conjunto de datos poblacionales de falla, el método determina estos tensores de esfuerzo para cada plano de falla y estadísticamente arroja una tensor promedio de todos los datos.

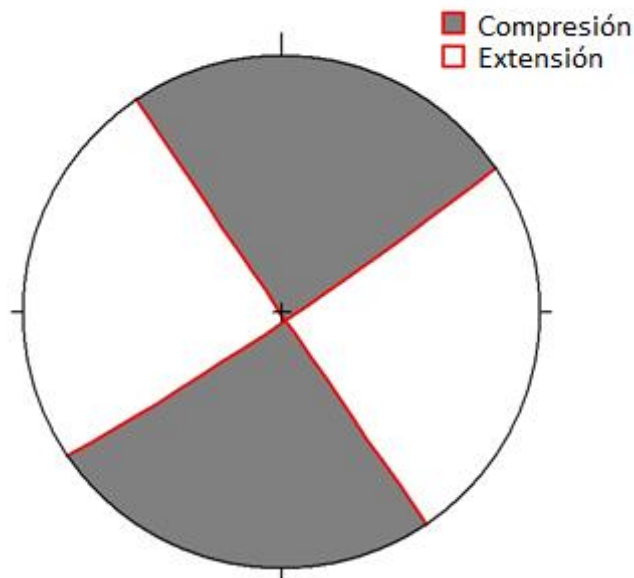
El método NDA tiene una aproximación metódica. Asumiendo coincidencia de σ_1 con P y σ_3 con T, NDA calcula un tensor de esfuerzo para cada grupo de estrías de falla. La sumatoria de los tensores de esfuerzo de todos los grupos de estrías en una localidad y divididos por el número de datos produce el tensor total de esfuerzo. Las orientaciones y valores relativos de los principales esfuerzos son derivados de los valores y vectores *eigen* del tensor total de esfuerzo.

Los resultados del análisis cinemático están representados en las llamadas pelotas de playa “*beachball*” donde diedros compresivos y distensivos se muestran juntos en un diagrama de igual área, estereoplot de hemisferio inferior (Figura 18) los

resultados de los análisis de cinemática de fallas son representados en diedros de blanco=distensivo y gris=compresivo.

En un balón de playa los planos graficados representan de cierta forma, el patrón de fracturamiento que podría formarse bajo ese tensor de esfuerzos.

Figura 17. Representación del análisis cinemático de fallas con una pelota de playa. En este caso el diagrama indica un régimen de fallamiento en rumbo. En rojo se observan 2 planos verticales con orientaciones NE-SW y NW-SE (falla y plano auxiliar)



Fuente: Autor a partir de TectonicsFP.

Utilizando el tensor general, ambos métodos calculan los ángulos β entre las direcciones calculadas de máximo esfuerzo de cizalla actuando a lo largo de planos

de falla en particular y la estría medida (Sperner, 1996). La variación de β se visualiza en el diagrama de fluctuación. Un círculo de Mohr en el plano σ_1 - σ_3 visualiza la normal (σ_n , abscisa) y el esfuerzo de cizalla (τ , ordenada) introducido por el vector de esfuerzo por cada plano de falla. Las condiciones de cizalla para cada plano de falla son calculadas tras una solución gráfica. La posición entre σ_1 y σ_3 donde se da la unión de los dos círculos, es definido por las tasas de esfuerzo $R = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$. La normalización se logra mediante el cumplimiento de $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 0$.

6. ANTECEDENTES

A continuación se presenta la síntesis de algunos de los estudios realizados y publicaciones sobre el área de estudio de manera regional en los que se trata específicamente el modelo geológico, la evolución tectono-estratigráfica de la región y la falla Las Mercedes o sistema de fallas Las Mercedes.

Page (1986) mapeó la parte norte y central como falla Las Mercedes. Se describe el Sistema de Fallas Morronegro-Las Mercedes como varias fallas en la esquina noreste de la Cordillera Oriental formando parte de una amplia zona de fallas curvadas que cambian su tendencia NW a N y NE al entrar a Venezuela.

En Ego *et al.*, 1993, se sugiere un aumento en la tasa de deslizamiento hacia el norte, basados en los cálculos de deslizamiento de las fallas Pallatanga y Río Chingual-La Sofía (Ecuador), este incremento estaría asociado al incremento en la oblicuidad de la convergencia de las placas Nazca y Suramericana.

Para la región límite entre las placas Caribe y Suramericana Beltrán y Giraldo, 1989; Audemard, (1993), en Audemard *et al.*, 2000). Proponen un campo de esfuerzos caracterizado por un esfuerzo máximo horizontal en dirección NNW-SSE y un esfuerzo mínimo horizontal ENE-WSW definiendo un régimen rumbo-deslizante. Entre Suramérica y el Bloque Maracaibo, el máximo esfuerzo horizontal se torna anti-horario progresivamente desde NNW-SSE a una orientación más E-W en los Andes, induciendo simultáneamente deslizamiento lateral izquierdo a lo largo de la falla Valera en dirección N-S y lateral derecho en la falla Boconó con orientación NE-SW y expulsión al norte del Bloque Maracaibo.

INGEOMINAS (1994) define cinco provincias tectónicas: Macizo de Santander, Bloque de Mérida, Cuenca del Magdalena Medio, Subcuenca del Catatumbo-Zulia y Bloque de Chinácota–Margua (*Figura 18*).

INGEOMINAS, (1998), menciona la Falla de Las Mercedes, con rumbo N-S y buzando al oeste, considerando un desplazamiento de 2400 m (Figura 19).

Kammer, (1999), Analiza los patrones de plegamiento regionales de la Cordillera Oriental y los contrasta con los campos de deformación frágil determinados mediante análisis de planos de falla estriados y diaclasas. Las direcciones de acortamiento de las fallas estriadas definen dos provincias de deformación, separadas tajantemente por la Falla de Bucaramanga: En el Macizo de Santander la compresión (E-W) se orienta perpendicularmente a los sinclinales fallados de dirección N-S y en el segmento de Bogotá las direcciones de compresión discrepan de la perpendicular con el tren estructural por alrededor de 25° en un sentido horario.

Paris *et al.*, 2000, realizó la compilación de mapas de fallas y pliegues cuaternarios, además elaboró una base de datos describiendo su localización, edad y rangos de actividad y sismicidad asociada. En este estudio se considera el Sistema de Fallas Morronegro-Las Mercedes, como varias fallas en la esquina noreste de la Cordillera Oriental formando parte de una amplia zona de fallas curvadas que cambian su tendencia NW a N y NE al entrar a Venezuela. De ellas se piensa, son fallas inversas que se asocian con la extensión suroccidental de la falla Boconó. En este informe se reporta que la componente vertical del movimiento levanta el lado occidental en la parte norte, mientras que en la parte sur el bloque levantado es el oriental. El movimiento lateral es sinistral en la parte sur y dextral en la parte norte. Se estima una tasa de desplazamiento de 0.2-1 mm/año, con una edad del último movimiento menor a 1.6 Ma basados en el desplazamiento de rasgos geomorfológicos cuaternarios.

Taboada *et al.*, (2000), realizó estudio mediante datos sismológicos regionales de Colombia, datos tectónicos de campo de la Cordillera Oriental y análisis de datos de esfuerzos de los datos de deslizamiento de fallas en la Cordillera Oriental (al norte de los 4° de latitud) indican un esfuerzo máximo σ_1 en dirección aproximada

E-SE los cuales relacionan a la dirección de subducción de la Paleo Placa Caribe. Soluciones al tensor de esfuerzo obtenidas cerca de Bucaramanga indican una compresión post-Andina N80E y una compresión pre Andina NW-SE.

Durante el Mesozoico y Cenozoico, la evolución tectono-estratigráfica de la Cuenca de Maracaibo– Catatumbo registra una compleja y dinámica historia, asociada a un proceso de colisión y subducción oblicua a lo largo de fallas de desplazamiento lateral y escala regional, entre el borde sur de la Placa Caribe y el extremo noroeste de la placa de Suramérica (Pennington, W., 1981; Burke, K., 1984; Kellogg y Bonini, 1982; Kellogg, 1984; Pindell y Barrett, 1990). El límite entre las placas está representado por una amplia y difusa zona de activa deformación. (ECOPETROL, 2001).

Tabla 1. Síntesis del modelo tectono-estratigráfico de la Cuenca Catatumbo

EVENTO TECTÓNICO	SECUENCIA	TIEMPO	REGISTRO SEDIMENTARIO ASOCIADO
DESARROLLO CUENCA ANTEPAÍS	T2	Plioceno- Eoceno tardío	Formaciones Carbonera, León y Guayabo.
	T1	Eoceno	Formación Mirador
ESTADIO DE TRANSICIÓN (CUENCA PASIVA- ANTEPAÍS)	K-T	Paleoceno – Campaniano tardío	Formaciones Catatumbo Barco Los Cuervos
	K5		Formaciones Colón y Mito Juan
ESTADIO DE MARGEN PASIVA	K4	Campaniano temprano- Aptiano	Formaciones Capacho y La Luna
	K3		Grupo Uribante
	K2		Representada en zonas aledañas por la Formación Río Negro
	K1		
ESTADIO DE TECTÓNICA EXTENSIONAL RIFT	Tr-J	Cretácico temprano(?) Jurásico Triásico-	Representada en las zonas aledañas a la Cuenca del Catatumbo por las formaciones Girón. La Quinta y equivalentes.

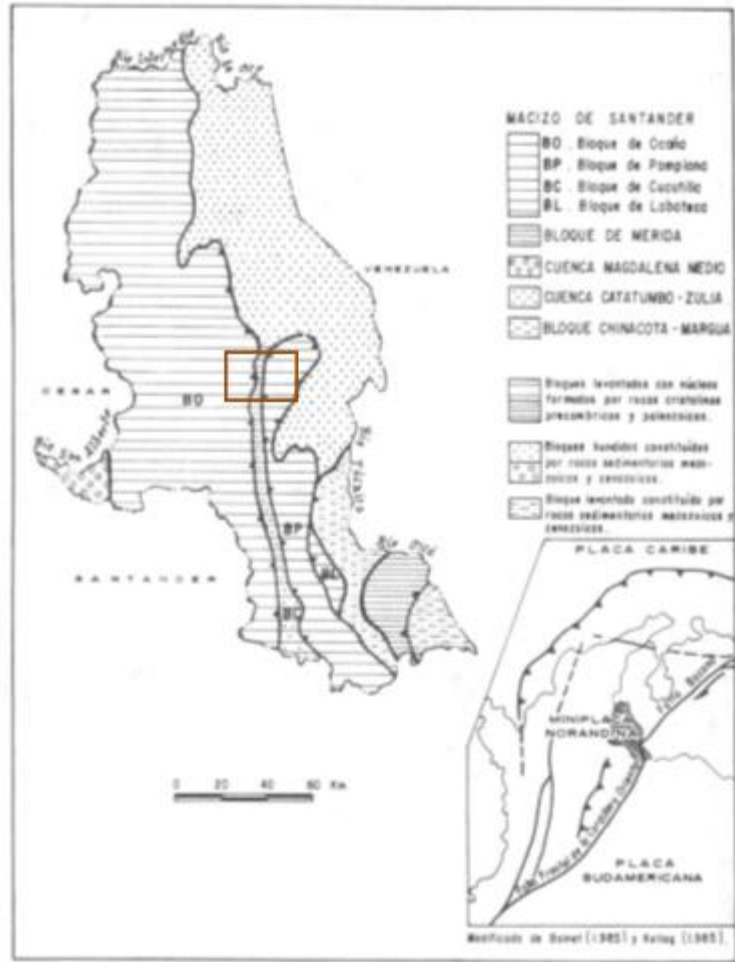
Fuente: Tomado de ECOPETROL, (2001).

Mediante inversión de esfuerzos a partir de mecanismos focales, Vargas *et al.* (2002), determinaron los ejes de esfuerzo en varias regiones de Colombia y Panamá. “En la actualidad se reconoce un estado de esfuerzos compresivos de las placas Nazca y Caribe hacia Sudamérica en sentido O-E y NNO-SSE respectivamente; así como la presencia de al menos tres micro-placas o bloques: Panamá-Costa Rica con vergencia O-E, Andes con desplazamiento SSO-NNE, probablemente a lo largo del Sistema de Fallas de Borde Llanero; y Chocó que colisiona con el Bloque Andino en dirección N-S.”

Rosello *et al.*, (2004) describe la sintaxis entre la convergencia de las placas Caribe, Nazca, Suramericana y el desarrollo de la Cordillera Oriental y el Macizo de Santander los cuales se desarrollan contemporáneamente durante la orogenia Andina, con una relación de 120° entre ellas, siendo el Nevado del Cocuy su compartimento interno compresivo. Se argumenta que la Cordillera Oriental regionalmente presenta preferencialmente transpresión dextral, y el Macizo de Santander transpresión sinistral, ambos relieves controlados por la arquitectura pre-existente de las cuencas extensionales Mesozoica-Paleógena. Invertidas a partir del Eoceno superior.

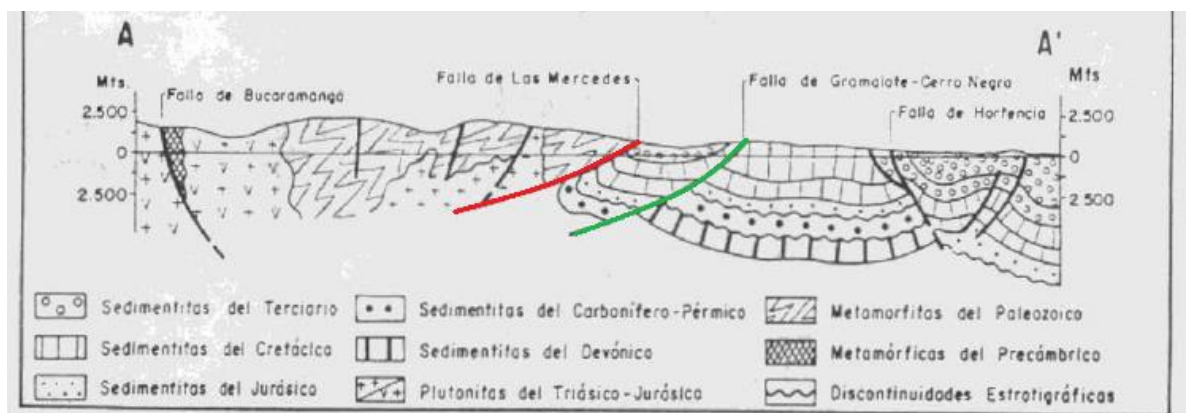
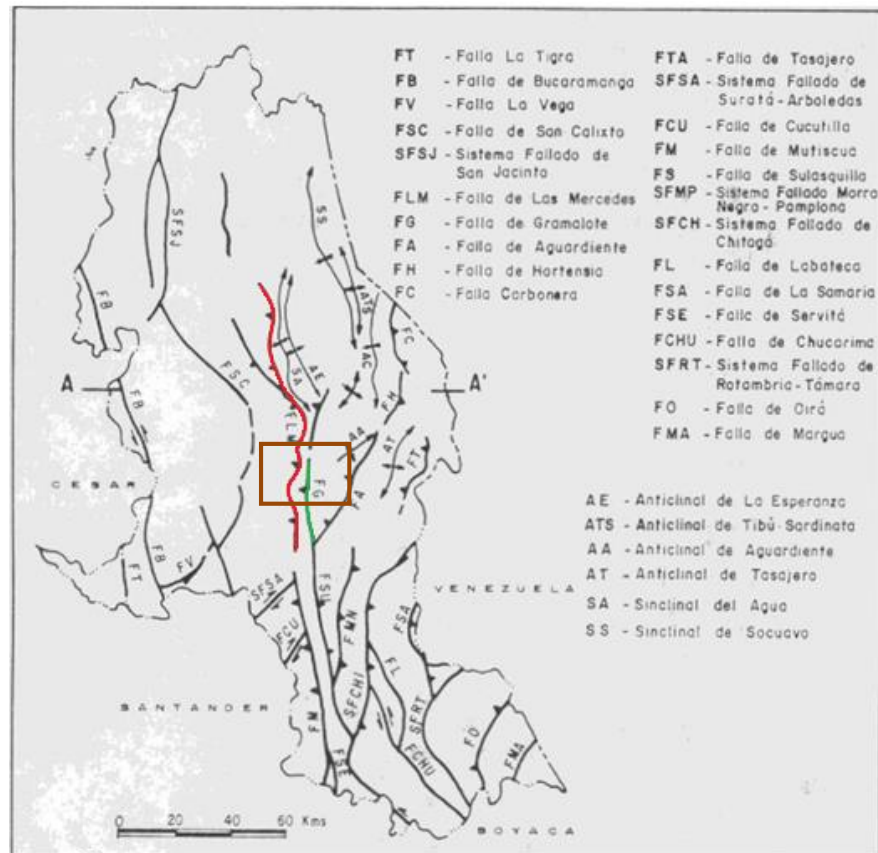
Acosta *et al.*, 2004, mediante datos de GPS sugiere un movimiento conjugado de rotación antihorario y la expulsión del Bloque Andino, además argumenta que debido a la interacción con el Bloque Panamá y la Placa Caribe la deformación se particiona en el piedemonte occidental de la Cordillera Oriental a lo largo de fallas de tendencia NNW-SSE, rumbo deslizantes (sinestrales), tales como la falla Bucaramanga y La Salina-Bituima. Mediante mecanismos focales para recientes sismos, sugieren al sur de los 5°N , transpresión dextral, tal como se estimaba en los modelos de convergencia de placas propuestos por Ego *et al.*, (1993) y los estudios estructurales de Montes, (2001).

Figura 18. Esquema tectono-estratigráfico de Norte de Santander. En recuadro café se resalta la zona de estudio.



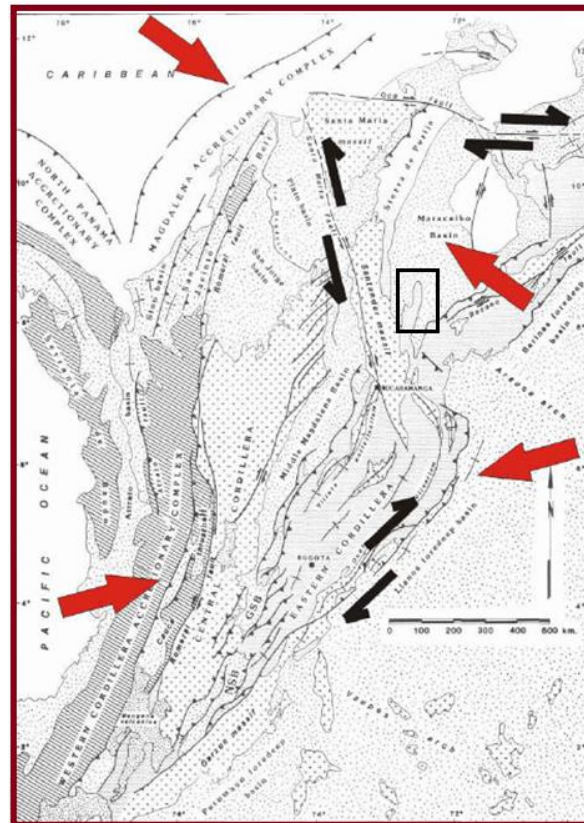
Fuente: Tomado y modificado de INGEOMINAS, (1994)

Figura 19. Esquema estructural y corte geológico del departamento de Norte de Santander. En rojo el trazo de la falla Las Mercedes y en verde la Falla de Gramalote. En recuadro café se resalta la zona de estudio.



Fuente: Tomado y modificado de INGEOMINAS, (1994)

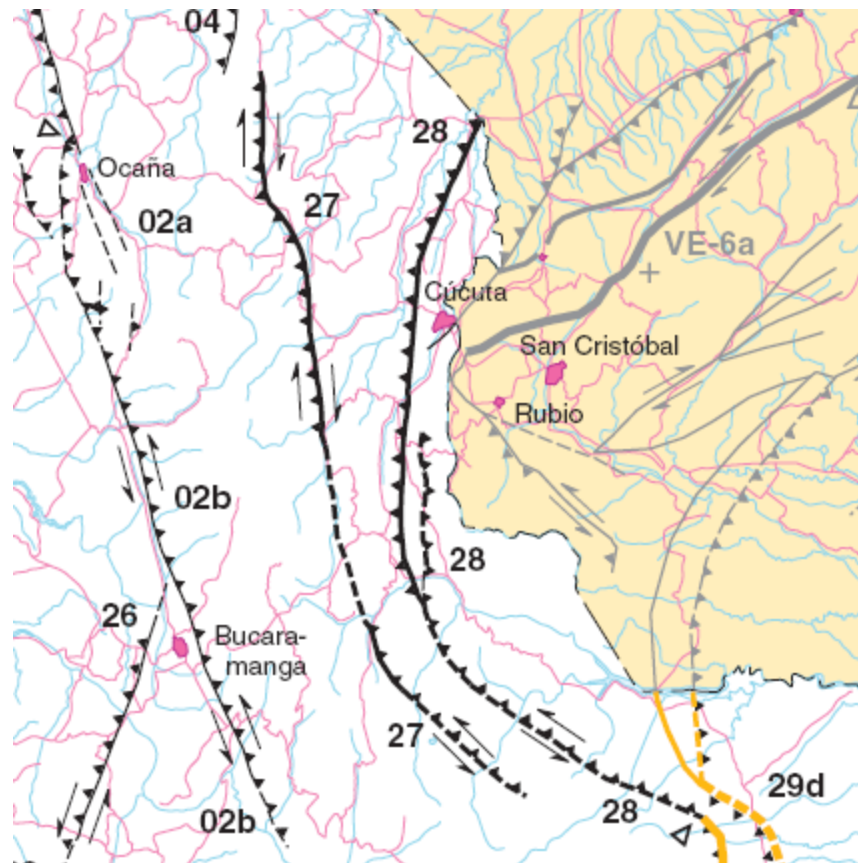
Figura 20. Contexto geodinámico del norte de Suramérica. En rojo se visualiza las direcciones de convergencia tectónica, relacionados a la interacción de las placas de Nazca, Suramericana y Caribe. En negro se ilustra la cinemática de las principales fallas regionales.



Fuente: Tomado y modificado de Rosello *et al* (2004).

INGEOMINAS, (2011b). Presenta La Falla de Morronegro – Las Mercedes, como un sistema de fallas que se extiende por el noreste de la Cordillera Oriental de Colombia, el cual presenta un cambio de dirección de NW a N, (*Figura 21*). La falla de Las Mercedes es una falla de cabalgamiento de dirección N-S con un ángulo de 30° aproximadamente con una inclinación al occidente.

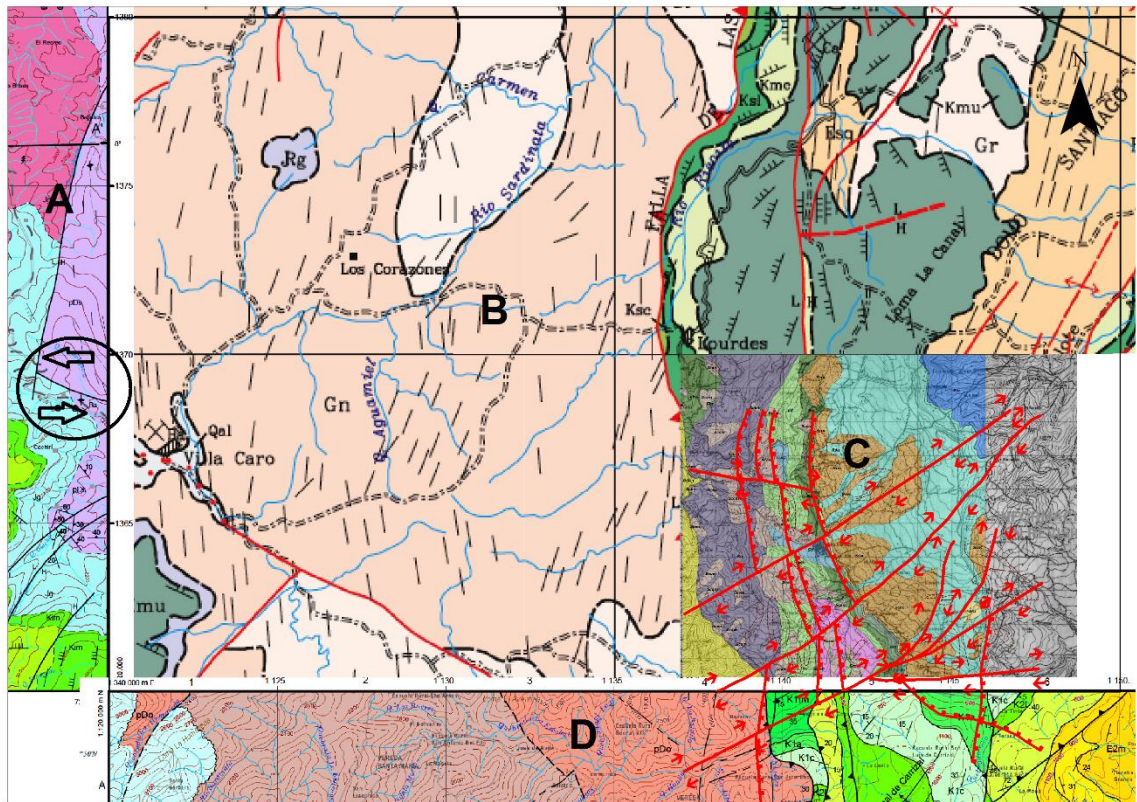
Figura 21. Sistema regional de Fallas Morronegro – Las Mercedes (27) y Pamplona – Chitagá (28).



Tomado y modificado de Paris *et. al.*, (2000).

INGEOMINAS, (2011). Presenta un mapa de unidades geológicas superficiales del municipio de Gramalote, en el que se destaca un sistema de fallas inversas de tendencia N-S y un sistema de fallas rumbo deslizantes NE-SW, de movimiento dextral (Figura 22) que desplaza al anterior sistema.

Figura 22. Cartografía geológica antecedente del área de estudio y zonas adyacentes. A) Mapa geológico de la Plancha 86 “Ábrego”, B) Geología del Cuadrángulo G-13 Cúcuta, C) Mapa de Unidades Geológicas Superficiales de un Sector de Gramalote. D) Mapa Geológico de la Plancha 98 “Durania”. En el círculo negro nótese el desplazamiento sinistral de la falla Villa Caro, evidenciado en el contacto de la formación Silgará (pDs) y la formación Girón (Jg).



Fuente: Tomado y modificado de: A) INGEOMINAS, (1978) B) SERVICIO GEOLÓGICO NACIONAL E INVENTARIO MINERO NACIONAL, (1967) C) INGEOMINAS, (2011), D) INGEOMINAS, (2010).

INGEOMINAS, (2012). En estudios realizados para la reubicación del casco urbano de Gramalote, a escala 1:5000, reportan dos sistemas principales de fallas

transcurrentes con orientación nor-noreste es la generación de estructuras en flor negativas y flor positivas asociadas a bloques levantados. Tomografías sísmicas realizadas revelan abanicos imbricados.

7. MARCO GEOLÓGICO Y TECTÓNICO REGIONAL

La esquina noroccidental de Suramérica se encuentra en una región tectónicamente compleja en donde interaccionan convergentemente (DeMets *et al.*, 1990; Freymueller *et al.*, 1993), las placas Suramericana, Caribe y Nazca. La interacción de estas placas ha conformado un bloque triangular de corteza continental limitado por las fallas de rumbo Oca, Bucaramanga-Santa Marta y Boconó, conocido como Bloque Maracaibo, sobre el cual se localiza la cuenca Maracaibo-Catatumbo. (ECOPETROL, 2001), la Sierra Nevada de Santa Marta, la Sierra de Mérida, la Serranía de Perijá, el Macizo de Santander, y las cuencas Cesar-Ranchería. Conforman la Cordillera Oriental

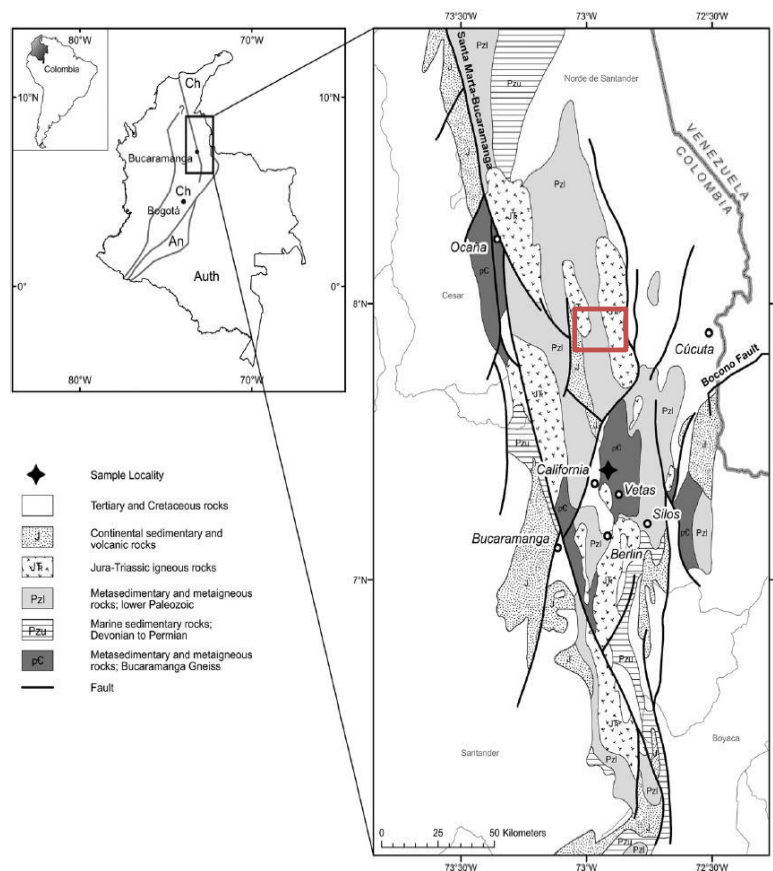
La acreción de la Cordillera Occidental empezó durante el cretácico Tardío – Paleoceno afectó los ambientes de depositación que hoy conforman la Cordillera Oriental (McCourt *et al.*, (1984) en Cooper *et al.*, (1995)). En el Mioceno Medio, la acreción del bloque Chocó con el límite noroccidental de la placa Suramericana (Cooper *et al.*, 1995) pudo haber contribuido al inicio de la deformación de la Cordillera Oriental. Ya en el Mioceno Tardío tiene lugar el evento principal de deformación de la Cordillera Oriental, a causa de la colisión de la microplaca de Panamá con la placa Suramericana (Cooper *et al.*, 1995).

La zona de estudio se ubica en territorio de dos provincias Tectono-estratigráficas, Macizo de Santander, limitado al E por el sistema de fallas Las Mercedes y Chitagá - Chucarima (INGEOMINAS, 2008) y la Cuenca Catatumbo, parte Colombiana de la cuenca de Maracaibo; a su vez, corresponde al área comprendida en el bloque Pamplona y la subcuenca Catatumbo-Zulia. (INGEOMINAS, 1994)

Macizo de Santander

El Macizo de Santander se localiza en la parte Nororiental de la Cordillera Oriental haciendo parte de los departamentos de Santander y Norte de Santander, limitando al occidente con el Valle Medio del Magdalena, al Norte con la Serranía del Perijá y al Oriente con la Cordillera de Mérida.

Figura 23. Ubicación geográfica del Macizo de Santander. En el recuadro café se resalta el área de estudio



Fuente: Tomado de Mantilla *et al.*, (2012)

Sobre el Macizo de Santander se han realizado por numerosos estudios de diferentes temáticas; Julivert, M. (1959), se destaca por presentar una de las primeras propuestas relacionadas con el levantamiento de éste. Así mismo Kammer A. (1996), señala a las Fallas Bucaramanga y Labateca como los límites del levantamiento y propone el emplazamiento del Macizo de Santander por levantamiento vertical a partir de la inversión de fallas normales de alto ángulo que se dio en el Jurásico; este tipo de emplazamiento pudo generar colapso de la parte central del Macizo, configurando un arreglo de fallas en abanico. (INGEOMINAS, 2008)

Además para el Macizo de Santander se han definido tres dominios morfotectónicos regionales: El primero transpresivo y transcurrente del sistema de fallas de Bucaramanga ubicado en el flanco occidental, el segundo que conserva remanentes de la superficie de peniplanización Pliocena ubicado en la zona axial de la cordillera y el tercero muestra la deformación compresiva con plegamiento en rocas sedimentarias y cabalgamientos con vergencia al E y W, ubicado en el flanco oriental de la cordillera, los cuales definen como estructuras principales las fallas Las Mercedes, Mutiscua y Chucarima. (INGEOMINAS, 2008).

Cuenca Catatumbo

La cuenca de Maracaibo–Catatumbo durante el Mesozoico y Cenozoico registra una compleja y dinámica historia de evolución; dicha evolución se encuentra asociada a un proceso de colisión y subducción oblicua a lo largo de fallas de desplazamiento lateral, entre el borde sur de la Placa Caribe y el extremo noroeste de la placa de Suramérica (Pennington, W., 1981; Burke, K., 1984; Kellogg y Bonini, 1982; Kellogg, 1984; Pindell y Barrett, 1990). El límite entre las placas está representado por una amplia y difusa zona de activa deformación (ECOPETROL, 2001).

En la actualidad la cuenca de Maracaibo–Catatumbo forma una depresión estructural bordeada por cadenas montañosas están representadas por los Andes de Mérida al sur, un cordón orogénico con dirección NE/SW constituidas por un basamento el cual está suprayacido por una secuencia de rocas sedimentarias de origen marino y clástico con espesores variables. Tectónicamente la cuenca se localiza dentro del “Bloque Tectónico de Maracaibo” formado por una cuña tectónica que está “escapando” activamente hacia el norte por la acción ejercida entre los sistemas de fallas Santa Marta – Bucaramanga y Boconó.

7.1 ESTRATIGRAFÍA

En la zona de estudio (Cuenca del Catatumbo y Macizo de Santander), plancha 87-III, afloran las rocas del basamento conformado por rocas ígneas y metamórficas, de composición similar a las presentes en la Sierra de Perijá y los Andes de Mérida (Richards, 1968). Además de una secuencia sedimentaria.

7.1.1 Neis de Bucaramanga (PEb)

Unidad constituida por paraneis pelítico, semipelítico, así como esquisto y cantidades subordinadas de neis calcáreo, hornbléndico, mármol, y anfibolita (Ward *et al.*, 1973) en algunos sectores se presentan migmatitas, debido a la litología, variedad y complejidad (INGEOMINAS, 1994) propone usar el nombre de Complejo de Bucaramanga. La edad obtenida por Goldsmith, *et al* (1971) para este cuerpo corresponde a 950 ± 40 Ma.

La sección tipo de esta unidad se ubica en el frente montañoso al este de la ciudad de Bucaramanga- Cerros La Judía y Morro Negro (Royero y Clavijo, 2001).

7.1.2 Ortoneis (PDo)

Esta unidad se encuentra constituida neis cuarzofeldespático, hornbléndico y biotítico con lentes de anfibolita. Ward et al, 1973 asume edades para el Ortogneis desde el Precámbrico hasta Devónico. Restrepo – Pace, 1995 reporta la edad de 480 Ma. Para un Ortoneis al NE de Berlín. Royero y Clavijo (2001), proponen el nombre de Ortoneis de Berlín por encontrarse la sección tipo en los alrededores de Berlín, donde tiene su mayor extensión y está mejor expuesto (carretera Bucaramanga-Pamplona).

7.1.3 Formación Silgará (pDs)

La Formación Silgará se compone por una secuencia de rocas clásticas de grano fino con un grado bajo de metamorfismo, consta de pizarras, filitas, metalimolitas, metarenisca impura, meta-waca y meta-waca guijarrosa con menos cantidades de pizarra y filita calcárea (Ward et al, 1973). Esta Formación suprayace al Neis de Bucaramanga y es intruída por Ortoneises. La edad de la Formación Silgará se desconoce.

Jurásico

7.1.4 Formación Girón (Jg)

Esta Formación hace parte del Grupo Girón, compuesto por una secuencia de areniscas e intercalaciones de lutitas rojas de aproximadamente 4840 m. de espesor. La Formación Girón se compone principalmente de subgrauwacas y lutitas rojas de ambientes fluviales. Los cuales reposan discordantemente sobre rocas ígneo-metamórficas. (Cediel, 1968)

Cretácico

7.1.5 Grupo Uribante (K1u)

El término Formación Uribante fue introducido por (Sievers 1888) para definir las capas inferiores principalmente clásticas que afloran sobre el río Uribante del estado de Táchira, siendo definida de manera deficiente. Notestein *et al.* (1944), subdividen en tres unidades cartografiables además (Ward, 1973), elevaron a Grupo la Formación Uribante y los miembros Tibú, Mercedes y Aguardiente a Formación, debido a la variedad litológica. El Grupo Uribante presenta un espesor promedio de 2000 m, con tres Formaciones Tibú, Mercedes y Aguardiente.

- Formación Tibú (Aptiano)

La Formación Tibú designada así por el río Tibú, (Ward, 1973), litológicamente se compone de areniscas guijarrosas hacia la base, cubriendo rocas ígneas y metamórficas, areniscas, calizas fosilíferas, shales, con estratificación ondulosa y cuarzoarenitas grises, calcáreas, con abundantes fósiles, bioturbadas en bancos gruesos macizos.

Se encuentra en contacto neto con la Formación Mercedes (Richards, 1968).

- Formación Mercedes (Albiano Inferior).

Esta Formación recibe el nombre por el Valle de las Mercedes, litológicamente se compone por intercalaciones de caliza arenosa y fosilífera con shales, dolomitas y areniscas en ocasiones se presenta calcáreas con concreciones (en Sardinata). (Ward, 1973).

Se encuentra en contacto transicional con la Formación Aguardiente (Richards, 1968).

- Formación Aguardiente (Albiano medio a superior).

Designada así por el filo Aguardiente, esta formación se consiste de arenisca glauconítica y calcárea, lulitas y algunas calizas, dispuestas en estratificación cruzada. (Ward, 1973).

El contacto con la suprayacente Formación Capacho es gradacional, Getty (1982). (ECOPETROL, 2001)

7.1.6 Formación Capacho (Cenomaniano-Turoniano) (K1c).

El término Formación Capacho fue inicialmente introducido por Sievers (1888), para designar afloramientos de calizas cerca del pueblo Capacho Viejo en Táchica (Ward, 1973). Esta Formación consiste de shale grises a negras con impresiones de bivalvos y restos de peces intercaladas con lodolitas arenosas, calcáreas, bioturbadas, calizas fosilíferas y calizas micríticas. (ECOPETROL, 2001)

7.1.7 Formación La Luna (Coniaciano-Campaniano temprano).

Nombrada así por la quebrada La Luna, consiste de calizas carbonácea y bituminosa dispuestas en capas horizontales intercaladas con areniscas calcárea y ocasionalmente nódulos de chert. Esta formación se caracteriza a por su alto contenido en fósiles entre los cuales se encuentran amonites, pelecípodos, foraminíferos y restos de peces, además de la variación de espesores. (Ward, 1973).

Según Getty (1982), la Formación La Luna infrayace en forma concordante a la Formación Colón. No obstante, Sorzano y Navarrete, en Exxon (1993), determinan la presencia de un hiato estratigráfico entre las Formaciones La Luna y Colón (ECOPETROL, 2001).

7.1.8 Formación Colón (Campaniano tardío a Maastrichtiano temprano).

Está compuesta por lodolitas físis, grises a grises oscuras, ligeramente calcáreas. Hacia la base se presenta una arenisca glauconítica que contiene foraminíferos retrabajados y restos de peces (Miembro Tres Esquinas).

Bouman y Gibson (1964), reportan para la Formación Colón un rango de espesor entre 700 pies al este y 1,400 pies al oeste.

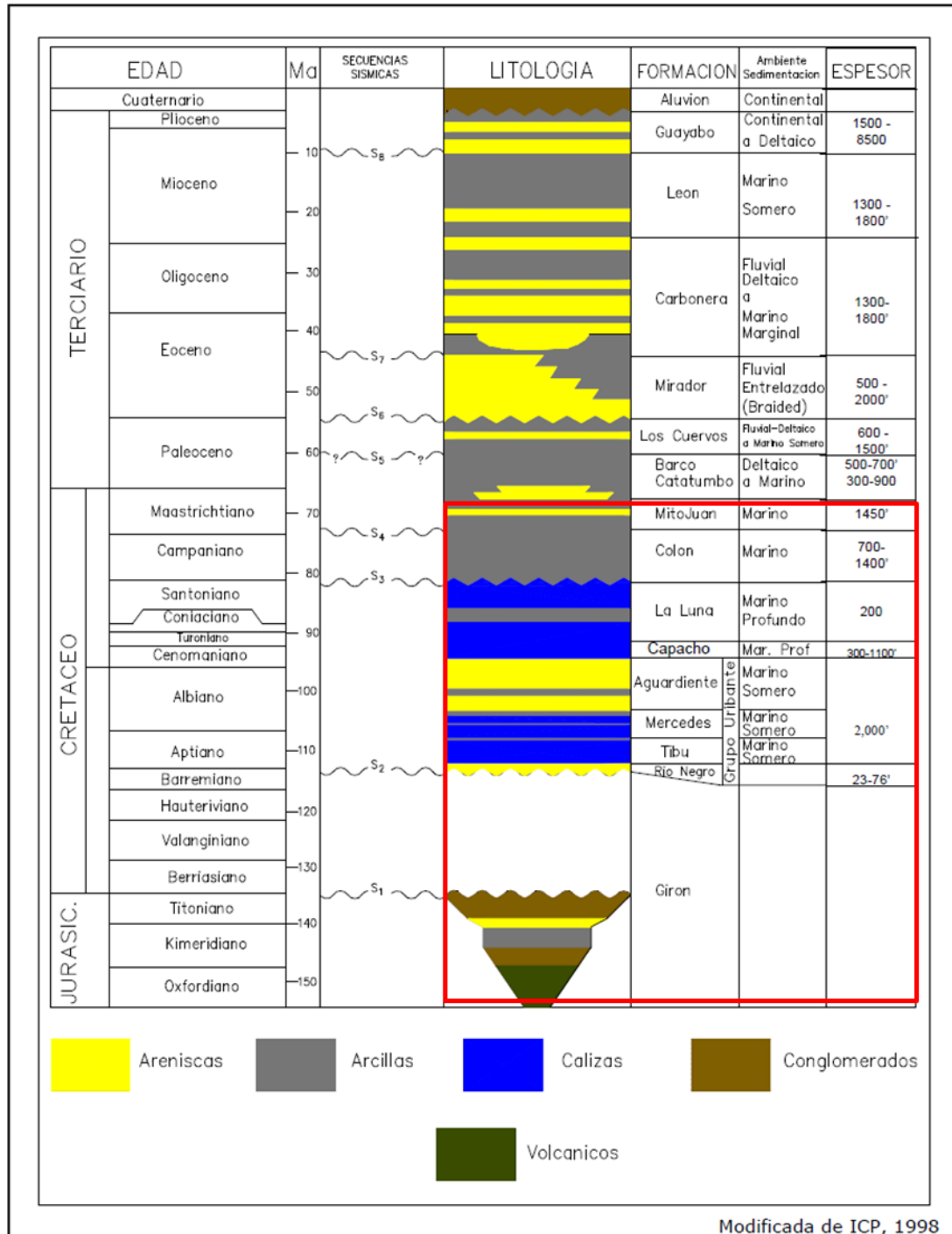
El contacto con la suprayacente Formación Mito Juan es gradacional Bouman y Gibson (1964) en ECOPETROL, 2001.

7.1.9 Formación Mito Juan (Maastrichtiano temprano-Maastrichtiano tardío).

Designada así por la quebrada Mito Juan, y consiste principalmente de shale gris-verdosas, localmente arenosas, sin embargo van aumentando su contenido en limo y arena, en sentido ascendente, hacia el tope se presentan calizas y areniscas, siendo comunes concreciones pequeñas de arcillas rojas “*ironstone*” y calizas ferruginosas, glauconíticas arenosa y fosilífera. (Ward, 1973).

El contacto con la suprayacente Formación Catatumbo es gradacional y difícil de precisar debido a las similitudes en la litología (ECOPETROL, 2001)

Figura 24. Columna Estratigráfica generalizada de la Cuenca Catatumbo, se resaltan las unidades presentes en la zona de estudio.



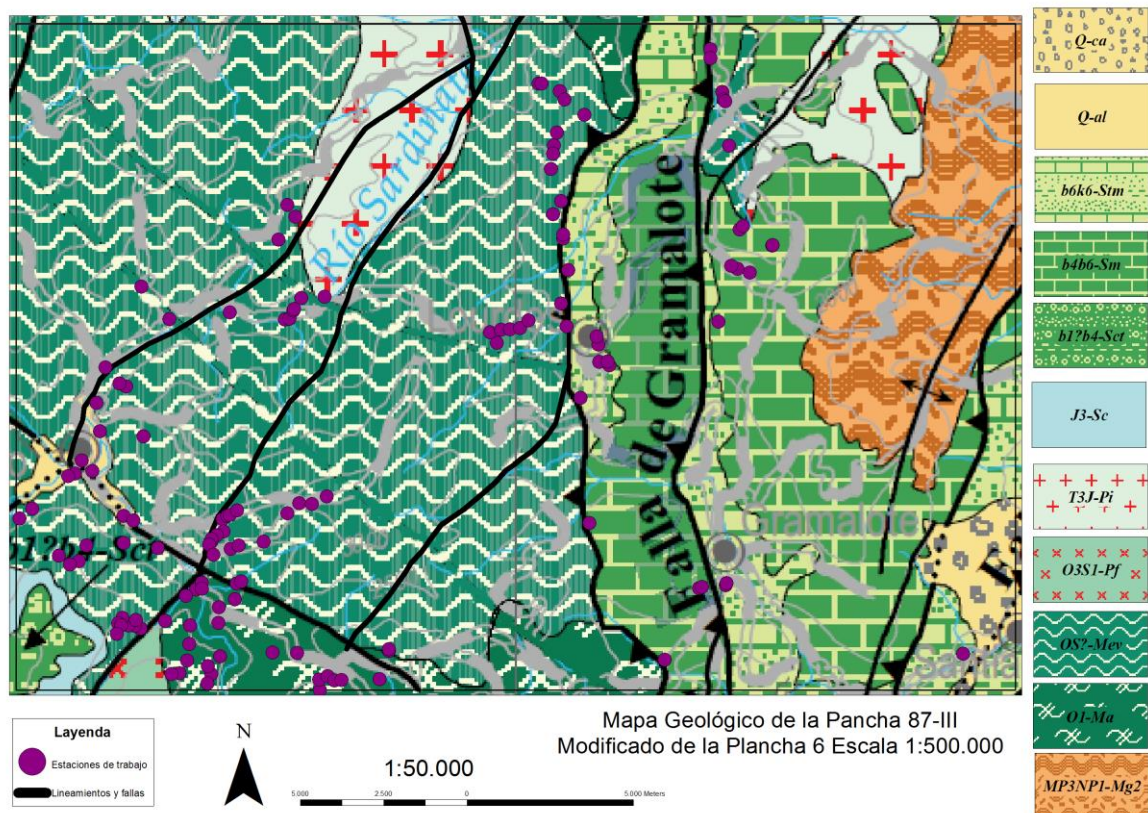
Fuente: Tomado y modificado de ECOPETROL, (2001).

8. GEOLOGÍA DEL ÁREA

8.1 Estratigrafía

Sobre la zona de estudio se presentan las rocas metamórficas e ígneas del basamento cristalino y una secuencia de rocas sedimentarias cretácicas, así mismo sedimentos recientes de origen, denudacional y aluvial. (Figura 25)

Figura 25. Mapa geológico de la Plancha 87-III con unidades cronoestratigráficas, las estaciones de trabajo se identifican con círculos morados.



Fuente: Tomado y modificado de la Plancha 6 a escala 1:500.000 del Atlas Geológico de Colombia.

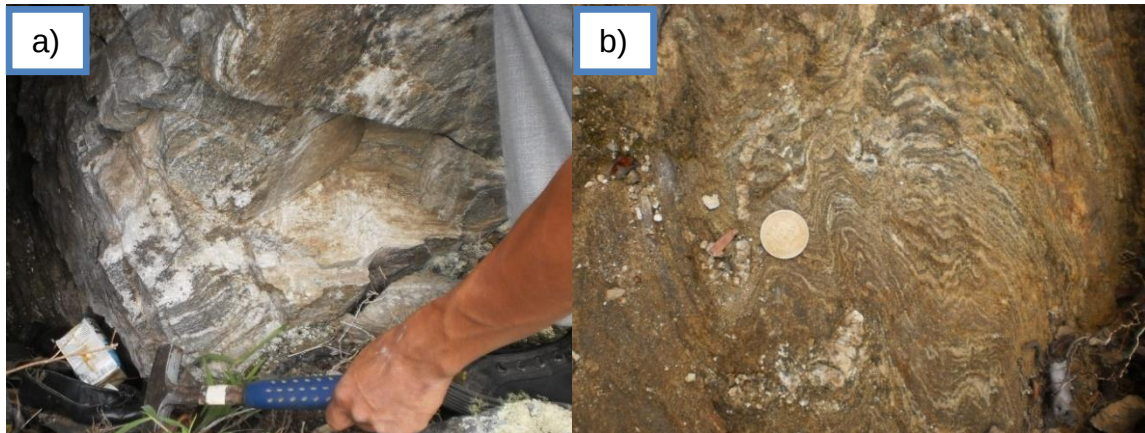
8.1.1 Neis de Bucaramanga (PEb)

Está conformado principalmente por neis y migmatita, color gris con tonalidad verde o azul, estructura bandeada y plegada, con bandeamiento composicional (bandas claras cuarzo-feldespáticas color blanco y bandas básicas de minerales máficos posiblemente anfíboles y biotitas). Las bandas suelen estar muy bien definidas, generalmente paralelas entre sí y en ocasiones entre cortadas, rectas y a veces sinuosas. Las bandas no superan los 7mm de grosor y suelen predominar las máficas. (Figura 26). El tamaño de grano es de medio a grueso.

Algunos de los lugares y características donde aflora corresponden a:

- Escuela Institución Educativa La Cueva, Sede Las Colmenas NRL111 (N: 1.365.125 E: 1.126.206 Z: 2285) afloran estas rocas en estado fresco y desarrollando planos de foliación.
- Las Colmenas hacia el alto El Espartillo continúan aflorando; en NRL012 (N: 1.365.231 E: 1.126.337 Z: 2347) las rocas se encuentran replegadas.
- En cercanía a la quebrada Los Liones NRL045 (N: 1.369.118 E: 1.123.303 Z: 1487), camino a la escuela de la vereda El Silencio afloran los neises en estado muy fracturado posiblemente asociados a una zona de falla.
- Camino al Espartillo en NRL049 (N: 1.364.244 E: 1.126.447 Z: 2146) afloran en estado algo oxidado, con una foliación de N88W/62NE, aflorando en estado muy alterado y desarrollando suelos areno-limosos de tonos naranjas hasta la cima del cerro Espartillo.

Figura 26. Características generales del Neis anfibólico a) Afloramiento b) Bandeamiento sinuoso.



Fuente: Servicio Geológico Colombiano. a) Foto NRL011 b) Foto NRL012-1

Esta Formación también aflora en el cerro El Espartillo, en donde se presenta como neises con un alto grado de meteorización (

Figura 27).

Figura 27. Características del Neis de Bucaramanga (Grado de alteración, cerro El Espartillo).



Fuente: Servicio Geológico Colombiano. Foto: NRL052-7

8.1.2 Formación Silgará (pDs)

Esta unidad se compone principalmente por filitas, de estructura moteada y foliada con un alto contenido de minerales micáceos entre estos muscovita, posiblemente biotita y opacos, acompañados por cuarzo y plagioclasa, muy poco o nulo feldespato potásico. El tamaño de grano corresponde a fino indicando un metamorfismo de bajo grado. Los colores típicos son gris claro a oscuro y con tonos verdes en superficies frescas, sin embargo es común encontrarlas en estado oxidado de coloración parda, rojiza y naranja de manera superficial (*Figura 28*).

En la *Figura 28* se aprecia el típico suelo residual producto de la meteorización de esta unidad; suele ser color pardo rojizo y de tipo areno-limosos o limo-arenosos.

Figura 28. Suelo residual color pardo rojizo areno-limoso de la Formación Silgará.



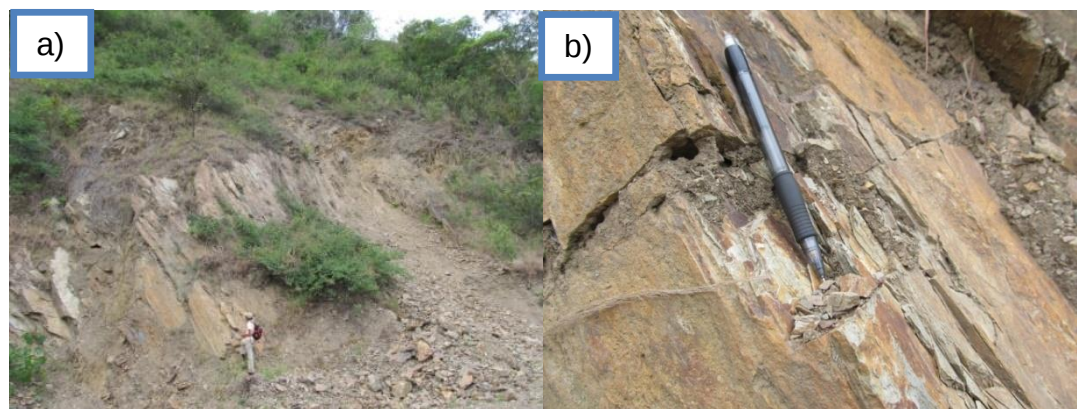
Fuente: Servicio Geológico Colombiano. AMP-023-1-FA

- En cercanías en al puente militar a las afueras de Villa Caro (NRL030 N: 1.366.496 E: 1.121.736 Z: 1505). Afloran filitas foliadas en estado poco meteorizado, aunque muy fracturadas de color gris oscuro y gris claro con tonalidad verde, en sectores su textura es fina a muy fina mientras en otros sectores del mismo afloramiento, el tamaño de grano aumenta y presenta una foliación más parecida a un esquisto. Además se pueden observar cristales de plagioclasa orientados en franjas delgadas y discontinuas. Esta Formación también aflora sobre la vía que conduce desde Villa Caro hacia la Vereda el Oso y por vía Villa Caro – Gramalote, NRL034 (N: 1.366.575 E: 1.122.292 Z: 1492) (*Figura 29*).
- En el camino hacia la finca El Figue y en el camino que del figue conduce al sector conocido como Vernandillo (NRL041 N: 1.364.425 E: 1.123.224 Z: 1911). Se observan suelos y saprolitos producto de meteorización de ésta

roca, se encontraron Otros afloramientos sobre la vía Villa Caro- Caserío Los Corazones.

- Sobre el río Sardinata, en el carreteable Villa Caro-Gramalote NRL073(N: 1.365.094 E: 1.123.524 Z: 1562) a las afueras del casco urbano de Villa Caro, cerca al cerro de las cruces, afloran rocas con finamente foliadas en estado menos alterado.

Figura 29. Filitas de la Formación Silgará a) Afloramiento y b) detalle.



Fuente: Servicio Geológico Colombiano. a) Foto AMP-025-2-FA, b) AMP-025-3-FD

8.1.3 Ortoneis? (pDo)

Esta unidad comprende rocas de composición principalmente cuarzo-feldespáticas con un contenido de minerales máficos generalmente menor al 10% (*Porcentajes según diagramas de comparación visual en muestra de mano*) y regularmente distribuidos en la roca; sin bandeo composicional ni planos de foliación pero, con una leve orientación preferencial del cuarzo y la plagioclasa. El contenido de

feldespato potásico es bastante variable, 5% a 25% en la roca, así mismo el tamaño de los cristales varía de fino a grueso de color blanco y rosado se presenta en sectores y en proporciones variables dependiendo del contenido de feldespato potásico, sin embargo, también se observan tonalidades café, naranjado pálido o amarillo debido a la meteorización y oxidación de minerales máficos.

El contacto de esta unidad con la unidad Neis de Bucaramanga se identificó en la vía que conduce desde el casco urbano de Villa Caro al sector de Las Colmenas (NRL018 N1364371 E1125793 Z1880; (Figura 30) en el que el Ortogneis se encuentra al parecer intruyendo al Neis de Bucaramanga.

Figura 30. NRL018-1: contacto intrusivo entre Ortoneis y Neis de Bucaramanga. Se aprecia el contraste entre los suelos residuales: de color claro y composición granular el suelo residual del Ortoneis y de composición areno-limosa y de tono café oscuro el suelo residual de Neis de Bucaramanga.



Fuente: Servicio Geológico Colombiano. Foto NRL018-1

En el sector conocido como La Humareda el Ortoneis se encuentra suprayacido por rocas volcanosedimentarias posiblemente correlacionables con la Formación Noreán? (*Figura 31*). En este sector en particular el Ortoneis se encuentra enriquecido en feldespatos potásicos (*Figura 32*.)

En el área de estudio esta unidad generalmente se encuentra muy meteorizada desarrollando suelos residuales con textura areno-granulares (*Figura 33*)

Figura 31. Contacto entre La Formación Noreán? (J1-2n) y el Ortoneis (pDo).



Fuente: Servicio Geológico Colombiano. Foto NRL064-2.

Figura 32. Cristales de feldespato potásico tabulares de más de 1cm de diámetro en muestra de Ortoneis.



Fuente: Servicio Geológico Colombiano. Foto NRL064-6.

Figura 33. Suelos residuales areno-granulares producto de la meteorización del Ortoneis.



Fuente: Servicio Geológico Colombiano. Foto NRL025-2.

En el río Sardinata NRL056 (N: 1°37'1.157 E: 1°12'8.209 Z: 1'128m) se encuentran extensos afloramientos medio a bajo grado de meteorización, en estos sectores se encuentra enriquecido en feldespatos potásicos, lo que le da un color rosado (

Figura 34). Y gris cuando se encuentra en un grado avanzado de meteorización; como en el caso de los afloramientos localizados en el camino Los Cueros-Loma Calabazas (*Figura 36*)

Figura 34. Afloramiento de Ortoneis en el río Sardinata, enriquecido en Feldespato potásico.



Fuente: Servicio Geológico Colombiano. Foto NRL056-1.

En el sector con coordenadas N: 1.365.227 y E: 1.136.962, se presentan rocas de textura relíctica fanerítica de grano medio a grueso y composición granítica presenta óxidos de hierro, clorita y alteraciones típicas de los feldespatos potásicos, ligeramente bandeado (no es tan evidente); dentro de este cuerpo se encuentran fenocristales de cuarzo (lechoso) con una leve orientación preferencial (Figura 36). La unidad se encuentra intruída principalmente por venas de cuarzo, epidota y clorita (Figura 37).

Figura 35. a) Afloramiento del Ortoneis fuertemente alterado. b) detalle del Ortoneis. Los tonos grises se deben al avanzado estado de alteración.



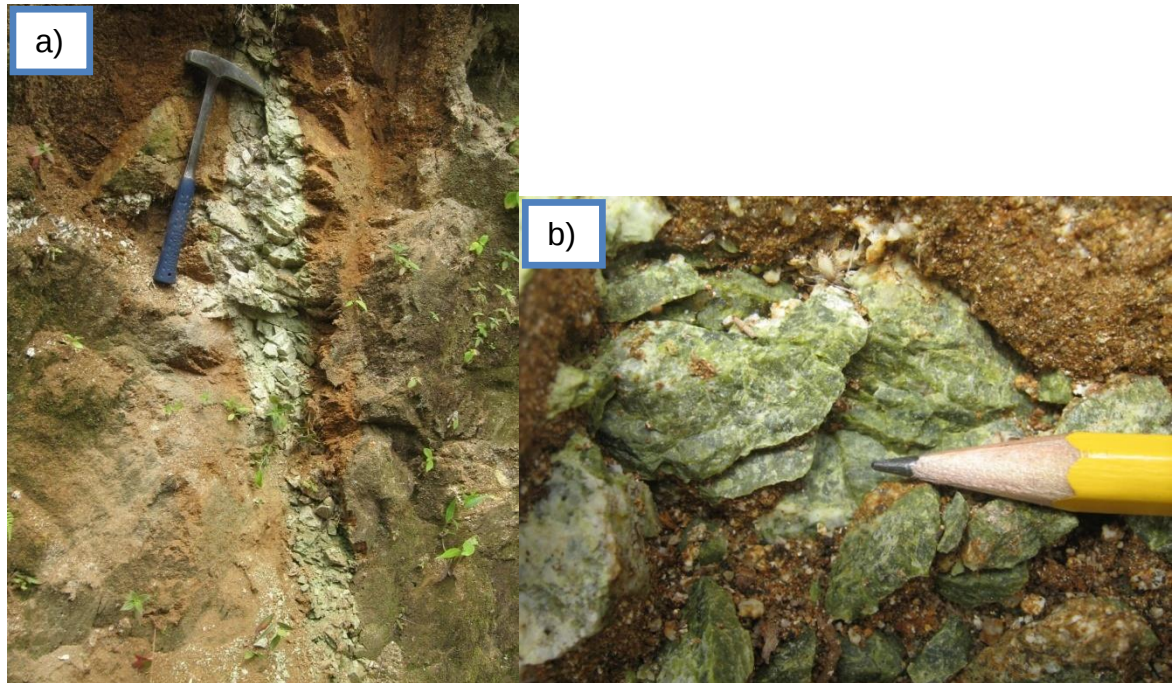
Fuente: Servicio Geológico Colombiano. a) Foto NRL058-5, b) NRL058-1

Figura 36. En verde se resalta la orientación preferencial de los cristales en el Ortoneis.



Fuente: Servicio Geológico Colombiano.

Figura 37. Ortoneis intruído por vena posiblemente de epidota a) Afloramiento b) detalle.



Fuente: Servicio Geológico Colombiano. a) Foto IMG_0371 b) Foto IMG_0370

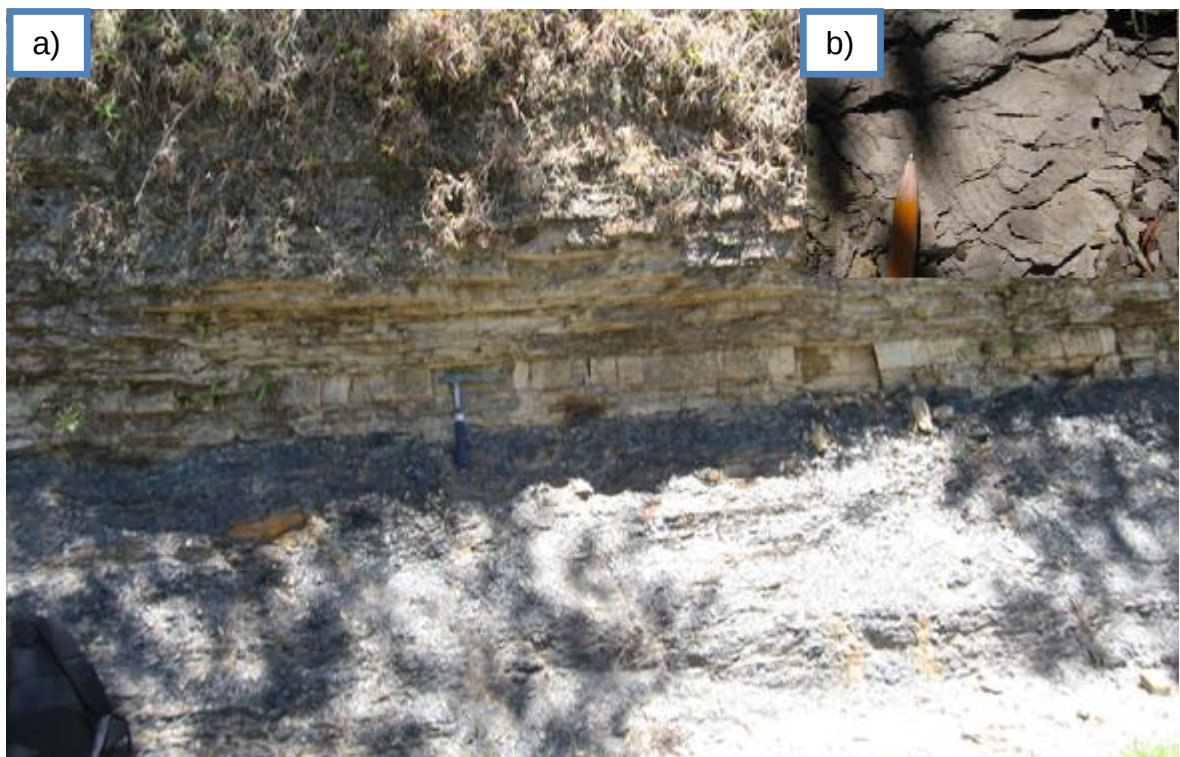
8.1.4 Formación Tibú, Mercedes y Aguardiente (K1u).

Estas Formaciones se consideran como un solo grupo, teniendo en cuenta las observaciones de campo, donde no fue posible establecer diferencias entre estas, dado que su composición es similar para las tres, por lo cual se hace necesario el estudio petrográfico y de esta manera diferenciar y definir cada una.

- Cerca al sector el alto del Zumbador, en la estación NRL077, (N: 1.372.737 E:1.141.474 y Altura: 1822), se encuentran expuestas 2 capas (Figura 38 a)

compuestas por lodolitas pardas, definidas de techo a base así: capas compactas tabulares con estratificación interna ondulosa hacia la parte superior de la capa y, plano paralela hacia la base, con presencia de óxidos de hierro (limolita) en los planos de estratificación (Figura 38 b) y localmente concentrado dentro de la roca; en contacto neto con una capa más fisil de arcillolitas grises a negras, con presencia de micas tipo moscovita, con estratificación interna plano paralela.

Figura 38. a) Afloramiento de lodolitas negras friables a la base suprayacidas en contacto neto con lodolitas más competentes con estratificación ondulosa. b) detalle de los óxidos



Fuente: Servicio Geológico Colombiano. a) Foto NRL077-2, b) Foto NRL077-1

8.1.5 Formación Capacho (K1c).

- Sobre la vía que comunica del municipio de Gramalote hacia el Municipio de Lourdes en el sector con coordenadas N=1.365.378 E=1.140.837 Z=1127, aflora una alternancia de capas de caliza y arcillolitas no calcáreas de color negro, con estratificación interna plano paralela, presencia de micas tipo moscovita. Entre las fracturas y los planos de estratificación se observan óxidos de hierro.

Figura 39. Alternancia de capas tabulares de calizas y arcillolita.



Fuente: Servicio Geológico Colombiano. Foto AMC-20a

8.1.6 Formación La Luna (K1l).

Sector “La Talcalera”-Santiago

- En el sector conocido como la Talcalera NRL120 (N=1.361.087 E=1.148.428 Z= 463) sobre la vía que conduce del municipio de Santiago a Puente Gómez, en una cantera de dimensiones aproximadas de 50m de alto por 70m de largo, se distingue de base a techo calizas grises esparíticas, con presencia de contenido fósil (conchas), concreciones, capas de lodolitas silíceas de color negro, con venas de calcita y hacia el tope capas de lodolitas calcáreas color negro con estratificación plana paralela y con contenido fosilífero además de estructuras de Boudinage (*Figura 40*).

Figura 40. Boudinage en calizas de la Formación La Luna.



Fuente: Servicio Geológico Colombiano. Foto NRL120-25.

Sector Gramalote – Villa Caro

- En el carreteable Gramalote –Villa caro, NRL117 (N=1.363.061 E=1.140.504 Z=1193), presenta un afloramiento (*Figura 41*) descrito de base a techo como una intercalación de Chert de color negro, con fracturas rellenas de calcita y con una estratificación plana paralela interna, seguido por capas de caliza esparítica de color gris, sin contenido fósil. También se observa la presencia de clastos de material orgánico de color marrón, posibles restos de plantas y pellets. Como característica especial, se tiene una capa de arena calcárea de color marrón, de grano muy fino a fino.

Figura 41. Capas tabulares de caliza esparítica alternada con chert en la vía Gramalote-Villa Caro. Formación La Luna.



Fuente: Servicio Geológico Colombiano. Foto PGR-93-CE(5)

Sector sobre la vía desde el municipio de Lourdes hacia Gramalote.

- Sobre la vía que conduce desde el municipio de Gramalote hacia el sector de Lourdes, PGR-21 (N=1.368.160 E=1.140.649), en el margen derecho de la carretera, aflora una litología descrita de techo a base que se caracteriza por arcillolitas calcáreas negras, compactas y fracturadas, infrayaciendo un paquete delgado de calizas bioesparíticas y arcillolitas pardas, calcáreas y presencia de concreciones calcáreas de color negro a gris oscuro y hacia la base encontramos una capa de areniscas de grano muy fino, pardas, calcáreas y fracturadas.

8.1.7 Formación Colon-Mito Juan (K2cmj).

En las observaciones realizadas en campo no se logró identificar esta unidad, sin embargo fue reportada por otros geólogos participantes del Proyecto de Cartografía geológica y muestreo geoquímico de las planchas 87 y 88, Norte de Santander.

Sector Cañaguat-Santiago

- En la sección, AMC-247 (N=1.361.367 E=1.150.389 Z=542), sobre el camino real que desde el municipio de Santiago conduce a el sector conocido como Cañaguat-Salazar de las Palmas, se presenta un afloramiento con capas tabulares de areniscas pardas grisáceas, de grano muy fino, con abundante contenido de cuarzo, sus granos son subredondeados, moderada selección y friables, con presencia de líticos en tonalidades negras a pardas-ocre, laminación interna cruzada con intercalaciones de nódulos ferruginosos (En la sección con coordenadas planas N=1.362.448 E=1.147.591 Z=684 sobre

el camino real que conduce desde el municipio de Santiago a la Vereda Aguadulce, se presenta un afloramiento con arcillolitas grises a pardas, con abundante presencia de óxidos de hierro, laminación plana paralela y fisiles, seguido de lodolitas arenosas gris verdosas, con presencia de óxidos de hierro con alto fracturamiento, hacia la base se encuentra una secuencia de arena de grano muy fino, redondeados, buena a moderada selección, compacta y bajo contenido de matriz. Seguido de arcillas o lodolitas arenosas de color gris verdoso con presencia de nódulos ferruginosos y lentes de arenisca gris de grano muy fino. Esta unidad presenta costras ferruginosas hacia el techo y base de las capas.

Sector Aguadulce, Finca Rosedal-Santiago

En la sección con coordenadas N=1.362.448 E=1.147.591 Z=684 en la sobre el camino real que conduce desde el municipio de Santiago a la Vereda Aguadulce, se presenta un afloramiento con arcillolitas grises a pardas, con abundante presencia de óxidos de hierro, laminación plana paralela y fisil, seguido de lodolitas arenosas gris verdosas, con presencia de óxidos de hierro con alto fracturamiento, hacia la base se encuentra una secuencia de arena de grano muy fino, redondeados, buena a moderada selección, compacta y bajo contenido de matriz.

Figura 42. Nódulos ferruginosos. Formación Colón y Mito Juan.



Fuente: Servicio Geológico Colombiano. Foto AMC-227a

8.2 Planos de falla medidos en campo

En campo se identificó un total de 67 planos de falla estriados, en 20 estaciones. Para cada plano se midió su rumbo, su dirección y magnitud de buzamiento, el valor y la dirección del pitch, además se determinó la cinemática (tipo de movimiento) de la falla teniendo en cuenta indicadores cinemáticos tales como los *Slickensides* o Escalones y Estructuras *Riedel* según se hayan identificado en cada caso en particular.

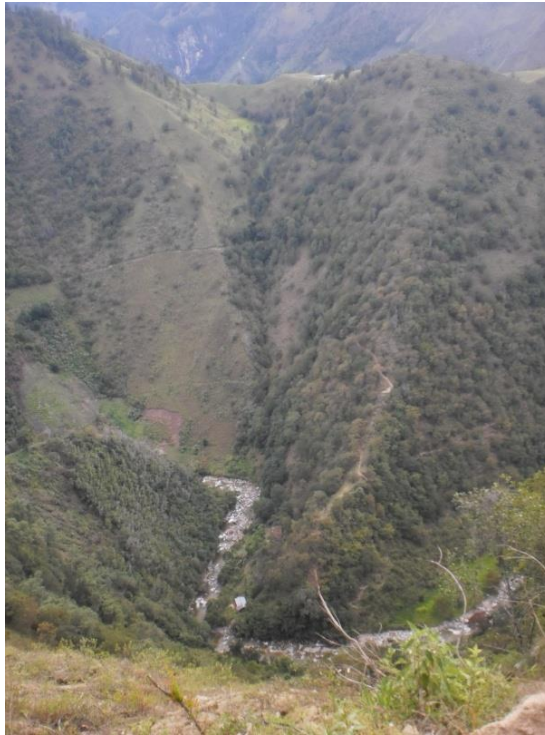
Durante las comisiones de campo se encontraron planos de falla estriados y rasgos geomorfológicos (facetas triangulares, lomos de presión, cauces desviados y lomos aislados entre otros) asociados a fallas geológicas.

A continuación se presentan los rasgos más representativos distribuidos por estaciones, acompañados por su figura correspondiente.

Estación NRL007 (N: 1361020 E: 1126119 Altura: 2064m)

Vereda San Antonio, cerca de la escuela Institución Educativa La Cueva, Sede San Antonio. Se observa en dirección NW se observa una silleta de falla (Figura 44) y un cauce desviado indicando la presencia de una falla geológica presumiblemente de componente de rumbo dextral.

Figura 43. Silleta de falla y cauce desviado por un lomo de obturación por efecto de una falla con componente dextral. Fotografía tomada en dirección 280° de Azimuth.

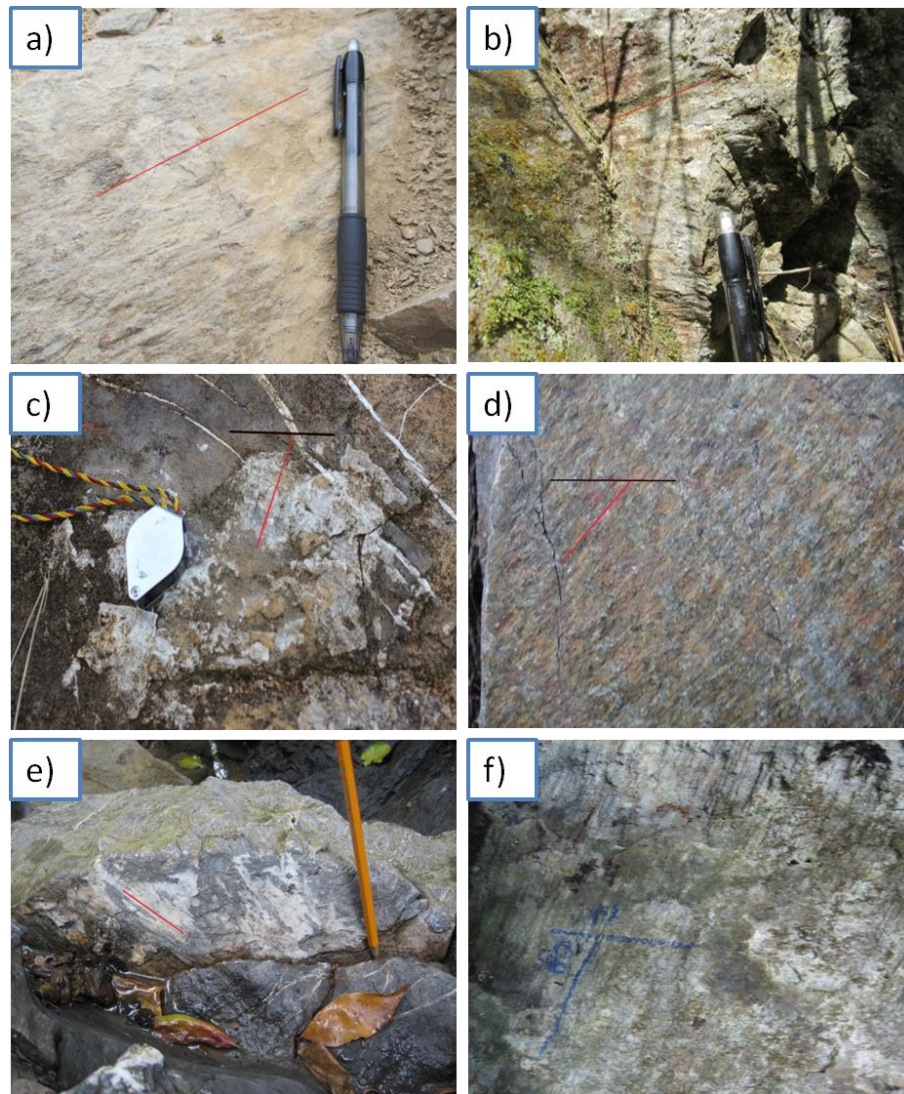


Fuente: Servicio Geológico Colombiano. Foto NRL007-8

Sobre las siguientes estaciones se midieron planos de fallas con estrías. En la *Figura 44*. Se observa en a) **NRL032** (N: 1.365.448 E: 1.120.482 Altura: 1741m El plano de falla con orientación N85W/52SW Pitch: 30° al SW Si-Inv. En rojo se resalta la estría. En negro fractura R'. b) **NRL 039** (N: 1.361.177 E: 1.131.195 Altura: 1670m) Plano estriado N49E/40NW Pitch: 35° al NE Si-Inv. En rojo se resalta la dirección de las estrías c) **NRL 074** (N: 1.371.064 E: 1.141.087 Altura: 1802m) Plano estriado con orientación N71W/58SW pitch 78SW normal-dextral. d) **NRL 092** (N: 1.376.108 E: 1.136.117 Altura: 1400m) Plano estriado con orientación

N60W/85SW Pitch 45 al SE, tipo sinistral-normal. En rojo se resalta la dirección de la estría y en negro la dirección de rumbo del plano estriado. e) **NRL 093** (N: 1.368.773 E: 1.136.944 Altura: 1543m) Plano de falla estriado con orientación N85E/60SE pitch 40 al SE tipo Dextral-Inversa. Superficie recrystalizada con carbonatos. f) **NRL 105**, (N: 1.373.351 E: 1.142.698 Altura: 1373m) Planos de falla estriados. N29E/79SE Pitch 80 al SE Tipo Normal-Dextral. El rumbo, la dirección de la estría y el ángulo del Pitch se muestran en color azul. El sentido del movimiento se determinó mediante los escalones conformados por calcita fibrosa.

Figura 44. Planos de fallas medidos.

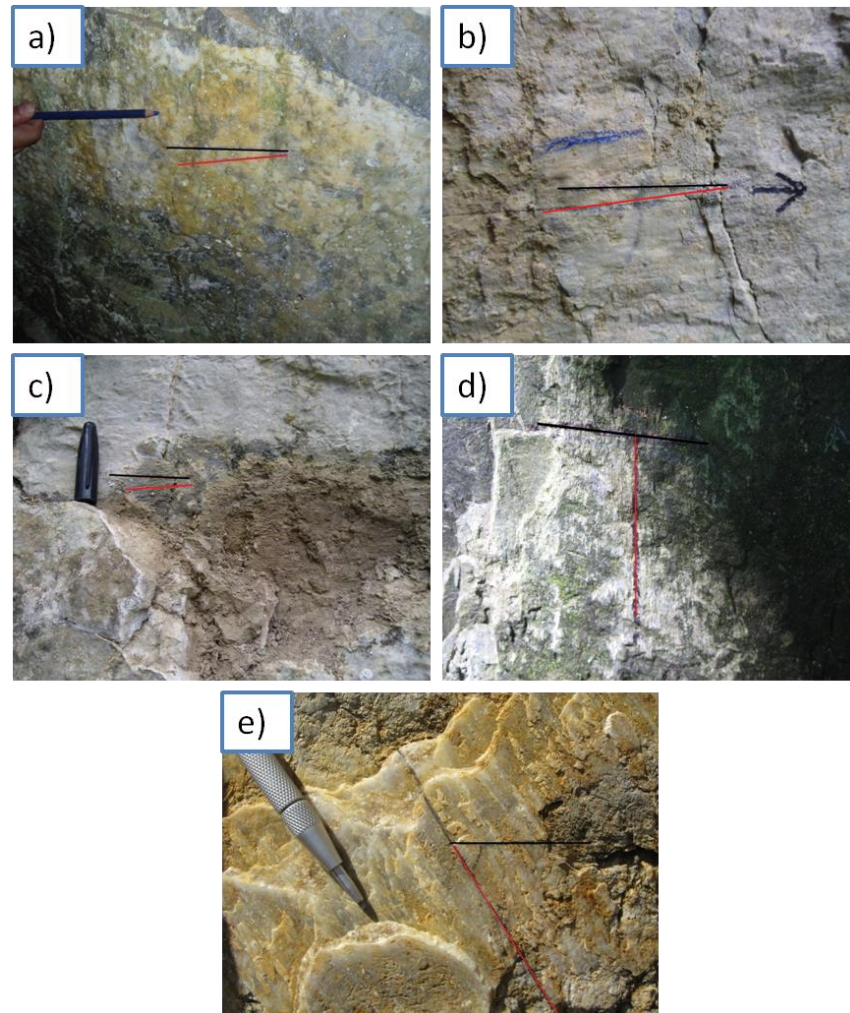


Fuente: Servicio Geológico Colombiano. a) Foto AMP-027-2-FD, b) Foto AMP-035-2-FD, c) Foto NRL074-7, d) Foto NRL092-2, e) Foto NRL093-10, f) NRL105-6

En la Figura 45 se observan planos estriados a) N82W/87NE Pitch 15 al NW Tipo dextral-normal. En rojo la dirección de la estría y en negro el rumbo del plano, b)

N62W/90 Pitch 10 al NW Tipo dextral-normal. En rojo la dirección de la estría y en negro el rumbo del plano, la flecha negra indica el sentido del movimiento del bloque en el que se encuentra. c) N12E/90 Pitch 19 al NE Tipo Sinistral. En rojo la dirección de la estría y en negro el rumbo del plano. d) Plano de falla estriado con orientación N10W/53SW Pitch 85 al SW Tipo normal-sinistral. Superficie recrystalizada con carbonatos, e) Plano de falla estriado con orientación N72W/74SW Pitch 64 SE Tipo inversa-dextral. La superficie presenta recrystalización con carbonatos.

Figura 45. Planos de falla estriados.



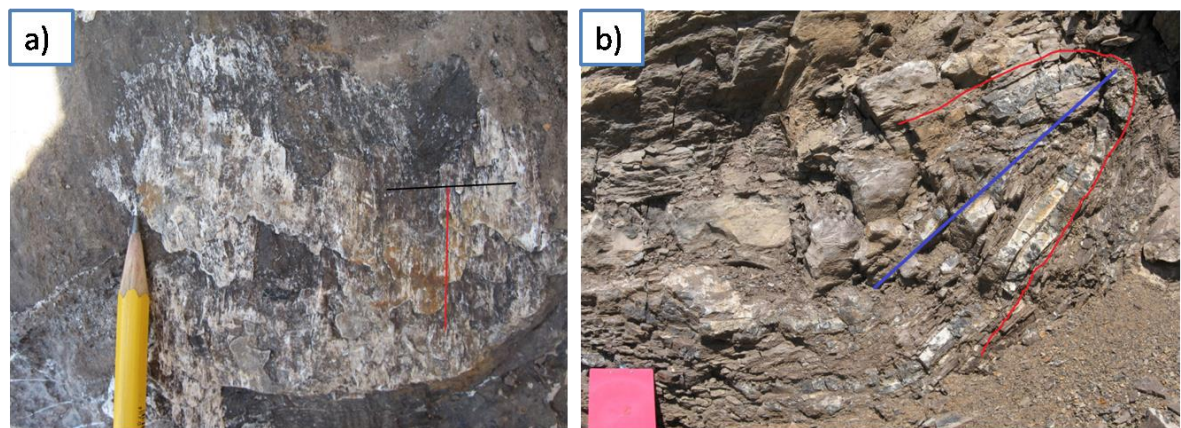
Fuente: Servicio Geológico Colombiano. a) Foto SAM_6657 b) Foto NRL105-14, c) Foto SAM_6675 d) NRL111-1, e) Foto NRL116-4

Estación NRL117 (N: 1363061E: 1140504Altura: 1193m)

- a) Plano de falla estriado con orientación N15W/30NE Pitch 80 al NE Tipo normal-dextral. La superficie presenta recristalización (*Figura 46*). En rojo se resalta la dirección de las estrías, en negro el rumbo del plano.

- b) Pliegue anticlinal asimétrico inclinado, apretado con un plano axial con orientación N80W/75NE

Figura 46. Planos de falla recrystalizados de la estación NRL117. Alternancia de capas de caliza y chert de la Formación la Luna. Obsérvese a) plano N15W/30NE Pitch 80 al NE Tipo normal-dextral, b) plano axial con orientación N80W/75NE.

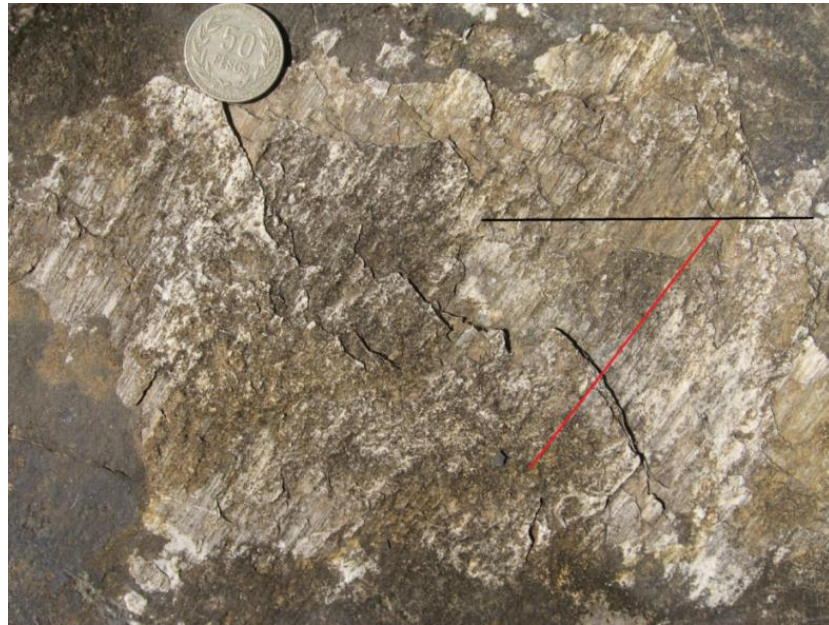


Fuente: Servicio Geológico Colombiano. a) Foto NRL117-6, b) Foto NRL117-8

Estación NRL118 (N: 1.363.099 E: 1.140.598 Altura: 1187m)

Plano de falla estriado con orientación N40W/29SW Pitch 46 al W o NW tipo inversa-sinistral. La superficie presenta recrystalización con minerales fibrosos de caliza. En rojo se resalta la dirección de las estrías y en negro el rumbo del plano (*Figura 47*).

Figura 47. Plano de falla estriado con orientación N40W/29SW Pitch 46 al W o NW tipo inversa-sinestral. La superficie presenta recristalización con minerales fibrosos de caliza.

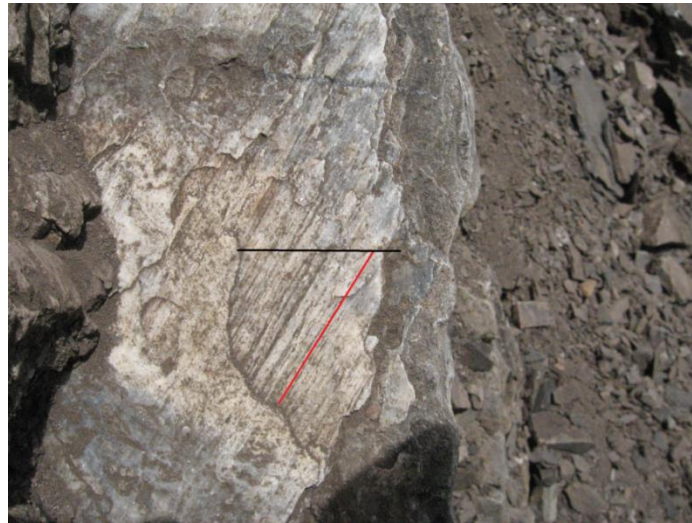


Fuente: Servicio Geológico Colombiano. Foto NRL118-3

Estación NRL120 (N: 1.361.087 E: 1.148.428 Altura: 463m)

Estructuras a) Plano de falla estriado con orientación N21E/47SE pitch 65 al SE tipo inversa-sinestral. La superficie presenta recristalización con carbonatos. En rojo se resalta la dirección de las estrías y en negro el rumbo del plano.

Figura 48. Estructuras en NRL120. a) Plano de falla estriado con orientación N21E/47SE pitch 65 al SE tipo inversa-sinistral. La superficie presenta recristalización con carbonatos. En rojo se resalta la dirección de las estrías y en negro el rumbo del plano.



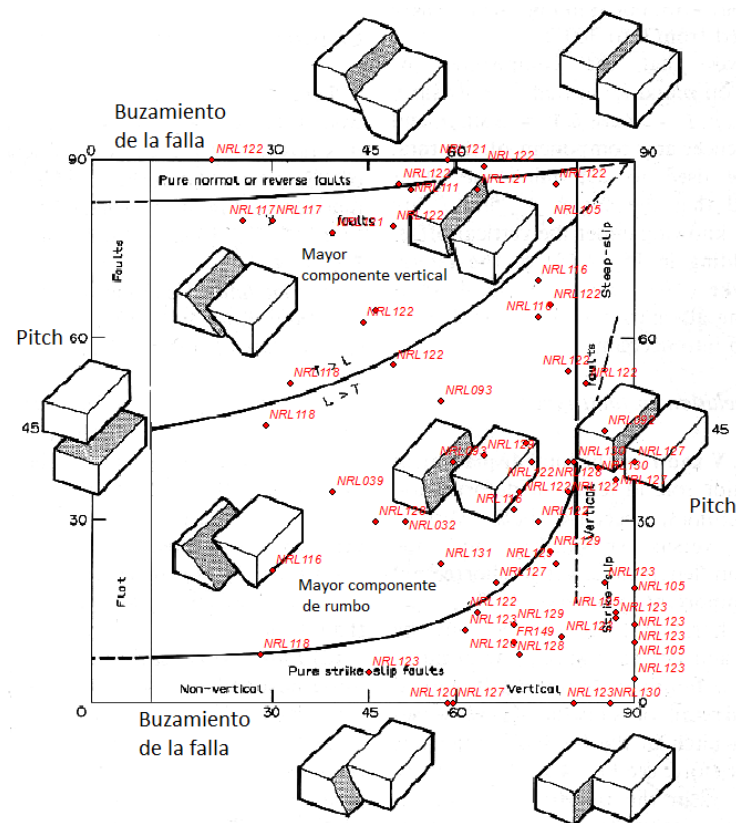
Fuente: Servicio Geológico Colombiano. Foto NRL120-20

En la Tabla de datos (Anexo B) se describen otros planos de falla estriados medidos en esta estación.

9. ANÁLISIS CINEMÁTICO

Para este análisis se utilizaron 67 planos estriados (*Slickensides*) en 20 estaciones y 218 diaclasas. Para cada plano se midió el rumbo, el buzamiento del plano, el pitch y su dirección, además se determinó la dirección y el sentido del movimiento basado en *Slickensides* y estructuras Riedel como indicadores cinemáticos. La clasificación del movimiento se determinó basándose en el buzamiento del plano de falla y el valor del pitch según se muestra en la *Figura 49*.

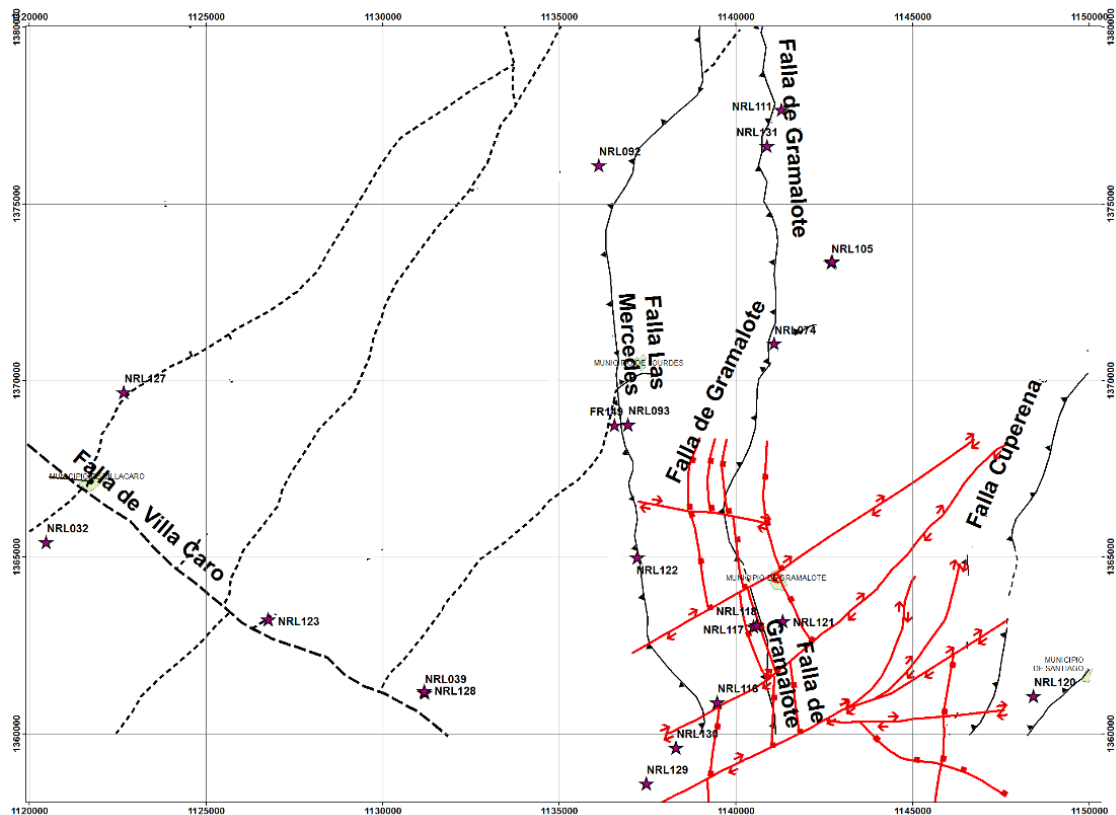
Figura 49. Clasificación de las fallas según *Pitch* y buzamiento del plano.



Fuente: Autor.

Los datos se plotearon en las planchas a escala 1:25.000 y 1:100.000 para visualizar su relación geográfica con alguna estructura (lineamiento o falla) anteriormente trazado en fase de fotointerpretación o en el cuadrángulo G-13 (Figura 50)

Figura 50. Mapa estructural de la plancha 87-III. Con una estrella morada se señalizan las estaciones donde se midieron planos estriados. Las fallas rojas son las cartografiadas en el mapa de unidades geológicas superficiales del sector de Gramalote.



Fuente: Servicio Geológico Colombiano.

Se encontró que en su mayoría los planos estriados medidos se encontraban en zonas de influencia de lineamientos anteriormente identificados. En base a esto se agruparon los datos asociados al corredor de la falla Las Mercedes y la falla de Gramalote. Un pre-procesamiento se realizó con el Software FaultKin 5 en el cual los datos medidos en campo (Rumbo, Buzamiento, el Pitch con su dirección y el Sentido del movimiento) se utilizaron para calcular el *Trend* y el *Plunge* de la estría (*Figura 51*). Los valores calculados se procesaron con el Software TectonicsFP 1.7.7 con el cual se elaboraron gráficas de rosas, polos, diagramas de Angelier y contorno de densidades.

Se calculó por el Método NDA una solución para los tensores de esfuerzos, la cual se representó en su respectivo diagrama “balón de playa”.

Figura 51. Ventana de entrada de datos en el programa FaultKin para el cálculo del tensor del valor de la orientación de la estría (StriaeTrend) y su inmersión (Plunge). Los datos de entrada son el Rumbo de la falla (Fault Strike) y su buzamiento (Dip), además del valor del Pitch (Rake)

Datos_FaultKin.txt

File Edit Data Calculations Plot View Window

Plot Data Select Map

Orientations (these entries are required)

Fault strike: 108 dip: 74 (RHR) Sense of slip:

Striae Trend: 137.4725 plunge: 59.76598 ☒ Rake: 63.99996 Thrust

Who and When

Field No.: NRL116 Geologist:

Day: 0 Month: 0 Year: 0 Quality:

Location

Latitude: 0 Longitude: 0 Elev: 0

Place:

Weighting Criteria

Displacement (m): 0 Gouge Thickness (m): 0

Trace Length (m): 0 Seismic moment: 0 (dyne*cm)

☐ same fault as previous measurement

Local Geology

Bedding Strike: 0 Upper Unit:

Bedding Dip: 0 Lower Unit:

Add New (N) N = 3 Calculate & Save

Fuente: FaultKin 4.0

Con los datos de dirección de cada estría y su correspondiente Plunge se elaboró la base de datos (Anexo B).

Nótese que cuando la estría es paralela al rumbo del plano (Pitch 0°) la dirección del pitch no se determinó; un pitch de 0° implica un plunge de 0° . El software TectonicsFP no admite valores de 0° para el plunge ni tampoco planos verticales (Dip 90°) por lo tanto planos (diaclasas o fallas) con estos valores se aproximan a 0.1° y 89° para el plunge y el buzamiento respectivamente.

Con el uso del software TectonicsFP también se calcularon y graficaron Los Ejes PBT.

Por su parte, los datos de diaclasas medidos se procesaron con el Software WinTensor (Figura 53) para obtener una segunda solución de los tensores por el método PBT y Dieder.

Figura 52. Ventana de entrada de datos software WinTensor. En las celdas se introducen los datos correspondientes a Id (ej. número de estación), Format (21 para ingresar datos en Dip direction/Dip) Type (4 para datos de diaclasas), Dip Direction, Dip, Sense (C; para asumir origen de diaclasas debido a compresión), Level (Nivel de certeza del dato).

Win_Tensor Version : 4.0.4 - [Data Worksheet - [diacilas_TOTAL2_TensorData_C.wtd]]

File View Edit Data Tools Graphics Window Help

Unlock File Validation Properties Comments Formula Stereonets Processing

Site properties

Project: SGC Site ID: PL 87

Area name: Plancha 87-III-C

Geologist(s): NELSON RICARDO LÓPEZ HERRERA

Field date: Incoding date: 05/12/2005

Magnetic N: Longitude (°E): Latitude (°N):

Outcrop style:

Stratigraphy:

Lithology:

Structure:

Timing:

Stereonets - Id: ACM-37

Data Row 1 (Id= ACM-37) / Definition Id

Data Value: ACM-37

Data Type: 4 - Plane (Fracture, Bedding, Foliation)

Data Object:

Data ID:

Data Parameter:

Unique data identifier composed of a prefix (text) and a formatted numeric value, separated by (-)

Example of Id: XX-001

Rem:

- The default prefix is the outcrop code
- The Id number is automatically incremented

Format of structural data in the current cell

All data validated

N°	Fault-slip data		Input row data (User format)										Compiled data Set 1 (Standard format)				Compiled data Set 2 (Standard format)								
	Definition	Fracture plane	Unused	Slip	Conf.	Weigh	Activ	Striae	Subset	Comments	Fracture plane	Fract.	Subsets												
	Id	Format	Type	Or1A	Or1B	Or2A	Or2B	Sense	Level	Factor	Type	Intens	Input		Dip	Dip-Dir	Plunge	Azim.	Type	Temp	Work				
1	ACM-37	23	4	270	10			C	S	2.0	4	0	1.0		10	270			CJ	1.0					
2	ACM-44	23	4	130	62			C	S	2.0	4	0	1.0		62	130			CJ	1.0					
3	ACM-45-1	23	4	150	53			C	S	2.0	4	0	1.0		53	150			CJ	1.0					
4	ACM-45-2	23	4	161	87			C	S	2.0	4	0	1.0		87	161			CJ	1.0					
5	ACM-66	23	4	206	39			C	S	2.0	4	0	1.0		39	206			CJ	1.0					
6	ACM-71	23	4	360	58			C	S	2.0	4	0	1.0		58	360			CJ	1.0					
7	ACM-76	23	4	299	86			C	S	2.0	4	0	1.0		86	299			CJ	1.0					
8	ACM-77	23	4	084	69			C	S	2.0	4	0	1.0		69	084			CJ	1.0					
9	ACM-90	23	4	084	03			C	S	2.0	4	0	1.0		03	084			CJ	1.0					
10	AMC-01	23	4	060	60			C	S	2.0	4	0	1.0		60	060			CJ	1.0					
11	AMC-010	23	4	080	90			C	S	2.0	4	0	1.0		90	080			CJ	1.0					
12	AMC070-1	23	4	176	75			C	S	2.0	4	0	1.0		75	176			CJ	1.0					
13	AMC070-2	23	4	320	69			C	S	2.0	4	0	1.0		69	320			CJ	1.0					
14	AMC-107-1	23	4	205	55			C	S	2.0	4	0	1.0		55	205			CJ	1.0					
15	AMC-107-2	23	4	245	75			C	S	2.0	4	0	1.0		75	245			CJ	1.0					

Locked Data Validation On Data: 218 Solutions: 0

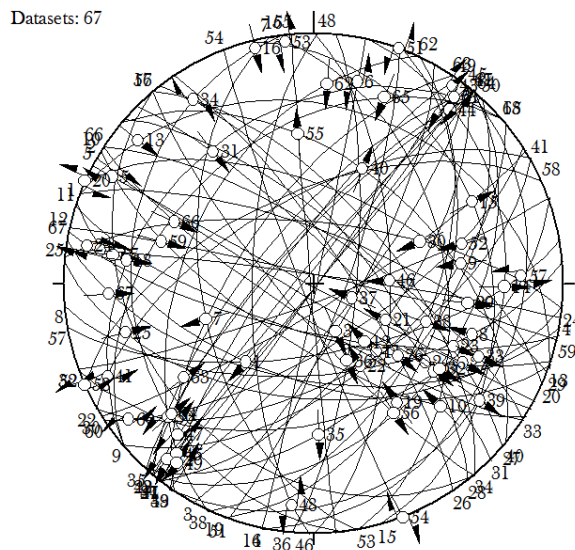
Fuente: FaultKin 4.0.

10.RESULTADOS

10. 1 Procesamiento de estrías de falla.

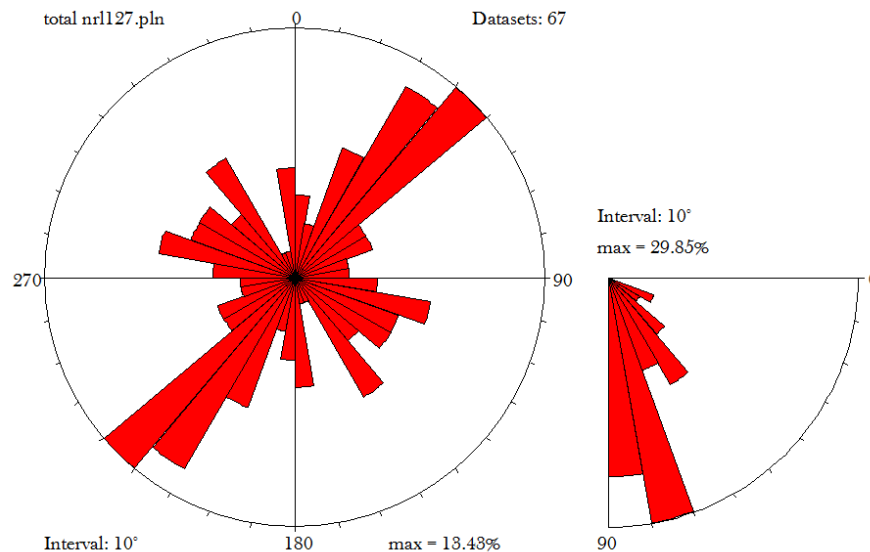
Con el procesamiento de la totalidad de los datos mediante el Software TectonicsFP v1.7.7, con el método NDA se intentó obtener una solución para el tensor de esfuerzos regional pero, la gran dispersión de los datos (Figuras 53, 54 y 55) imposibilita la obtención de una solución. Esta dispersión de los datos se puede explicar con la sobreimposición de varios eventos tectónicos que han afectado la región y que consecuentemente han dejado su marca en los datos de fallas medidos.

Figura 53. Visualización de 67 Planos de falla medidos en Diagrama de Angelier



Fuente: Autor mediante TectonicsFP.

Figura 54. Planos de falla. Se aprecia un predominio de los planos con orientación NE/SW y los buzamientos predominantes son de 70 a 90°



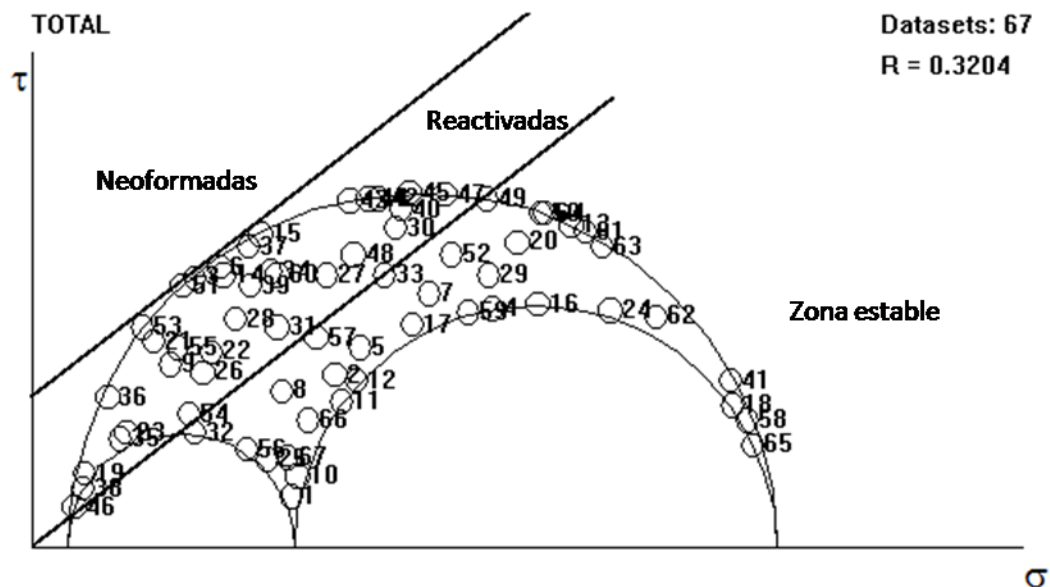
Fuente: Autor mediante TectonicsFP.

Para discriminar los datos y poder separar los correspondientes a un mismo régimen tectónico se utilizó el círculo de Mohr el cual permite separar de manera gráfica los datos de la población de fallas compatibles con un mismo tensor de esfuerzos.

En el círculo de Mohr (Figura 55) cada falla se representa con un círculo y un número que la identifica. Los datos que se encuentran entre la región limitada por la línea envolvente del círculo de Mohr y su paralela en el origen (cohesión 0) corresponden a las fallas que son compatibles (que se pueden explicar) con un mismo tensor de esfuerzos; estas fallas son las neoformadas y reactivadas. Por su parte los datos que se encuentran por fuera de la región limitada corresponden a fallas que son

incompatibles con el tensor de esfuerzos. Los datos se clasificaron en 34 fallas neoformadas y reactivadas, 32 son incompatibles.

Figura 55. Circulo de Mohr y datos de fallas representados en el. 34 datos compatibles y 32 incompatibles.

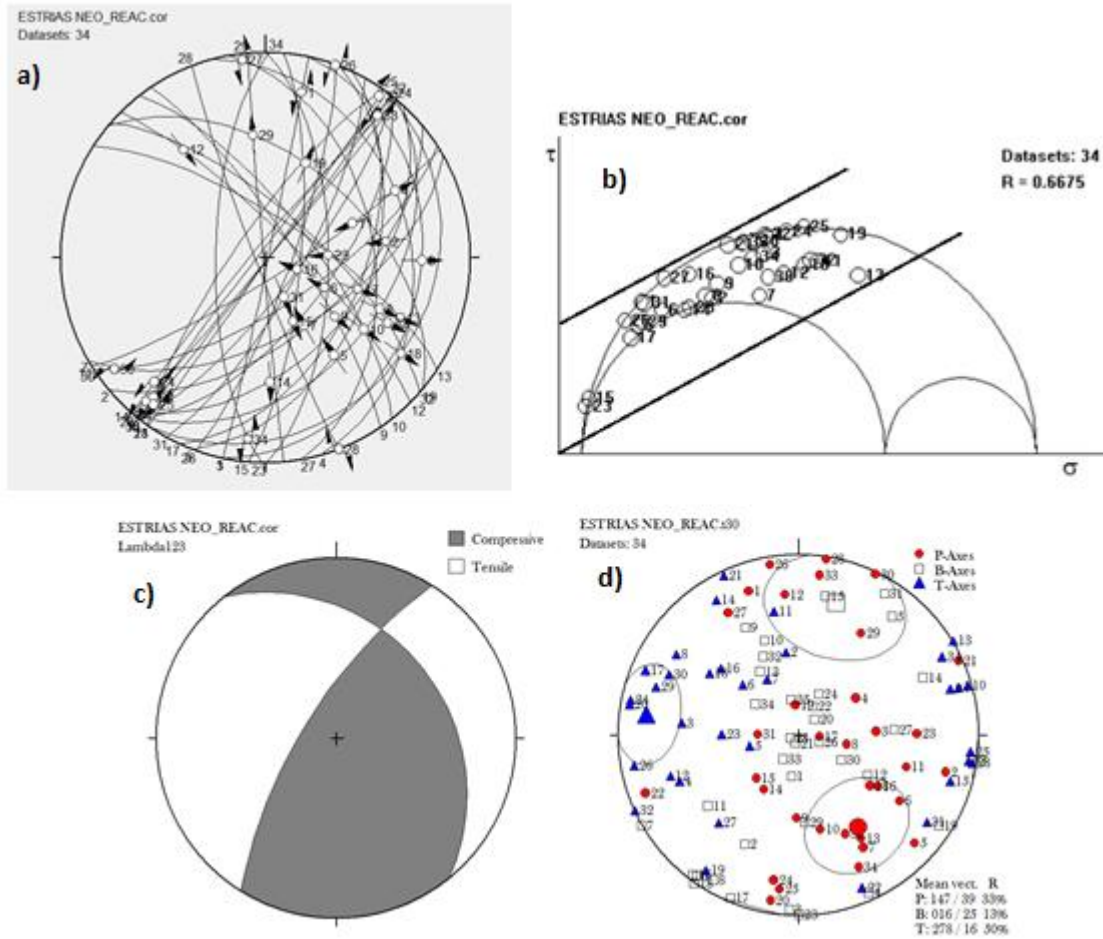


Fuente: El Autor mediante TectonicsFP.

10.1.1 Datos Neoformados y Reactivados

En la Figura 56 b y c, se observa que el balón de playa calculado por el método NDA refleja un régimen transtensivo y por el método PBT (Figura 56 d), se calculó la orientación de los vectores de máxima compresión P (147/39), esfuerzo medio B (016/25) y máxima tensión T (278/16). En el círculo de Mohr se observa que los datos son compatibles con un solo tensor de esfuerzos.

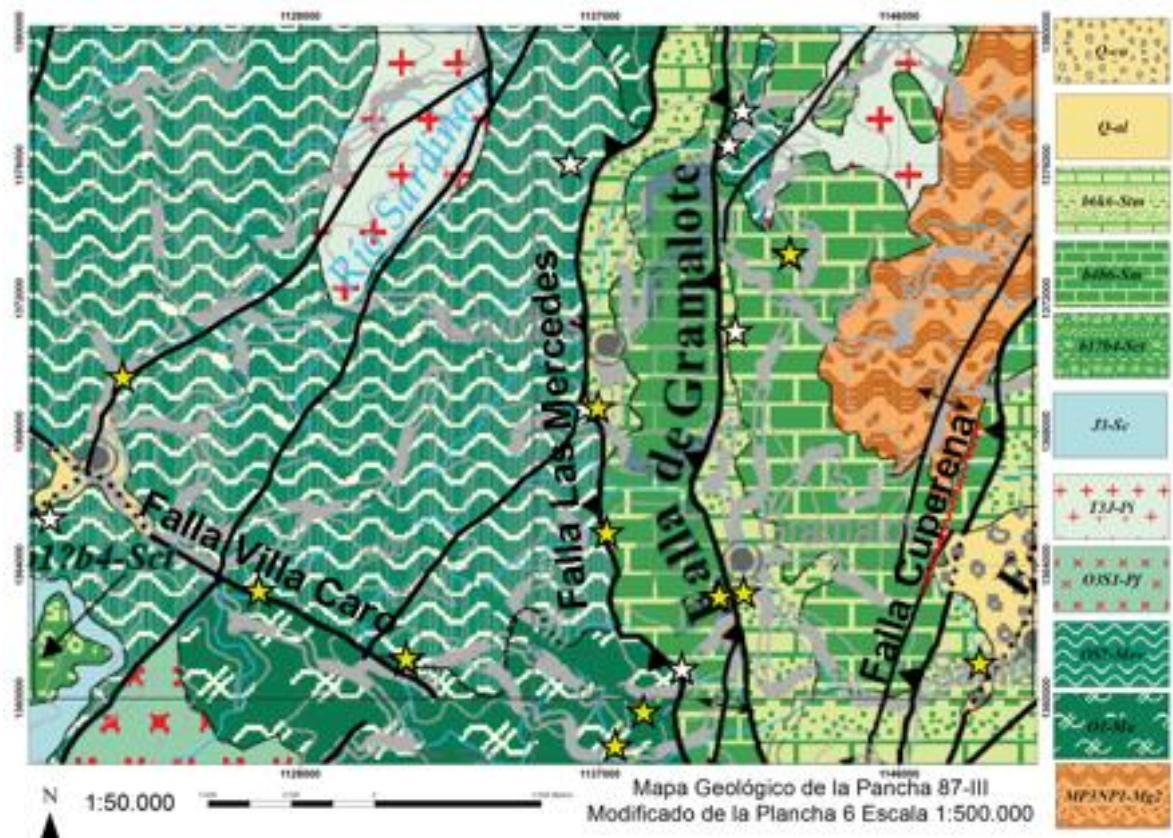
Figura 56. a) Diagrama de Angelier de los planos de falla Neo-formados y Reactivados, b) Círculo de Mohr, c) Balón de playa, d) Diagrama PBT



Fuente: El Autor mediante TectonicsFP.

Los datos utilizados se encuentran bien distribuidos en el área de estudio, legitimando la solución obtenida como válida para toda el área.

Figura 57. Localización de los planos de fallas estriados Neoformados y reactivados. Las estrellas amarillas representan las estaciones donde se midieron los planos de falla procesados.



Fuente: Modificado del Mapa Geológico de la Plancha 6, a escala 1:500.000 del Atlas Geológico de Colombia.

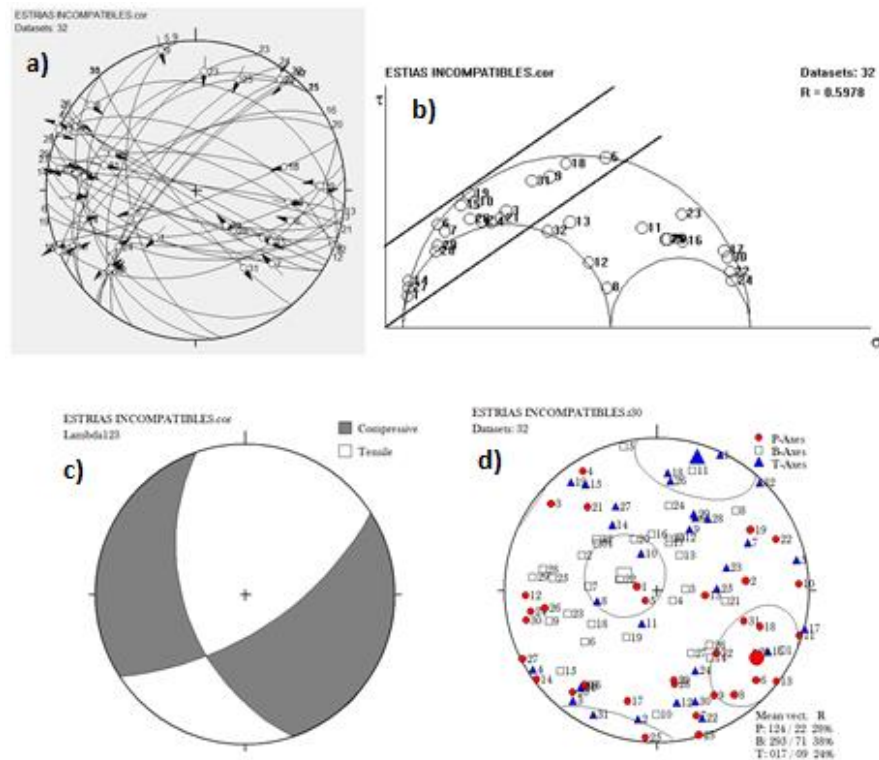
10.1.2 Datos Incompatibles

Por otro lado, los 32 datos incompatibles (en el dominio estable del Círculo de Mohr) se procesaron en conjunto para obtener otra solución al tensor de esfuerzos que probablemente se pueda relacionar a otro evento.

En el diagrama de Mohr se observa que los 32 datos incompatibles procesados están muy dispersos Figura 58 y que según su coherencia mecánica, se pueden dividir en dos subconjuntos más que se denominarán Incompatibles-Compatibles e Incompatibles-Incompatibles.

Los resultados obtenidos por los métodos NDA y PBT se muestran en las figuras 20a) y 20b) los cuales sugieren una orientación de 124/22 para el vector de máxima compresión P, 295/71 para el esfuerzo medio B y máxima tensión T 017/09.

Figura 58. Resultado del procesamiento de los 32 datos de planos de falla incompatibles. a) Diagrama de Angelier, b) Círculo de Mohr, c) Balón de playa, d) Diagrama PBT.

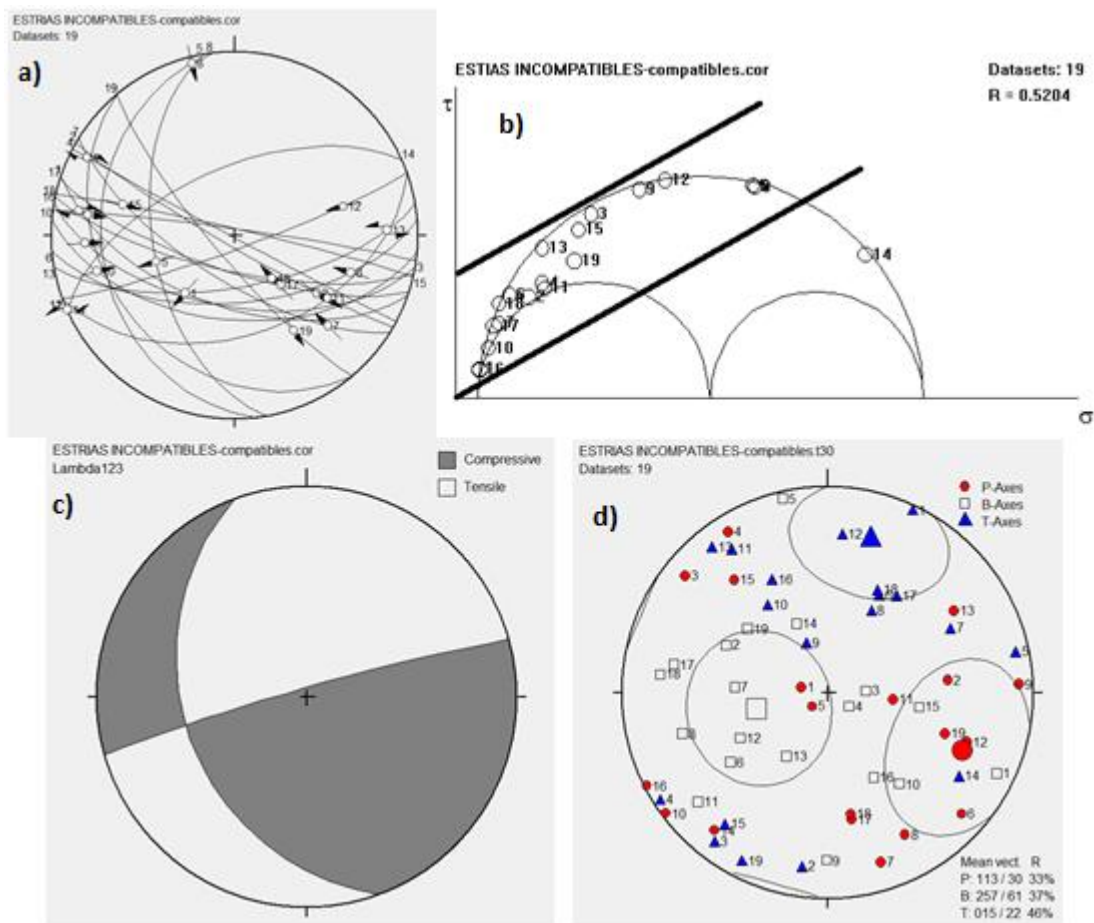


Fuente: El Autor mediante TectonicsFP.

10.1.3 Datos Incompatibles-Compatibles

El resultado del procesamiento a los datos incompatibles-compatibles (Figura 59) sugiere una orientación de 113/30 para P, 257/61 para B y 015/22 para T. Según el diagrama de Mohr hay una alta coherencia entre los datos.

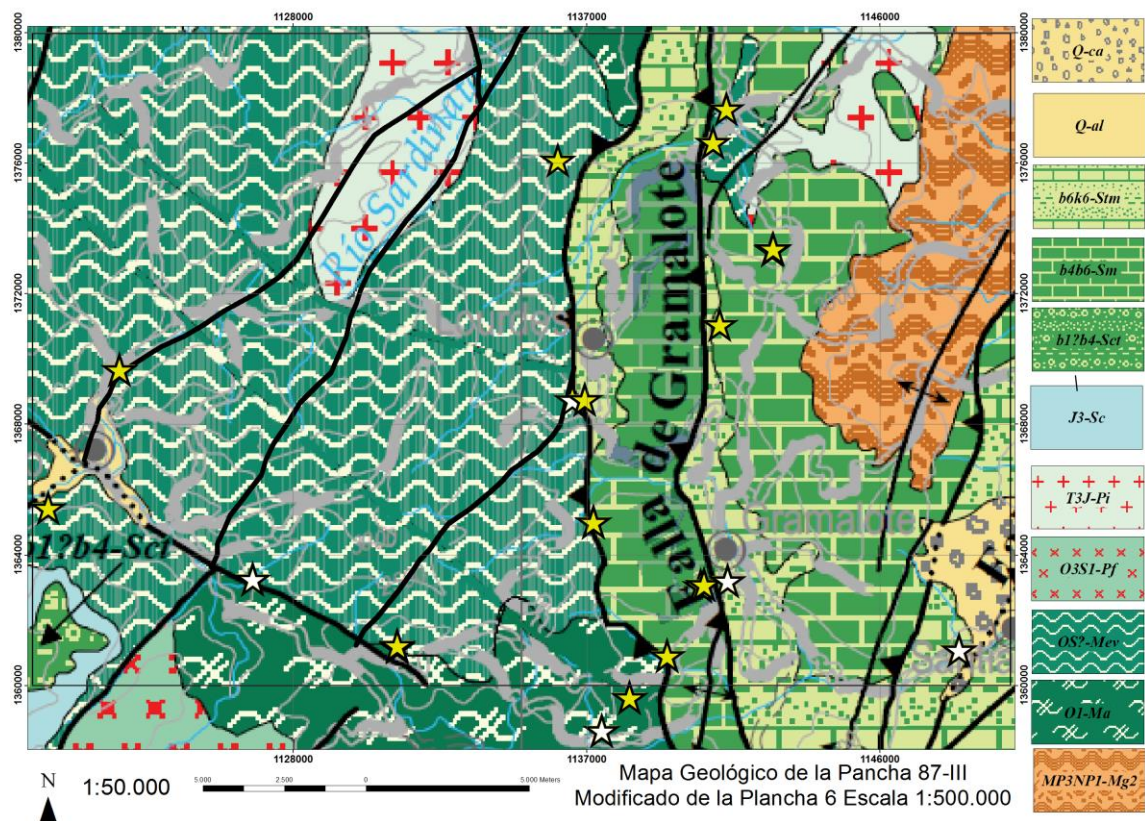
Figura 59. Resultado del procesamiento de los 19 datos incompatibles-compatibles
a) Diagrama de Angelier, b) Círculo de Mohr, c) Balón de playa, d) Diagrama PBT.



Fuente: El Autor a partir de TectonicsFP.

Al igual que los datos neoformados y reactivados, estos datos incompatibles-compatibles se localizan regularmente distribuidos en el área de trabajo.

Figura 60. Localización de los planos de falla incompatibles-compatibles (estrellas amarillas).

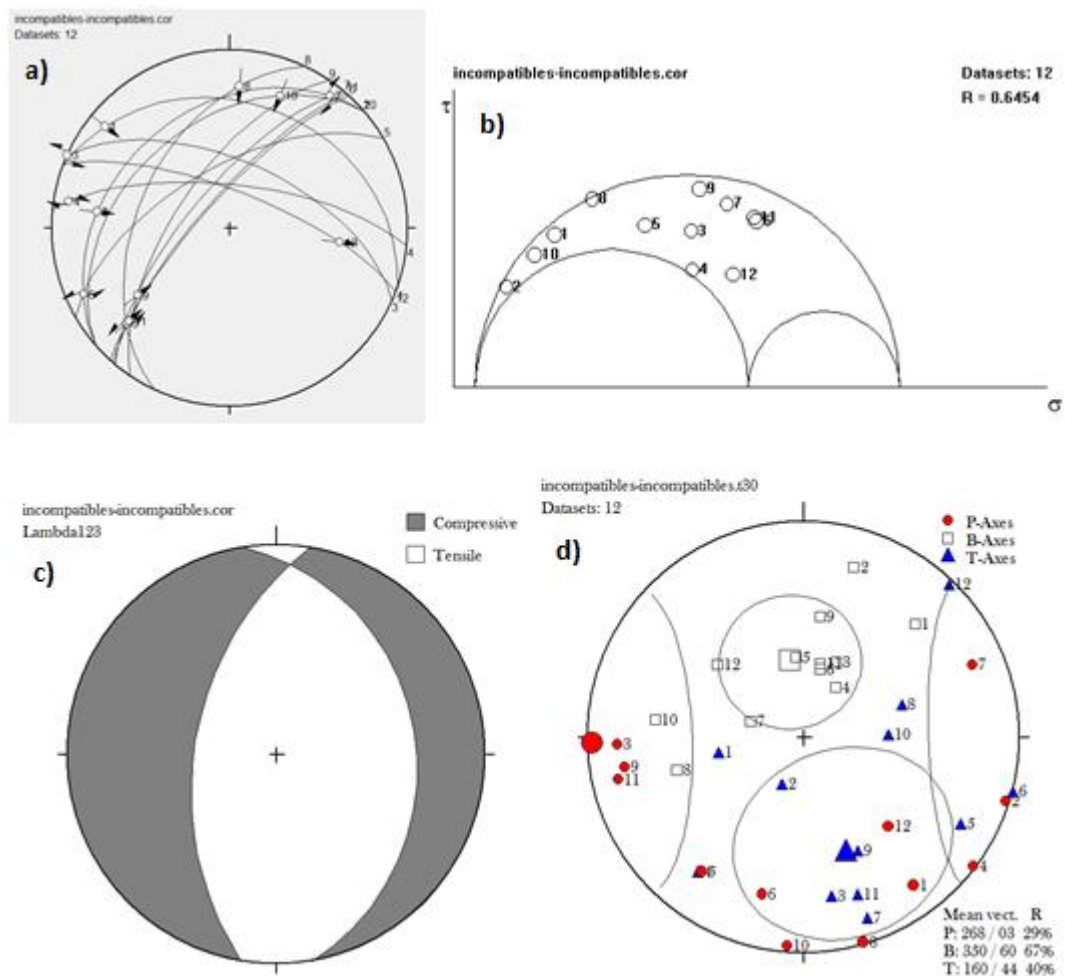


Fuente: Modificado del Mapa Geológico de la Plancha 6, a escala 1:500.000 del Atlas Geológico de Colombia.

10.1.4 Datos Incompatibles-Incompatibles

Los datos Incompatibles-Incompatibles sugieren una orientación de 268/03 para P, 350/60 para B y 160/44 para T. (Figura 61), El balón de playa refleja fallas inversas de rumbo N-S.

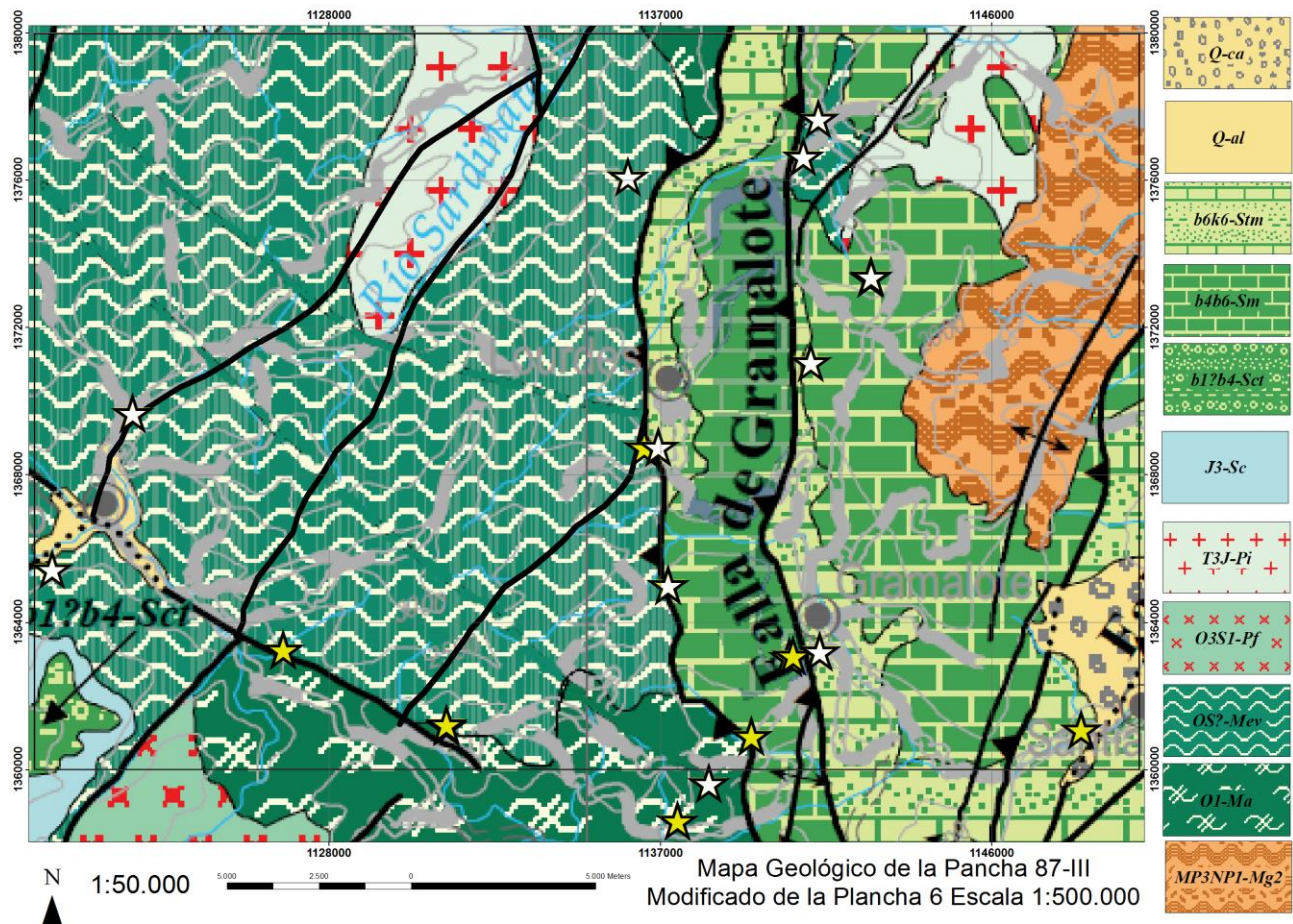
Figura 61. Resultado del análisis a los datos incompatibles-incompatibles a) Diagrama de Angelier, b) Círculo de Mohr, c) Balón de playa, d) Diagrama PBT.



Fuente: El Autor a partir de TectonicsFP.

La distribución geográfica de los planos analizados se observa en la Figura 62. Se observa que los datos se encuentran bien distribuidos, sin limitarse a alguna estructura o formación.

Figura 62. Distribución geográfica de los planos de fallas incompatibles-incompatibles.



Fuente: Modificado del Mapa Geológico de la Plancha 6, a escala 1:500.000 del Atlas Geológico de Colombia.

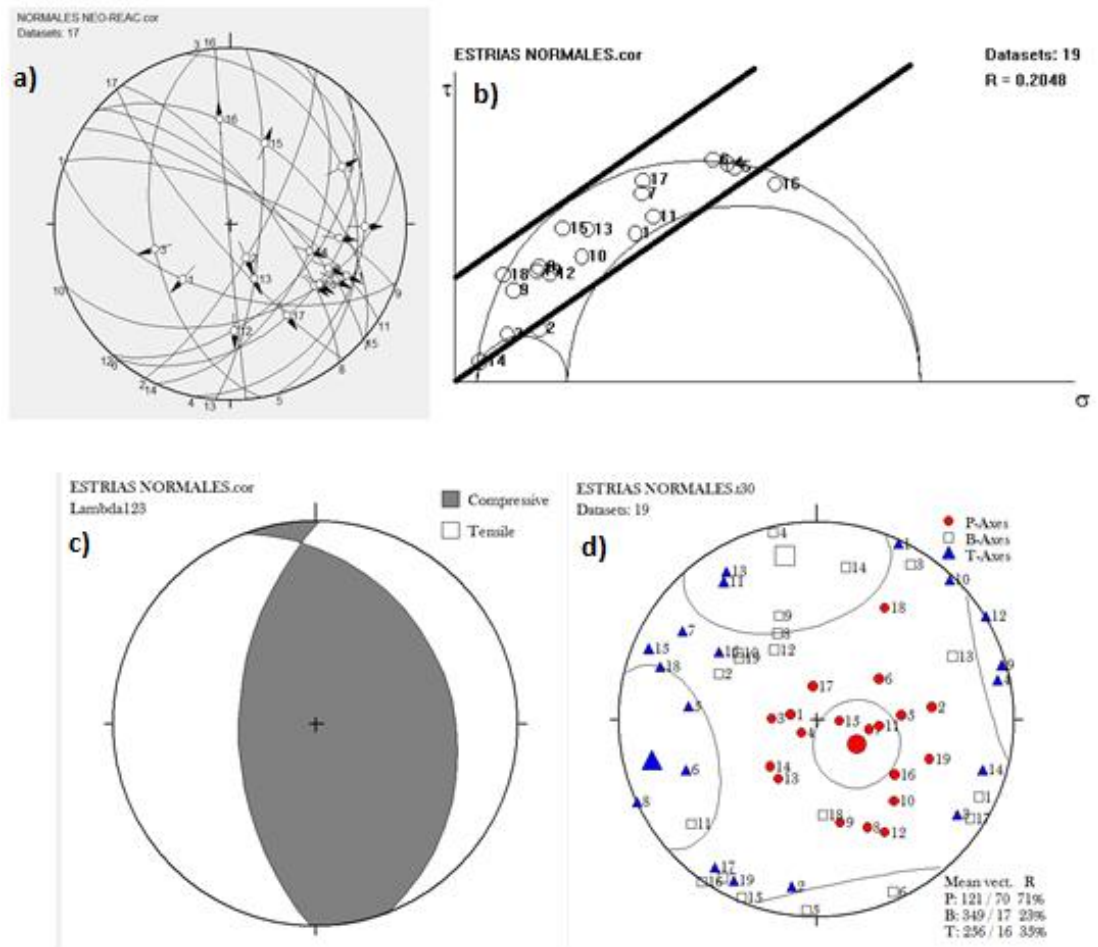
10.2 Procesamiento por tipo de falla.

Los datos de estrías se agruparon según su tipo (normales, inversas o de rumbo) y se procesaron con el fin de obtener soluciones alternativas al tensor de esfuerzos que se pudieran comparar o contrastar entre sí.

10.2.1 Fallas normales

El balón de playa indica una tendencia N-S de las fallas. (Figura 63c) y una orientación de 121/70 para P, 349/17 para B y 256/16 para T. (Figura 63d)).

Figura 63. Resultado del procesamiento a los datos de fallas normales a) Diagrama de Angelier, b) Círculo de Mohr, indica una buena correlación de las 19 fallas normales medidas; presentándose casi en su totalidad en el campo de reactivadas. c) Balón de playa, d) Diagrama PBT.

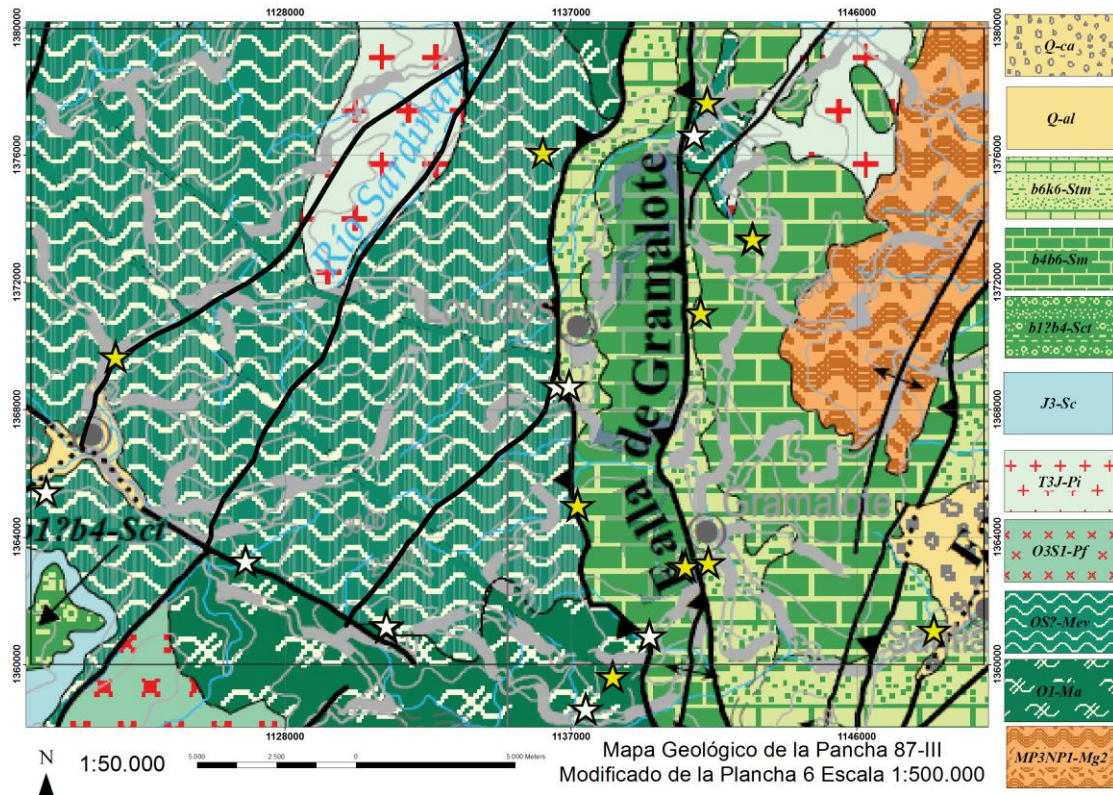


Fuente: El Autor a partir de TectonicsFP.

La distribución de los datos (Figura 64) evidencia que en solo una estación, un solo dato; entre todos los medidos fue utilizado en este procesamiento, debido a que fue el único que cumplió la condición impuesta.

Figura 64. Distribución geográfica de los datos de fallas normales. Con estrellas amarillas se resaltan las estaciones donde se midieron los datos utilizados en el

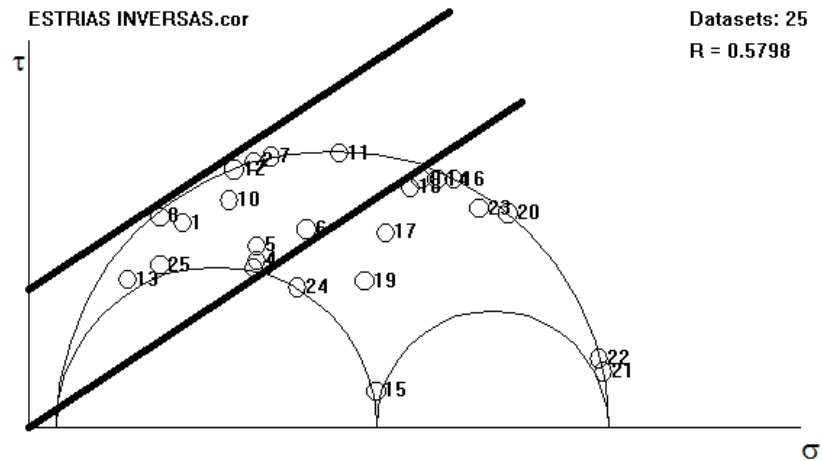
procesamiento. En estrellas blancas se visualizan otras estaciones con planos estriados que no se utilizaron para el análisis.



Fuente: Modificado del Mapa Geológico de la Plancha 6, a escala 1:500.000 del Atlas Geológico de Colombia.

10.2.2 Fallas inversas

Figura 65. De los 25 planos de falla medidos 13 se encuentran en el campo de neoformadas y reactivadas.

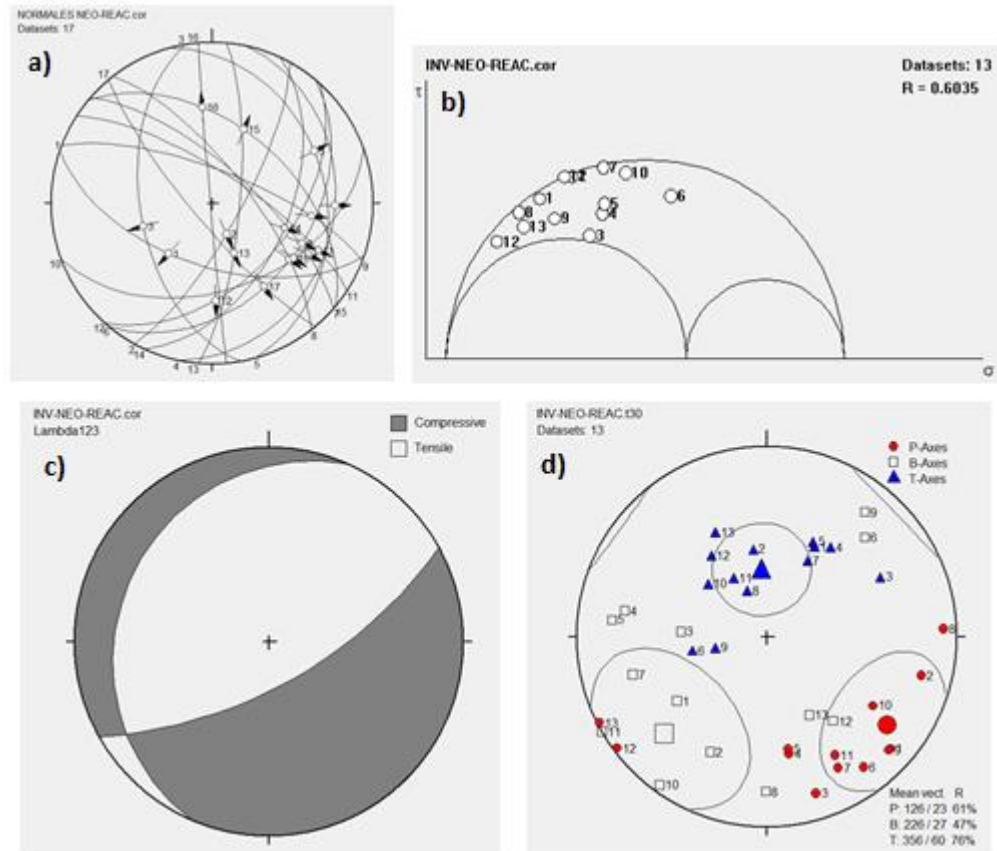


Fuente: El Autor a partir de TectonicsFP.

10.2.3 Fallas inversas neoformadas y reactivadas

El procesamiento del subconjunto de fallas inversas neoformadas y reactivadas sugiere un tensor de esfuerzos con orientación de 121/70 para P, 349/17 para B y 256/16 para T. (Figura 66)

Figura 66. Resultado del procesamiento del subconjunto de fallas inversas-neoformadas y reactivadas. a) Diagrama de Angelier, b) Círculo de Mohr c) Balón de playa, d) Diagrama PBT.

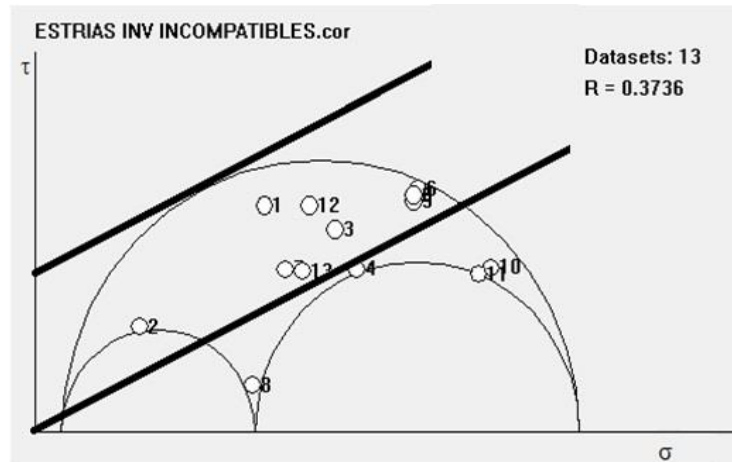


Fuente: El Autor a partir de TectonicsFP.

10.2.4 Fallas inversas “incompatibles”

Se utilizaron para el procesamiento 13 datos.

Figura 67. Círculo de Mohr del subconjunto de fallas inversas incompatibles. Se observa que los datos están muy dispersos.



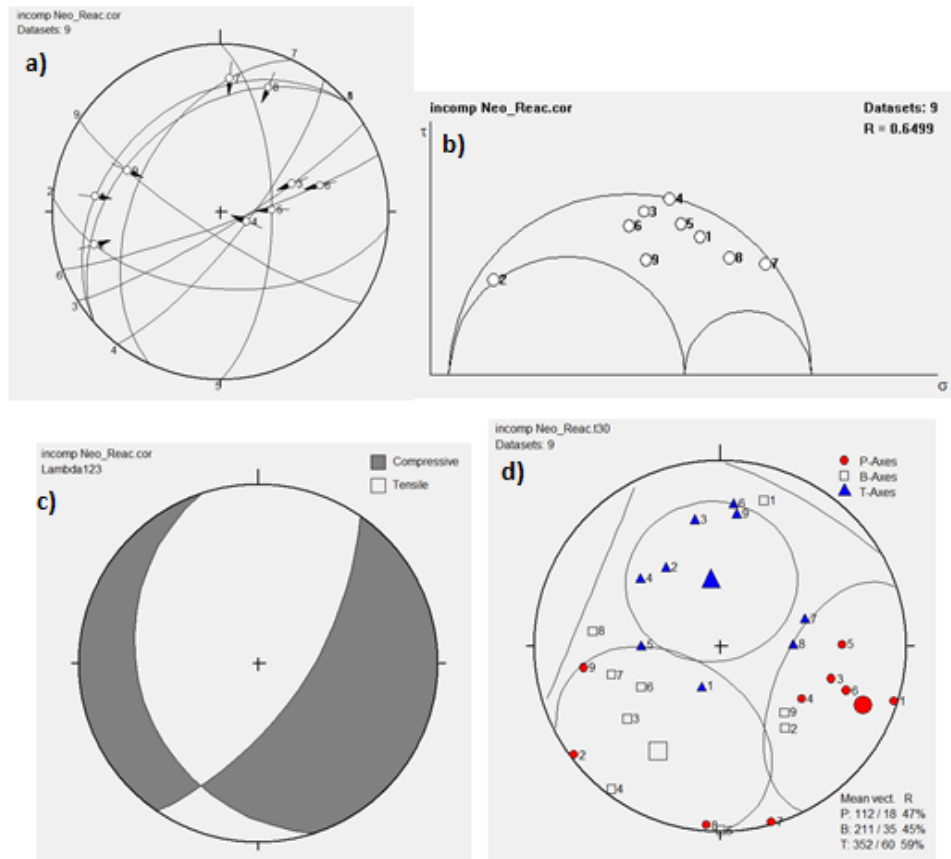
Fuente: El Autor a partir de TectonicsFP.

Los datos de fallas inversas incompatibles están muy dispersos razón por la cual se subdividieron de nuevo:

10.2.5 Fallas inversas incompatibles-compatibles

El resultado del procesamiento de los nueve datos de planos de falla inversos se observa en la Figura 68.

Figura 68 a) Diagrama de Angelier, b) Círculo de Mohr, c) Balón de playa, d) Diagrama PBT; para el subconjunto Fallas inversas incompatibles-compatibles,

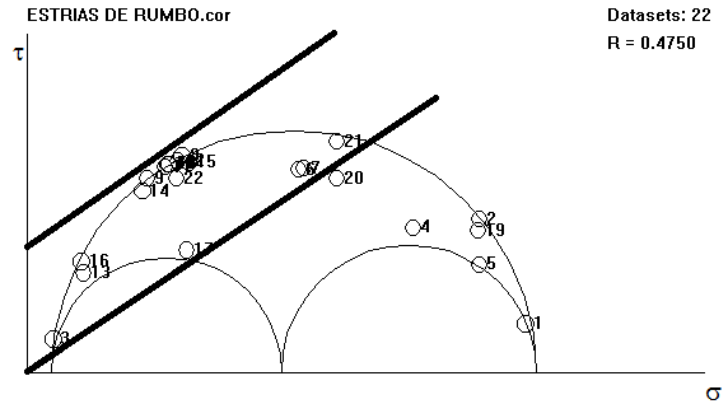


Fuente: El Autor a partir de TectonicsFP.

10.2.6 Fallas de rumbo

Las 22 fallas de rumbo medidas se dividieron en 2 subconjuntos (Figura 69), basados en el círculo de Mohr.

Figura 69. Fallas de rumbo en el círculo de Mohr. Cinco datos son incompatibles.

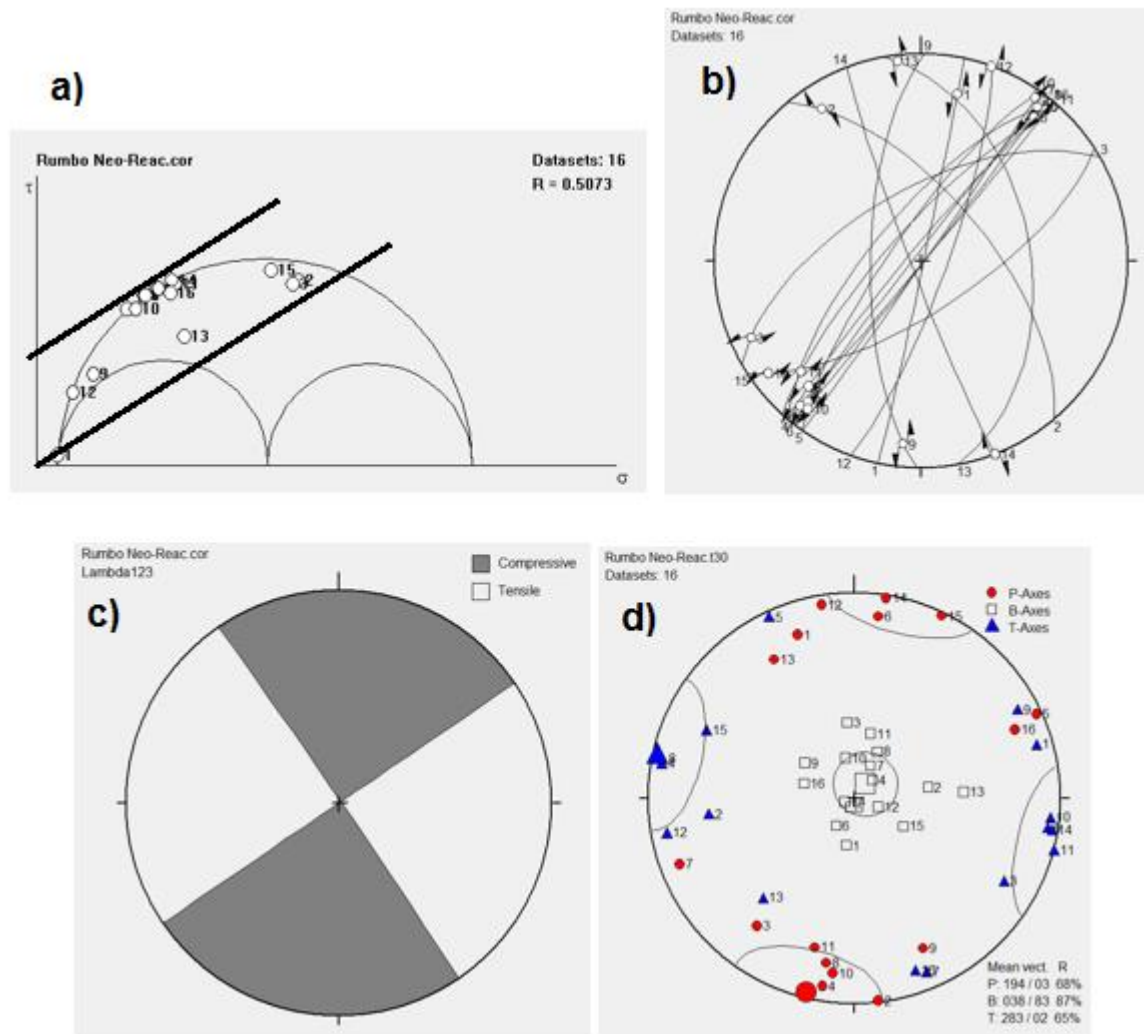


Fuente: El Autor a partir de TectonicsFP.

10.2.7 Fallas de rumbo neoformadas y reactivadas.

Se obtiene una alta coherencia mecánica entre los datos, compresión N-S y extensión E-W. (Figura 70)

Figura 70. Resultado del procesamiento de las fallas de rumbo neoformadas-reactivadas. a) Círculo de Mohr, b) Diagrama de Angelier c) balón de playa para el sub-subconjunto fallas de rumbo neoformadas y reactivadas, d) diagrama PBT.

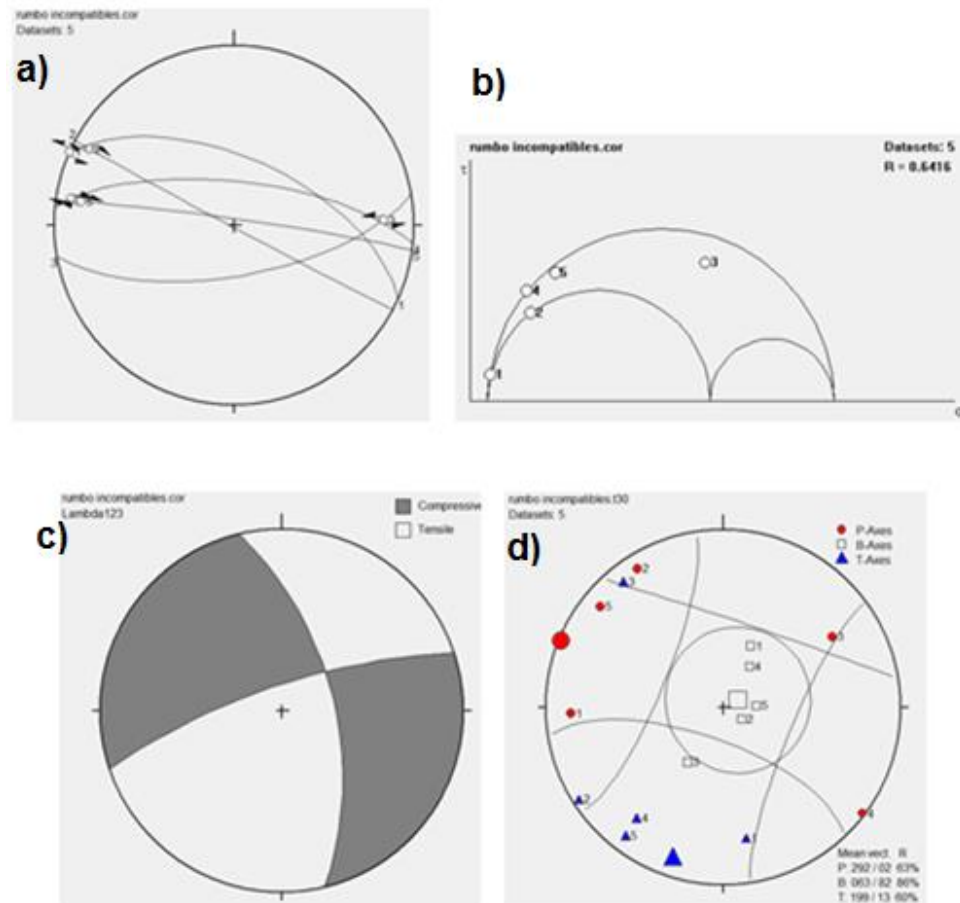


Fuente: El Autor a partir de TectonicsFP.

10.2.8 Fallas de rumbo incompatibles.

5 datos fueron utilizados para el análisis.

Figura 71. Resultado del análisis de las fallas de rumbo incompatibles. a) diagrama de Angelier b) Círculo de Mohr, c) balón de playa para el sub-subconjunto fallas de rumbo neoformadas y reactivadas, d) diagrama PBT.

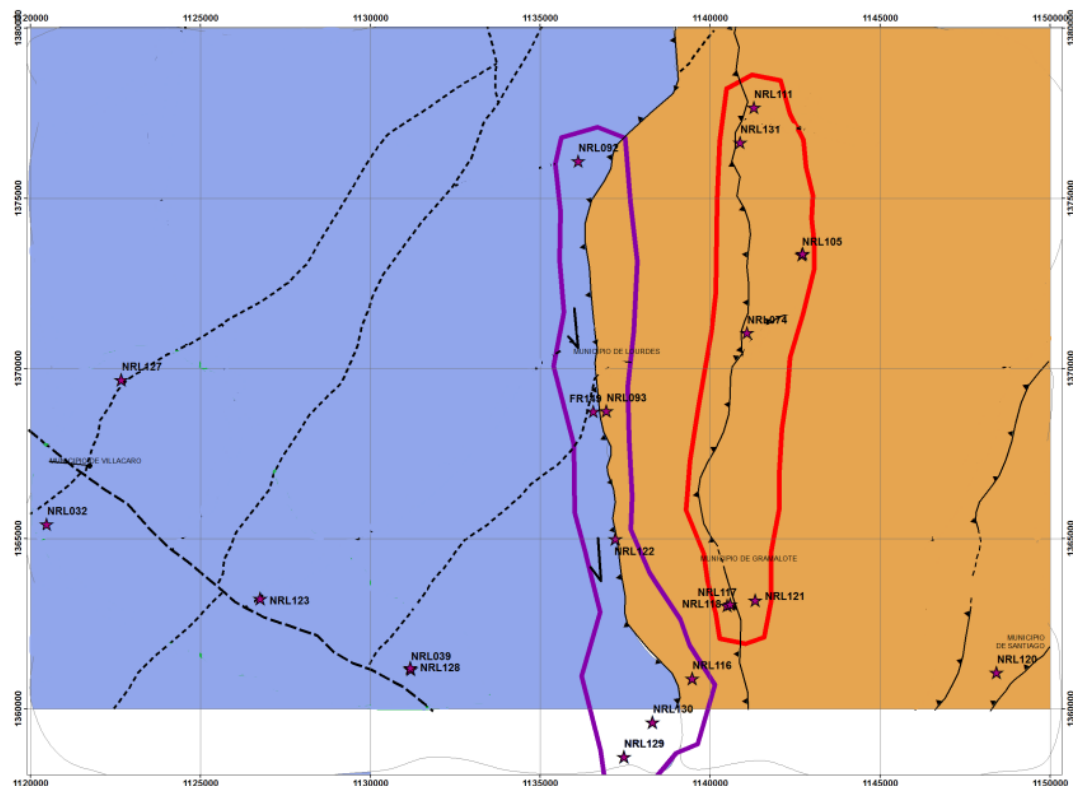


Fuente: El Autor a partir de TectonicsFP.

10.3 Procesamiento por estructura.

Los datos se agruparon según su relación geográfica con alguna región o estructura. Se procesaron los datos asociados a la traza (corredor) de la falla Las Mercedes, la falla Gramalote y por región, se dividieron los datos en bloque colgante y yacente de la falla Las Mercedes.

Figura 72. Asociación de datos por estructura. Los datos en la región celeste corresponden al bloque colgante de la falla Las Mercedes y en la región naranja al bloque yacente. En la región delimitada por la línea morada se encuentran los datos asociados al corredor de la falla Las Mercedes, en la región delimitada con color rojo, se encuentran los datos asociados a la falla Gramalote.

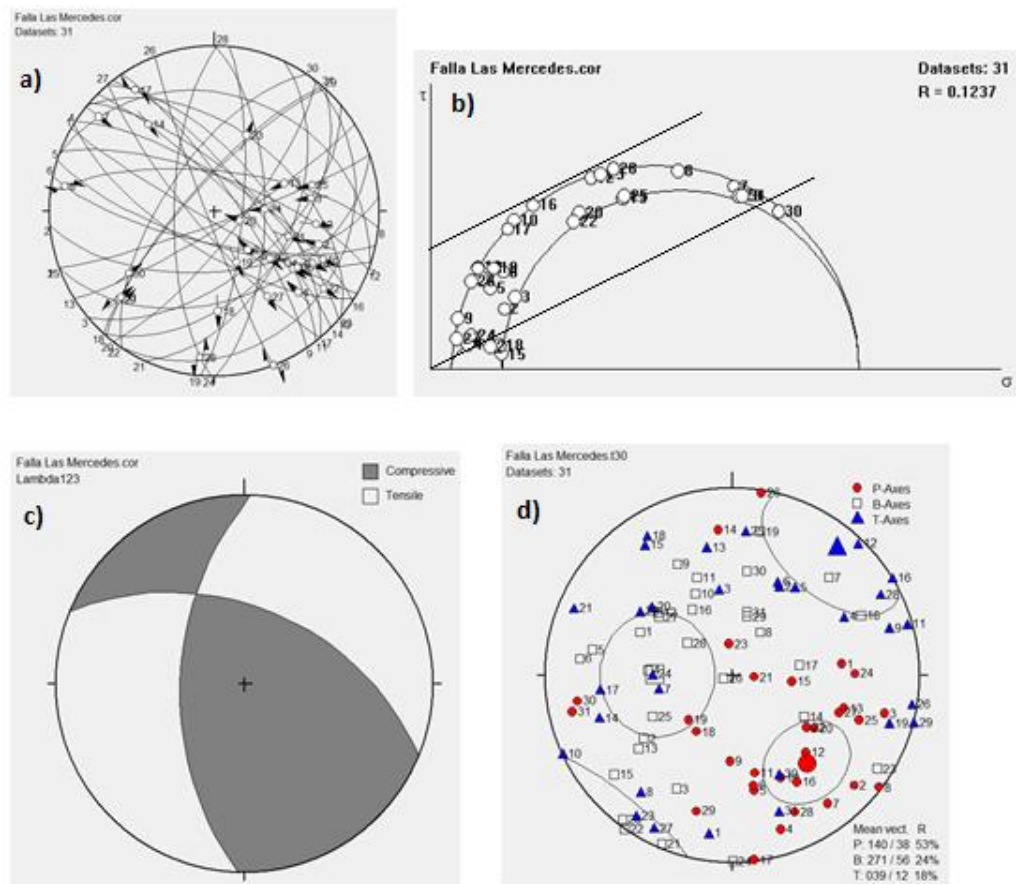


Fuente: El Autor.

10.3.1 Corredor falla Las Mercedes

A lo largo de la traza de la falla las mercedes, en 7 estaciones, se midieron 31 planos de falla estriados. Los resultados del procesamiento se muestran en la Figura 73.

Figura 73. Procesamiento de los planos estriados a lo largo del corredor de la falla Las Mercedes. a) Diagrama de Angelier, b) Círculo de Mohr, se observa gran compatibilidad entre los datos c) Balón de playa (método NDA), d) Diagrama PBT.



Fuente: El Autor mediante TectonicsFP.

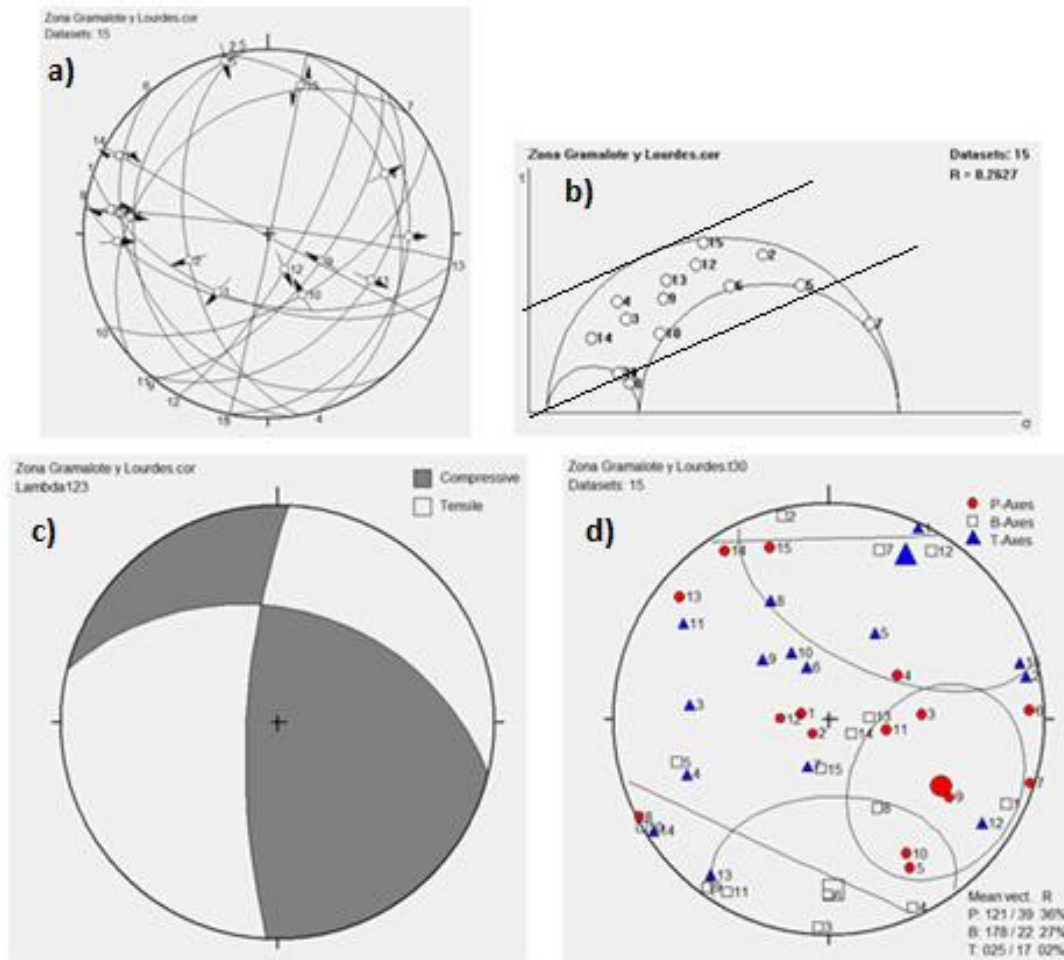
Se obtuvo una solución al tensor de esfuerzos que sugiere un régimen transpresivo (Figura 73 b) y c)) con una orientación de 140/38 para P, 271/56 para B y 039/12 para T (Figura 73 d)) El balón de playa (Figura 73 c)) refleja bien la tendencia N-S de la falla y su buzamiento al oeste. Este campo de esfuerzos la falla Las Mercedes sugiere un movimiento oblicuo de componente inversa-sinistral.

10.3.2 Corredor falla Gramalote

En 7 estaciones se midieron 15 planos de falla estriados a lo largo de la falla gramalote. Los resultados del procesamiento se visualizan en la Figura 74. Se obtuvo un régimen transpresivo con dirección de máxima compresión P 121/39, eje medio B 178/22 y máxima tensión T 025/17. El balón de playa refleja el rumbo N-S de la falla y su buzamiento al oeste. Los resultados son similares a los obtenidos para el corredor de la falla Las Mercedes.

La solución obtenida para el tensor de esfuerzos sugiere un movimiento inverso con componente sinistral.

Figura 74. Procesamiento de los datos asociados al corredor de la falla Gramalote. a) Diagrama de Angelier, b) Círculo de Mohr sugiriendo un régimen transpresivo, también se observa que la gran mayoría de datos son compatibles mecánicamente entre sí. c) Balón de playa calculado por el método NDA, se observa la orientación N-S del plano principal. d) Diagrama PBT.



Fuente: El Autor mediante TectonicsFP.

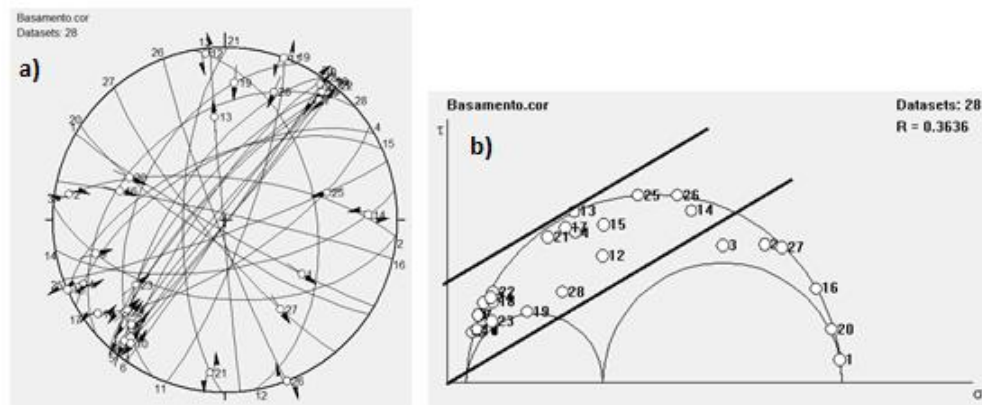
10.3.3 Bloque colgante de la falla Las Mercedes (Macizo de Santander)

Para el procesamiento se utilizaron 28 datos de planos de falla estriados, medidos en 9 estaciones, en rocas pertenecientes a las Formaciones Ortoneis y Silgará.

Utilizando el Círculo de Mohr, como criterio de compatibilidad mecánica, se pudo dividir los datos en 22 neoformados-reactivados y 6 incompatibles. (Figura 75).

El procesamiento de los datos neoformados-reactivados (Figura 76) indica un régimen transcurrente bajo el cual probablemente se formaron las fallas cartografiadas, obsérvese que la mayor parte de los datos en el círculo de Mohr se aproximan a la envolvente del círculo de Mohr (fallas neoformadas).

Figura 75. Datos de planos de falla estriados en el bloque colgante de la falla Las Mercedes. a) Diagrama de Angelier, b) Círculo de Mohr clasificando los datos en neoformados-reactivados e incompatibles.

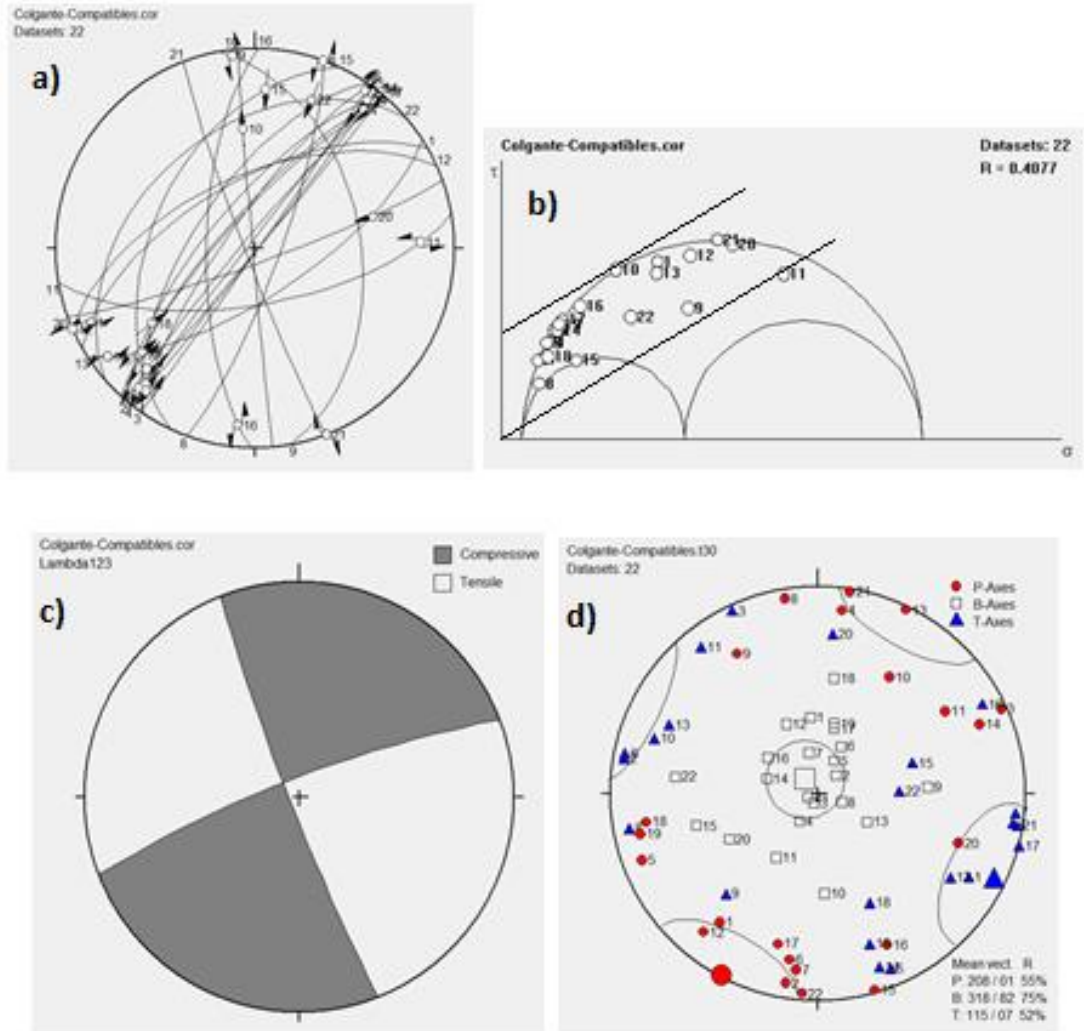


Fuente: El Autor mediante TectonicsFP.

El balón de playa (Figura 76 c)) refleja parcialmente el patrón de fallamiento en dirección NW-SE y NE-SW.

Figura 76. Resultado del procesamiento de los planos estriados en el bloque colgante de la falla Las Mercedes. a) Diagrama de Angelier, b) Círculo de Mohr

sugiriendo un régimen transcurrente, también se observa que la gran mayoría de datos son compatibles mecánicamente entre sí. c) Balón de playa calculado por el método NDA, d) Diagrama PBT.

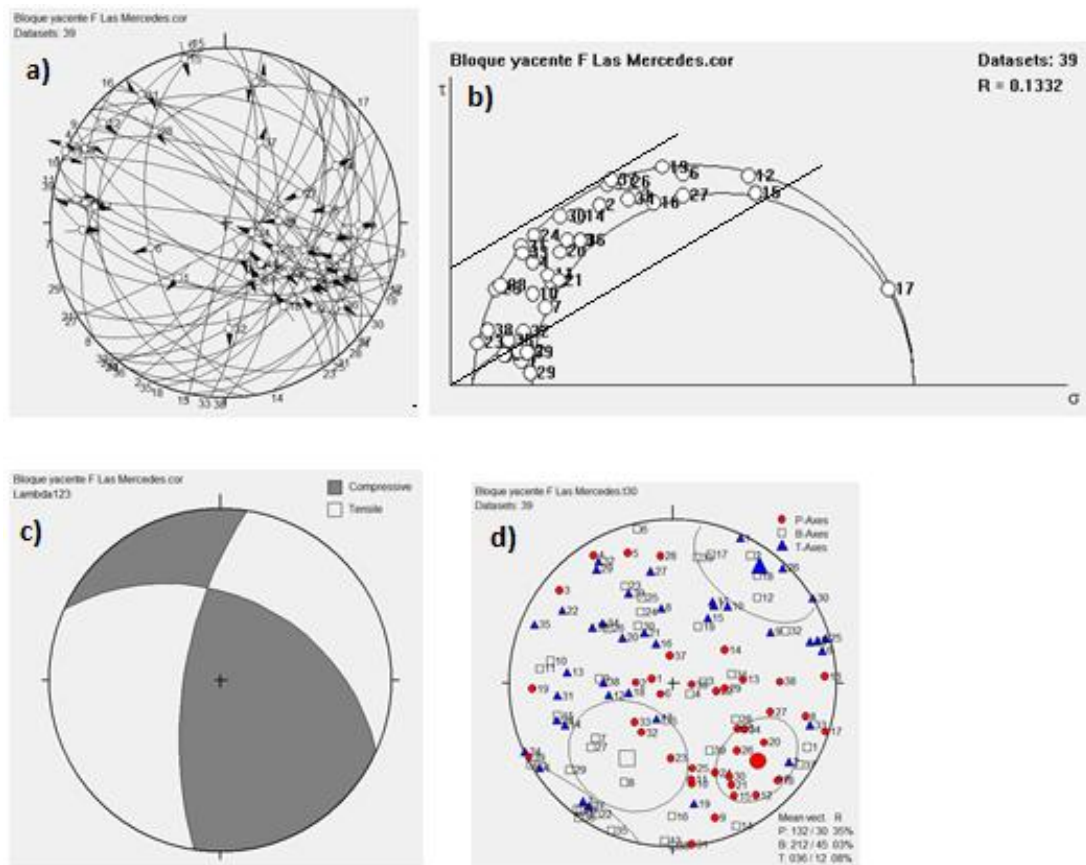


Fuente: El Autor mediante TectonicsFP.

10.3.4 Bloque yacente de la falla Las Mercedes

Para el procesamiento se utilizaron 39 datos de planos de falla estriados, en las Formaciones Capacho, La luna y el Grupo Uribante. En el círculo de Mohr se observa que los datos tienen gran coherencia mecánica entre sí, siendo la gran mayoría explicados por el tensor con dirección de máxima compresión P 132/30, B 212/45 y máxima extensión T 036/12, bajo un régimen transpresivo. (Figura 77)

Figura 77. Resultado del procesamiento de datos del bloque yacente de la falla Las Mercedes. . a) Diagrama de Angelier, b) Círculo de Mohr, se observa gran compatibilidad entre los datos c) Balón de playa (método NDA), d) Diagrama PBT.



Fuente: El Autor mediante TectonicsFP.

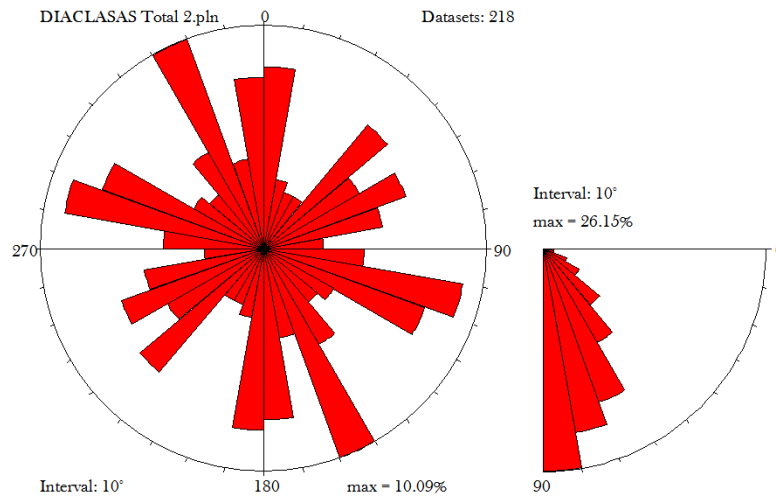
10.4 Procesamiento de diaclasas.

Se compilaron los datos de diaclasas medidas y elaboró una base de datos que se presenta en el Anexo C. En la Figura 78 se aprecia un predominio de las diaclasas con orientación NNW-SSE.

Las *diaclasas* se procesaron con el software WinTensor, para el procesamiento se debió asumir su origen por compresión, esto se justifica debido al contexto tectónico de la región. En la Figura 78 se observa una orientación de (10/309) para σ_1 . (Ó 10/129)

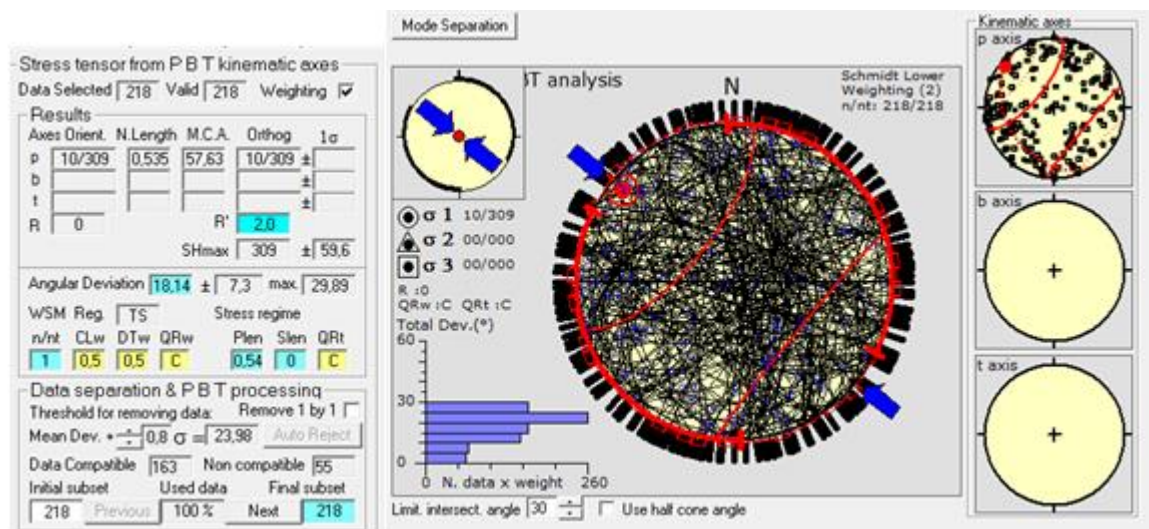
Al procesar todos datos de diaclasas por el método PBT se obtiene una solución estadísticamente válida. Esto se aprecia en Figura 79 donde se resalta con color amarillo y celeste los parámetros estadísticos buenos y aceptables. De haber una incompatibilidad entre los datos, estos parámetros se resaltarían en color naranja o rojo señalando que la respuesta obtenida es estadísticamente imprecisa.

Figura 78. Diagrama de rosa de los datos de diaclasas. Aunque bastante dispersos, predominan los planos con rumbo NNW-SSE y los buzamientos entre 70-90°



Fuente: El Autor a partir de TectonicsFP.

Figura 79. Resultado del análisis PBT para los datos de diaclasas. Orientación de σ_1 10/309 (plunge/trend). En la parte izquierda se visualizan los parámetros estadísticos obtenidos por WinTensor al calcular la orientación del eje de máxima presión P (σ_1).



Fuente: El Autor a partir de WinTensor.

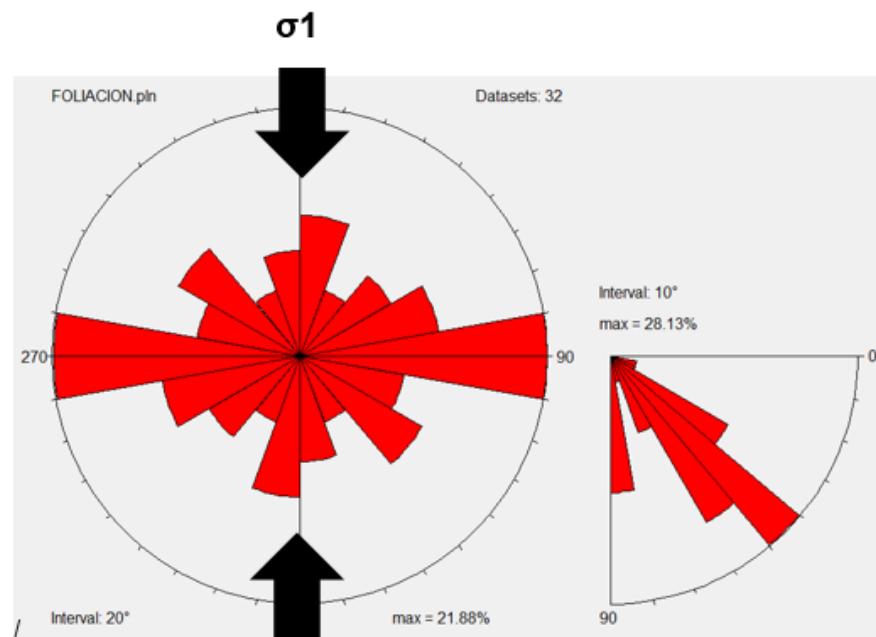
10.5 Datos de Foliación

Como se vio en el marco teórico, la foliación puede ser utilizada para determinar el estado de esfuerzos al momento del metamorfismo; teniendo en cuenta que la foliación se forma perpendicular a σ_1 y paralelo a σ_3 .

En la zona de estudio se midieron 32 datos de foliación de las rocas metamórficas de las Formaciones Silgara y Neis de Bucaramanga, los datos se visualizan en la Figura 80.

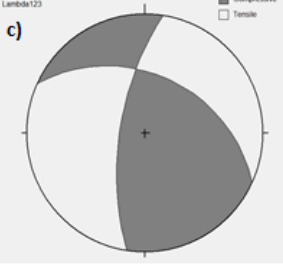
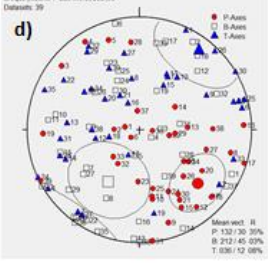
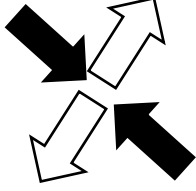
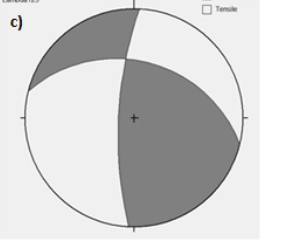
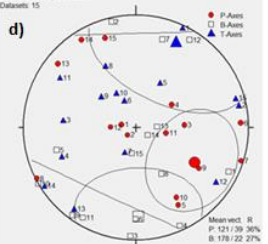
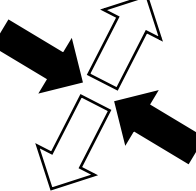
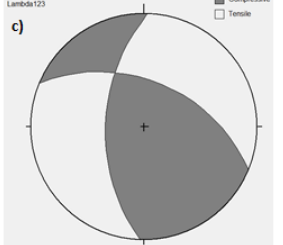
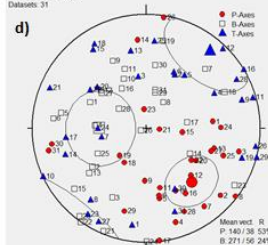
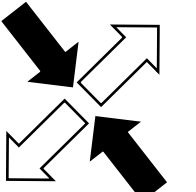
La mayoría de los datos presentan un rumbo E-W y un buzamiento alrededor de los 45° .

Figura 80. Diagrama de rosa de los datos de foliación mediante TectonicsFP.



Fuente: El Autor mediante TectonicsFP.

Tabla 2. Síntesis de los resultados del análisis de los indicadores cinemáticos.

Balón de playa	Diagrama PBT	Ejes de esfuerzo, en negro máxima compresión, en blanco máxima extensión.	Conjunto de datos
Bloque yacente F Las Mercedes cor Lambda 123 c) 	Bloque yacente F Las Mercedes C00 Dataseit: 39 	P132/30 T036/12 	Bloque yacente de la falla Las Mercedes
Zona Gramalote y Lourdes cor Lambda 123 c) 	Zona Gramalote y Lourdes C00 Dataseit: 15 	P121/39 T025/17 	Corredor falla de Gramalote
Falla Las Mercedes cor Lambda 123 c) 	Falla Las Mercedes C00 Dataseit: 31 	P140/38 T039/12 	Corredor falla Las Mercedes

Balón de playa	Diagrama PBT	Ejes de esfuerzo, en negro máxima compresión, en blanco máxima extensión.	Conjunto de datos
ESTRIAS NEO_REAC.cor Lambda123	ESTRIAS NEO_REAC.00 Datos: 34 Mean vect. R P: 147 / 39 33% B: 056 / 23 19% T: 273 / 16 50%	P147/39	Fallas neoformadas- reactivadas
ESTRIAS INCOMPATIBLES-compatibles.cor Lambda123 c)	ESTRIAS INCOMPATIBLES-compatibles.00 Datos: 19 Mean vect. R P: 113 / 30 32% B: 257 / 61 37% T: 015 / 22 40%	P113/30 T015/22	Fallas incompatibles- compatibles
incompatibles-incompatibles.cor Lambda123 c)	incompatibles-incompatibles.00 Datos: 12 Mean vect. R P: 268 / 03 29% B: 309 / 60 65% T: 160 / 44 40%	P268/03	Fallas incompatible- incompatibles
ESTRIAS INCOMPATIBLES.cor Lambda123 c)	ESTRIAS INCOMPATIBLES.00 Datos: 32 Mean vect. R P: 124 / 22 20% B: 265 / 11 30% T: 017 / 09 24%	P124/22 T017/09	Fallas incompatibles

Balón de playa	Diagrama PBT	Ejes de esfuerzo, en negro máxima compresión, en blanco máxima extensión.	Conjunto de datos
INV-NEO-REAC.cor Lambd=123 c)	INV-NEO-REAC.D0 Datos=13 d)	P 126/23 	Fallas inversas neoformadas-reactivadas
incmp-Neo-Reac.cor Lambd=123 c)	incmp-Neo-Reac.D0 Datos=9 d)	P 102/10 	Fallas inversas incompatibles
ESTRIAS NORMALES.cor Lambd=123 c)	ESTRIAS NORMALES.D0 Datos=19 d)	P121/70 T256/16 	Fallas normales
Rumbo-Neo-Reac.cor Lambd=123 c)	Rumbo-Neo-Reac.D0 Datos=16 d)	P194/03 T283/02 	Fallas de rumbo neoformadas y reactivadas

Balón de playa	Diagrama PBT	Ejes de esfuerzo, en negro máxima compresión, en blanco máxima extensión.	Conjunto de datos
		P292/02 T199/13	Fallas de rumbo incompatibles
c)	d)	P208/01 T115/07	Bloque colgante falla Las Mercedes
	T analysis	P129/10	Datos de diaclasas
		P 0°	Datos de Foliación

11. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El procesamiento de la totalidad de los planos de falla estriados, permitió establecer 3 subconjuntos de datos basados en su coherencia mecánica, la cual se estableció mediante el círculo de Mohr. Los datos se georeferenciaron y se evidenció que se encuentran uniformemente distribuidos en toda el área de estudio (Figuras 57, 59 y 62) lo cual permite inferir que las soluciones halladas son representativas para toda el área y no se limitan exclusivamente a una unidad geológica o a una estructura. Estas tres soluciones al tensor de esfuerzo indican una variación del vector de máxima compresión P, el cual ha rotado en sentido de las manecillas del reloj, desde una orientación; en un principio E-W a una orientación NW-SE concordante con lo obtenido en los estudio de Vargas *et al.* (2002).

Como consecuencia de la rotación del campo de esfuerzos, la falla Villa Caro, bajo el tensor de esfuerzos con máxima compresión en dirección E-W (tensor hallado con las fallas incompatibles-incompatibles), debió presentar un movimiento sinistral, este movimiento estaría evidenciado en el desplazamiento registrado en la cartografía geológica (Figura 22) de la Plancha 86, donde se registra un contacto fallado y desplazado entre las Formaciones Silgará y Girón. Al rotar el vector de máxima compresión hasta la dirección 147° (tensor hallado con falla neoformadas y reactivadas), el movimiento de la falla Villa Caro se invertiría a dextral, como evidencia de esta inversión (Figura 81) estaría el desarrollo de 2 ganchos de flexión a lo largo de la traza de la falla, como se ve en la Figura 82 y Anexo A.

Figura 81. Esquema ilustrando la inversión cinemática de la falla Villa Caro. Bajo una máxima compresión en sentido E-W la cinemática sería sinistral. Con un vector de presión en azimut 147° , la cinemática sería dextral.

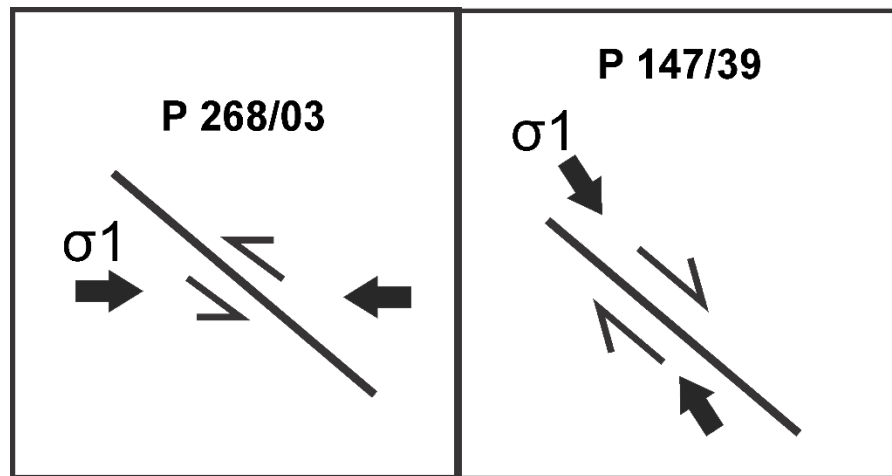


Figura 82. Gancho de flexión asociado a la falla Villa Caro, sugiriendo movimiento dextral.



Fuente: Servicio Geológico Colombiano.

El origen de las fallas inversas longitudinales principales (Falla Las Mercedes y Gramalote), probablemente se asocie a un tensor de esfuerzos antiguo, con dirección de máxima compresión P 268/03 (E-W), calculado con datos de planos de falla estriados (Incompatibles-Incompatibles) que probablemente dio origen a esta serie de fallas inversas de rumbo aproximado N-S y rumbo NNE-SSW, en la parte SW del área de estudio, en un estilo estructural de piel delgada, conformando un abanico imbricado con vergencia hacia el este. (Ver Anexo A)

Los datos de estrías Incompatibles-Compatibles presentarían evidencia de un tensor de esfuerzos presumiblemente más reciente que el anterior, con P 113/30, B 257/61 y T 015/22.

Los datos Neoformados y Reactivados posiblemente reflejen el estado de esfuerzos más reciente; bajo un régimen transtensivo, caracterizado por un tensor de esfuerzos con máxima presión en dirección 137/49, eje intermedio 016/25 y máxima extensión 278/16. Bajo este campo de esfuerzos las fallas Las Mercedes y Gramalote con tendencia aproximada N-S presentarían un movimiento oblicuo inverso-sinistral. Si bien este tensor representaría el más reciente entre los calculados, la falta de datos en formaciones cuaternarias impide afirmar que se trata del campo de esfuerzos en la actualidad.

El procesamiento de los datos también se llevó a cabo agrupándolos por tipo de falla, por región o estructura. Esto con el fin de obtener soluciones alternas al tensor de esfuerzos. Se obtuvo soluciones semejantes en el procesamiento de todas las fallas y solo las inversas, ambas soluciones indican una rotación E-W a NW-SE de la dirección de máxima compresión.

Las fallas cartografiadas se modelarán en su cinemática, según el tensor hallado con el conjunto de planos de falla estriados, denominados neoformados y reactivados, comparable al obtenido con el procesamiento de las diaclasas, (Figura 56), ya que se presume es el tensor más reciente (posiblemente no el actual) de los calculados, además los datos con los cuales se calculó, se encuentran bien distribuidos en el área de estudio y muestran una alta coherencia mecánica entre ellos (Figura 56b), bajo este campo de esfuerzos se propone un modelo estructural en el que coexisten un estilo de escamación gruesa en el Macizo de Santander, donde fallas inversas profundas afectan el basamento proterozoico y escamación de piel delgada que afecta la secuencia cretácica, evidente en el desarrollo de la Falla Gramalote y sus ramificaciones longitudinales al rumbo de las capas. La zona además es afectada por movimientos transcurrentes, representados en fallas de rumbo NE-SW con cinemática dextral.

Las fallas normales cartografiadas N-S en el mapa de unidades geológicas superficiales del INGEOMINAS, de la zona de Gramalote, coexistiendo con las fallas inversas de Las Mercedes y Gramalote, incompatibles en su formación bajo un mismo tensor de esfuerzos, explicarían como fallas normales formadas bajo un tensor de esfuerzos con dirección de máxima extensión en dirección E-W, calculado con el análisis de los planos de falla normales, diferente y presumiblemente más reciente que el tensor de esfuerzos calculado con el subconjunto de fallas incompatibles-incompatibles, donde en dirección E-W se orienta la máxima compresión. Por su parte las fallas dextrales de rumbo NE-SW, que cortan y desplazan las fallas normales N-S, serían compatibles con el tensor de esfuerzos “actual” bajo el cual se modelan las demás fallas cartografiadas.

12. CONCLUSIONES

Las soluciones a los tensores de esfuerzos calculados mediante las distintas metodologías utilizadas evidencian una variación en sentido horario del campo de esfuerzos desde una orientación E-W a NNW-SSE, conforme con lo planteado por Beltrán & Giraldo, (1989); Audemard, (1993) y Vargas *et al.* (2002).

Las fallas normales de tendencia N-S, cartografiadas en el sector de Gramalote, se podrían explicar cómo colapsos gravitacionales asociados a un tensor de paleoesfuerzos con una orientación de 121/70 para P, 349/17 para B y 256/16 para T, calculado con los datos de fallas normales. Este tensor reflejaría un estado de esfuerzos limitado a la región de la Cuenca Catatumbo, ya que sólo un dato utilizado se encuentra más allá de la influencia de la falla Las Mercedes hacia el oeste.

Se propone un modelo estructural para la zona de estudio, caracterizado por un estilo estructural de escamación de piel gruesa que levanta bloques del basamento a lo largo de fallas inversas de alto ángulo, cuyo origen se presume vinculado a un régimen de esfuerzos transcurrente. La falla Las Mercedes y Gramalote conformarían junto con la falla Cuperena, parte de un abanico imbricado con vergencia al este, en un estilo estructural de escamación de piel delgada, con su origen relacionado a un tensor de esfuerzos en régimen compresivo, con dirección de máxima presión E-W.

La convergencia de soluciones al tensor de esfuerzos, calculadas mediante el procesamiento de planos de falla estriados y datos de diaclasas, apuntan a una compresión en sentido NW-SE, lo cual genera un considerable margen de confianza en los resultados obtenidos.

El tensor calculado con el conjunto de planos de fallas denominado neoformadas y reactivadas, reflejaría el tensor de esfuerzos bajo un régimen transtensivo, el cual

se presume el más reciente entre los calculados, bajo este tensor de esfuerzos se modelan las fallas cartografiadas en el Macizo de Santander con rumbo NE-SW, como cabalgamientos de alto ángulo. Como consecuencia de este estado de esfuerzos se tendría una componente de rumbo sinistral a lo largo de las fallas de Las Mercedes, Gramalote y Cuperena, de tendencia aproximada N-S.

Se logran explicar las fallas normales de rumbo N-S cartografiadas en el mapa de unidades superficiales de Gramalote, realizado por el INGEOMINAS, como fallas superficiales producto de colapsos gravitatorios que se presumen asociadas a un tensor más antiguo que el reciente pero más joven que el responsable de los cabalgamientos N-S del sistema de fallas Las Mercedes.

La falta de datos en Formaciones del Cenozoico impide obtener con certeza un tensor de esfuerzos actual, las relaciones temporales planteadas son inferidas basadas en la discriminación de los datos en neoformados y reactivados e incompatibles, además del conocimiento y correlación con los resultados de estudios previos.

13. RECOMENDACIONES

Realizar cartografía a una escala detallada a lo largo de las fallas, con el fin de identificar desplazamientos en contactos geológicos, que permitan confirmar o refutar las conclusiones realizadas en el presente estudio.

Realizar mediciones de más indicadores cinemáticos, que permitan fortalecer la base de datos elaborada en este estudio y obtener soluciones estadísticamente más representativas. Especial atención se debe tener en el Macizo de Santander donde hay extensas zonas sin “muestrear”; a lo largo de las fallas NE-SW para obtener una solución al tensor de esfuerzos que refleje mejor las tendencias de fallamiento cartografiadas en esta región.

BIBLIOGRAFÍA

ACOSTA, J., LONERGAN, Lidia., COWARD, Mike. Oblique transpression in the western thrust front of the Colombian Eastern Cordillera. Journal of South American Earth Sciences. Bogotá. Vol 17. 2004. 181-194 p.

AUDERMARD, Franck. Neotectonique, Sismotectonique et Aléa Sismique du Nord-Ouest du Venezuela (Système de failles d' Oca-Aniön) Ph. D Thesis Université de Montpellier, France, 1993. 369 p.

AUDERMARD, Franck., MACHETTE, M., COX, J., y HALLER, K. Map and database of Quaternary faults in Venezuela and its offshore regions. U.S. Department of the interior, U.S. Geological Survey. 2000. 1-78 p.

BELOUSOV, V. Geologia Estructural. Moscú. Ed Mir (1979). 307 p.

BELTRÁN, C., y GIRALDO, C., Aspectos neotectónicos de la región nororiental de Venezuela. VII Congreso Geológico Venezolano. Barquisimeto; (3): 1989. 1000-1021 p.

BOUMAN, Q., GIBSON, G. Geological Review of the Barco Area, Reporte Interno Colpet, ISN 426. 1964.

BURG, Jean. Structural Geology and Tectonics. Zürich: ETH Zürich and Universität. (2011).

CEDIEL, Fabio. Grupo Girón Una Molaza Mesozoica. Servicio Geológico Nacional Bogotá. Boletín Geológico. Vol. XVI No. 1-3. 5-96 p.

DAVIS, G. H. Structural Geology of Rocks And Regions. John Wiley & Sons, Inc. Vol. 2. 1984.

DAHLSTROM, C. Balanced cross sections. Canadian Journal of Earth Sciences. Vol 6 No. 4. 1969. 743-757p.

DEMETS, C. et al. Current plate motions. Geophysical Journal International Vol.101. 1990. 425-478 p.

DOBLAS, Miguel. Slickenside kinematic indicators, Tectonophysics, Vol 295.1998. 87–197 p.

ECOPETROL. Evaluación regional de la Cuenca Catatumbo Fase 1. 2001. 134 p.

EGO. Frederic., SEBRIER, Michel., LA VENU, Alain., YEPEZ, Hugo., EGUEZ, Arturo. Quaternary state of stress in the northern Andes and the restraining bend model for the Ecuadorian Andes, Second ISAG Oxford 1993. 89-92 p.

EXXON. Regional Petroleum Geology of the Catatumbo Basin, Colombia Informe Geológico 3434.1993.

FREYMUELLER, J. KELLOG, J., VEGA, V. Plate motions in the North Andean Region. Journal of Geophysical Research. Vol. 98.No. 12. 1993. 853-863 p.

GETTY INTERNATIONAL, Geological and Geophysical Report of the Tasajero and West Tasajero Blocks, Southwest Maracaibo Basin. Colombia Reserve Oil and Gas Company. (1982).

GOLDSMITH, Richard., MARVIN, Richard., MEHNERT, Harald. Radiometrics ages in the Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombian Andes. Geological Survey Research. 1971. 44-49 p.

-----, Diccionario Ciencias de la Tierra. Disponible en :<http://books.google.es/books?id=1XKXQqUGDnoC&pg=PA216&dq=%22deformacion+finita%22&hl=es&sa=X&ei=iC9UU7C9NMmosQSivIGwBA&ved=0CDMQ6AEwAA#v=onepage&q=%22deformacion%20finita%22&f=false>

INGEOMINAS. Memoria explicativa de la Geología de las planchas 86 - Ábrego y 97 - Cáchira, Norte de Santander – Colombia. 1978. 41 p.

INGEOMINAS. Mapa Geológico Generalizado del Departamento de Norte de Santander, Memoria explicativa. Escala 250.000. Bucaramanga. 1994. 49 p.

INGEOMINAS. Modelo Geodinámico del Macizo de Santander. Bogotá. 2008. 152 p.

INGEOMINAS. Mapa. Geología de la Plancha 98 Durania. Escala 1:100.000. 2010.

INGEOMINAS. Mapa de UGS de un sector del Municipio de Gramalote. Escala 1:25.000. 2011.

INGEOMINAS. Geología de las Planchas 98 - Durania y 99 - Villa Del Rosario, Norte De Santander - Colombia. 2011b.

INGEOMINAS. Memoria explicativa de la Geología de las planchas 98 - Durania y 99 - Villa del Rosario, Norte de Santander – Colombia. 2011b. 120 p.

INGEOMINAS. Zonificación de estabilidad de los sectores de Pomarroso y Miraflores escala 1:5.000 para la reubicación del casco Urbano del Municipio de Gramalote en Norte de Santander. Volumen 2. Bogotá. 2012. 341 p.

KAMMER. Andrea. Observaciones acerca de un origen Transpresivo de la Cordillera Oriental. Geología Colombiana No. 24. 1999. 29- 53 p.

KAMMER. Andreas y MOJICA Jairo. Una comparación de la tectónica de basamento de las cordilleras Central y Oriental. Geología Colombiana. Vol. 20. 1996. 93.106 p.

KELLOGG, J. BONINI, W. Subduction of the Caribbean plate and basement uplifts in the overrinding South American plate, Tectonics. Vol 1. 1982. 251-276 p.

KELLOGG, J. Cenozoic tectonic history of the Sierra de Perijá and adjacent basins, in Caribbean-South American Plate Boundary and Regional Tectonics, edited by Bonini, R . Hargraves and Shagam, Geological Society America. Memory 162. 1984. 239-261 p.

LEBEL, Daniel. ¿What About Transfer Zones? One of Eric Mountjoy's Provocative Questions. Geological Survey of Canada. 2014. 1-11 p.

MANTILLA, L., BISSIG, T., COTTLE, J., HART, C. Remains of early Ordovician mantle-derived magmatism in the Santander Massif (Colombian Eastern Cordillera). Journal of South American Eastern Sciences. Vol. 38. 2012. 1-12 p.

McCLAY, Kenneth. The Mapping of Geological Estructures. London: John Wiley & Sons. 1987. 161 p.

MENDIVELSO, Domingo. Curso de Fotogeología, Geomorfología y Aplicaciones de la percepción remota Metodología para el levantamiento Fotogeológico. Bogotá. INGEOMINAS. 2008

MONTES, Camilo. Three dimensional structure and kinematics of the Piedras-Girardot foldbelt in the northern Andes of Colombia: Ph. D. Dissertation, The University of Tennessee, Knoxville, 2001. 212 p.

MUÑOZ, Alfonso., DE VICENTE, Gerardo. Técnicas y Métodos de Análisis poblacional de fallas. {En línea} Fecha {Diciembre de 2013} Disponible en: <http://pendientedemigracion.ucm.es/info/geodina/docencia/doctorado/DOCTESEF.pdf>

MUÑOZ, Alfonso., DE VICENTE, Gerardo. Análisis de esfuerzos tectónicos Fallas y Sismos. Reduca (Geología). Serie Tectónica. Vol 2.No. 6. 2010. 1-91p.

NOTESTEIN, F., Hubman C., Bowler J. Geology of the Barco Concession, Republic of Colombia, South America. Geological Society America. Bulletin 55(10).1944. 1165-1216 p.

PAGE, William. Seismicgeology and seismicity of northwestern Colombia. San Francisco, California 1986 156 p (UIS Geología sísmica y sismicidad del noroeste de Colombia, 363 p, ubicado en ciencias básicas)

PARIS, Gabriel., MACHETTE, Michael., DART Richard., HALLER, Kathleen. Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Colombia and its Offshore Regions. USGS. 2000. 1-66 p.

PENNINGTON, W. Subduction of the eastern Panamá basin and the seismotectonics of northwestern South America, Journal Geophysics. Resource 1981. 753-770 p.

PINDELL, James., BARRETT, Stephen. Geological evolution of the Caribbean Region, Vol. H, The Geology of North America, edited by Dengo, G. and Case, J. 1990. 405-432 p.

RAGAN, Donal. Geología Estructural. Introducción a las técnicas geométricas. Barcelona. Ediciones Omega, 1980. 207 p.

RESTREPO-PACE, Pedro. Late precambrian to early Mesozoic Tectonic evolution of the Colombian Andes, Based on new geochronologic, geochronological, geochemical and isotopic data. Ph.D Thesis. University of Arizona. 1995.

RICHARDS, Glenn. Cretaceous section in Barco area of Northeastern Colombian. AAPG. 1968. 2324-2336 p.

ROSELLO, Eduardo., NEVISTIC, Vicente., ARAQUE, L., BETTINI, F., BORDARAMPÉ, C., CASTRO, E., COLO, C., CÓRSICO, S., COVELLONE, Graciela., HARING, C., PINA, Luis., PINILLA, C., RUIZ, R., SALVAY, Raul. La sintaxis tectónica neógena de las Cordilleras Oriental y Santander: Aportes de modelos analógicos y controles regionales sobre los sistemas petroleros. III Convención Técnica de la ACGGP. 2004. 1-12 p.

ROYERO, José., CLAVIJO, Jairo., Memoria explicativa Mapa Geológico Generalizado Departamento Santander. Escala 1: 400.000. INGEOMINAS. 2001. 92 p.

SERVICIO GEOLÓGICO NACIONAL E INVENTARIO MINERO NACIONAL,
Geología del Cuadrángulo G-13 Cúcuta. 1967.

SIEVERS, W. 1888. Die Cordillere von Mérida, nebst Bemerkungen über das
Karibische Gebirge. Wien, Hölzel, VIII und 238 S. m. 1 Karte. En ECOPETROL.
Evaluación regional de la Cuenca Catatumbo fase 1. 2001. 134 p.

SPANG, John. Numerical method for dynamic analysis of calcite Twin
Lamellae. Geology Society American. Vol. 83. 1972. 467-472 p.

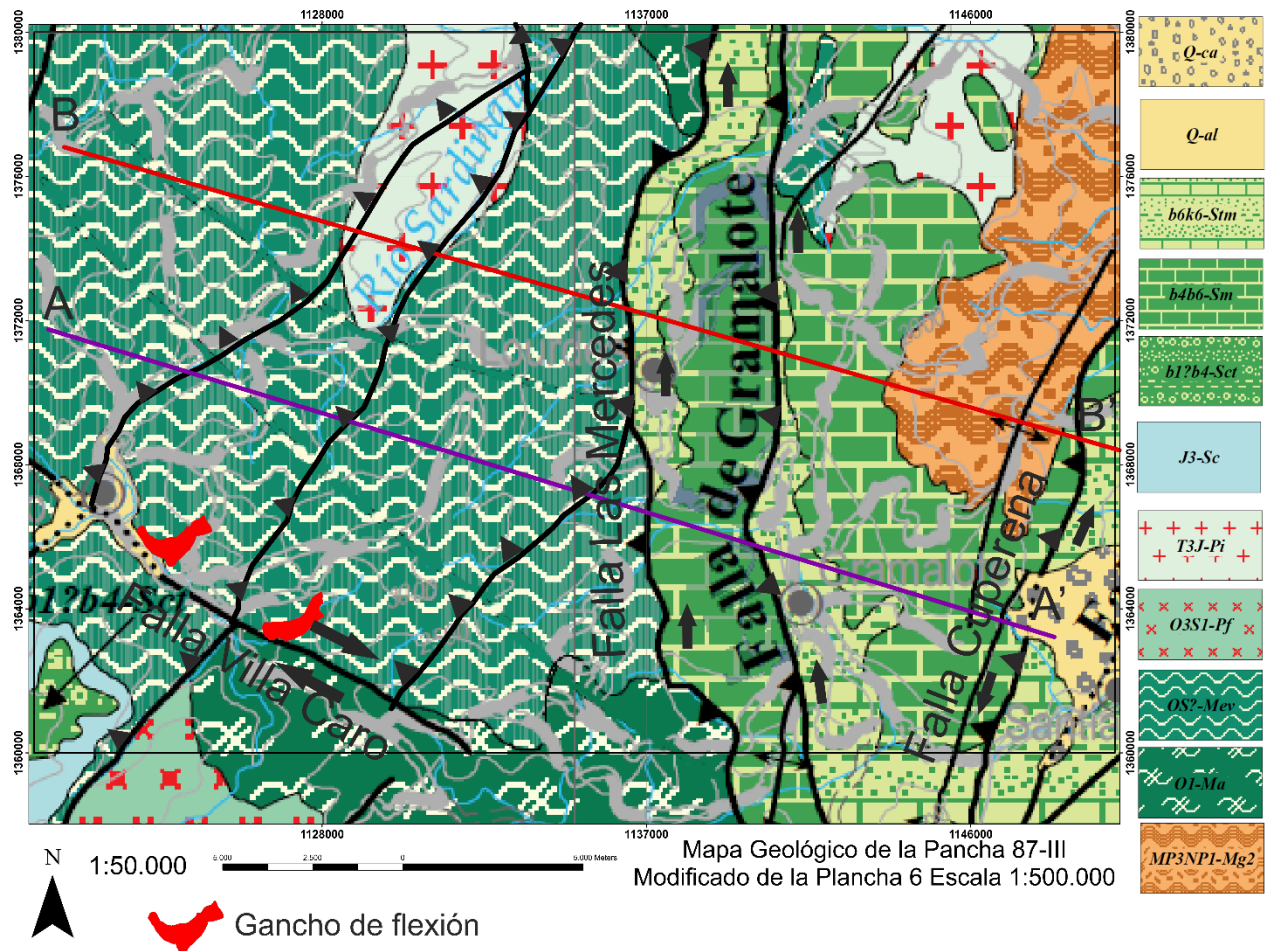
TABOADA, Alfredo., RIVERA, Luis., FUENZALIDA, Andrés. CISTERNAS,
Armando., PHILIP, Hervé. BIJWAARD, Harmen., OLAYA, José., y RIVERA, Clara.
Geodynamics of the northern Andes: Subductions and intracontinental deformation
(Colombia), Tectonics. Vol 19.No.5.2000.787–813 p.

TURNER, Francis. Nature and Dynamic Interpretation of Deformation Lamellae in
Calcite of Three Marbles. American Journal of Science Vol 251.1953. 276-298 p.

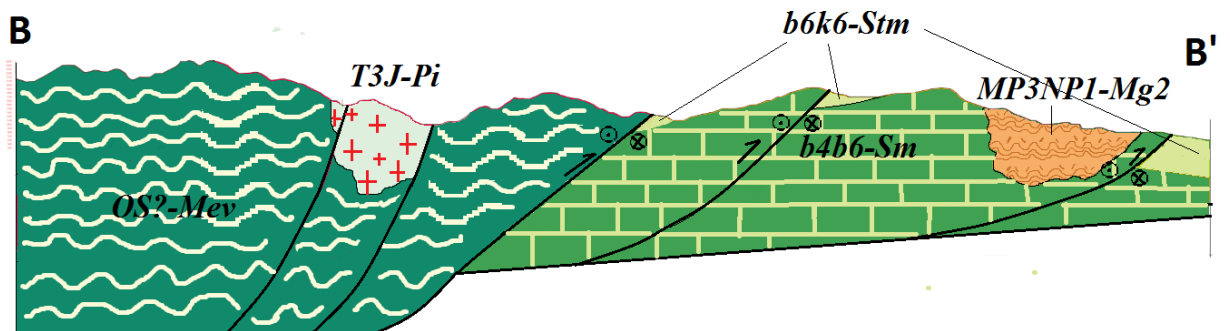
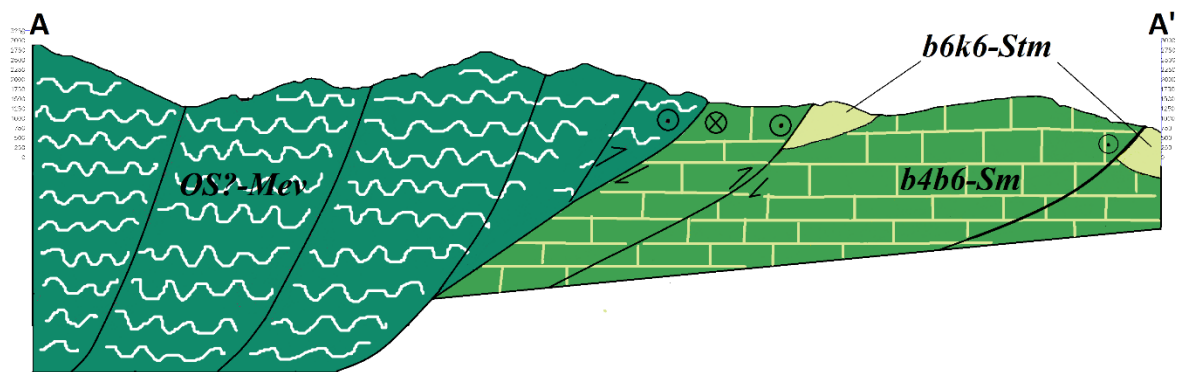
VARGAS, Carlos., PUJADES, Luis., ULGADE, Arantza., CANAS, José. Estado de
deformación y esfuerzos en el territorio colombiano. Ciencias de la Tierra. Bogotá.
2002. 373-391 p.

WARD, Dewight., GOLDSMITH, Richard., CRUZ, Jaime., RESTREPO, Hernán.
Geología de los Cuadrángulos H-12, Bucaramanga y H-13, Pamplona,
Departamento de Santander. Boletín Geológico. Vol. XXI. No. 1-3, 1973. 132 p.

ANEXO A. MAPA GEOLÓGICO Y ESTRUCTURAL. PERFILES



Perfiles geológicos.



ANEXO B. TABLA DE DATOS DE PLANOS DE FALLA ESTRIADOS

Datos de planos de falla estriados medidos en campo y datos *calculados con el software FaultKin

Estaciones	Norte	Este	DipDir (°)	Dip (°)	Pitch (°)	Dir Pitch	Movimiento	*StriaeTrend (°)	*Plunge (°)
FR149	1368754	1136565	6	70	10	NW	DEX-INV	279	9.39
NRL032	1365448	1120482	185	52	30	SW	SIN-INV	255	23.20
NRL039	1361177	1131195	319	40	35	NE	SIN-INV	21	21.63
NRL074	1371064	1141087	199	58	78	SW	NOR-DEX	221	56.05
NRL092	1376108	1136117	210	85	45	SE	SIN-NOR	125	44.78
NRL093	1368773	1136944	175	60	40	SE	DEX-INV	108	33.83

NRL093	1368773	1136944	140	58	50	NE	INV-DEX	82	40.51
NRL105	1373351	1142698	119	76	80	SE	NOR-DEX	155	72.85
NRL105	1373386	1142730	8	87	15	NW	DEX-NOR	279	14.98
NRL105	1373386	1142730	208	90	10	NW	DEX-NOR	298	9.97
NRL105	1373386	1142730	102	90	19	NE	SIN	12	19.00
NRL111	1377681	1141290	260	53	85	SW	NOR-SIN	252	52.71
NRL116	1360910	1139474	212	70	32	SE	DEX-INV	134	29.87
NRL116	1360910	1139474	198	74	64	SE	DEX-INV	137	59.77
NRL116	1360910	1139474	192	74	70	SE	INV	139	64.59
NRL116	1360910	1139474	20	30	22	NW	DEX-INV	309	10.80

NRL117	1363061	1140504	102	25	80	E	NOR-SIN	91	24.59
NRL117	1363061	1140504	75	30	80	NE	NOR-DEX	63	29.50
NRL118	1363099	1140598	263	28	8	NE	SIN-INV	346	3.75
NRL118	1363099	1140598	230	29	46	NW	SIN-INV	278	20.41
NRL118	1363099	1140598	319	33	53	NW	INV-SIN	277	25.78
NRL120	1361087	1148428	111	47	65	SE	INV-SIN	145	41.52
NRL120	1361087	1148428	24	59	0		SIN	294	0.00
NRL121	1363211	1141333	128	64	85	SE	INV-DEX	117	63.56
NRL121	1363211	1141333	150	59	90	SE	INV	150	59.00
NRL121	1363211	1141333	130	40	78	SE	NOR-DEX	114	38.96

NRL122	1365017	1137217	56	79	55	SE	DEX-NOR	131	53.52
NRL122	1365017	1137217	41	71	35	SE	DEX-NOR	118	32.84
NRL122	1365017	1137217	52	72	43	SE	DEX-NOR	126	40.44
NRL122	1365017	1137217	21	73	40	SE	DEX-NOR	97	37.93
NRL122	1365017	1137217	148	82	53	NE	DEX-INV	68	52.27
NRL122	1365017	1137217	45	79	35	NW	DEX-INV	323	34.27
NRL122	1365017	1137217	160	45	63	SE	NOR-SIN	124	39.05
NRL122	1365017	1137217	33	74	30	SE	DEX-NOR	114	28.73
NRL122	1365017	1137217	50	64	15	NW	DEX-INV	327	13.45
NRL122	1365017	1137217	132	50	56	SE	DEX-NOR	178	39.43

NRL122	1365017	1137217	95	76	66	SE	DEX-NOR	156	62.43
NRL122	1365017	1137217	128	77	86	SE	INV-DEX	111	76.41
NRL122	1365017	1137217	115	51	86	SE	NOR-SIN	109	50.83
NRL122	1365017	1137217	125	20	90	SE	NOR	125	20.00
NRL122	1365017	1137217	40	50	79	NE	NOR-SIN	23	48.76
NRL122	1365017	1137217	90	65	89	SE	INV-DEX	88	64.98
NRL123	1363258	1126760	330	62	12	SW	SIN-INV	246	10.58
NRL123	1363258	1126760	130	90	10	SW	SIN	220	10.00
NRL123	1363258	1126760	125	90	4	NE	DEX	35	4.00
NRL123	1363258	1126760	128	90	13	SW	SIN	38	13.00

NRL123	1363258	1126760	308	87	14	SW	DEX-INV	219	13.98
NRL123	1363258	1126760	310	85	20	SW	SIN-INV	222	19.92
NRL123	1363258	1126760	305	78	11	SW	SIN	217	10.76
NRL123	1363258	1126760	110	80	0		SIN	20	0.00
NRL123	1363258	1126760	80	46	5	NW	SIN-NOR	353	3.59
NRL127	1369687	1122678	265	90	40	NW	DEX	354	39.99
NRL127	1369687	1122678	170	67	20	NE	SIN-INV	88	18.35
NRL127	1369687	1122678	336	60	0		SIN	246	0.00
NRL127	1369687	1122678	13	87	37	NW	DEX-INV	285	36.94
NRL128	1361227	1131187	147	70	10	SW	SIN-INV	234	9.39

NRL128	1361227	1131187	310	71	8	NE	DEX-INV	37	7.56
NRL128	1361227	1131187	295	47	30	NE	SIN-INV	4	21.45
NRL128	1361227	1131187	213	79	40	NW	SIN-INV	294	39.12
NRL129	1358610	1137463	271	70	13	SW	SIN-INV	186	12.20
NRL129	1358610	1137463	312	77	23	SW	SIN-INV	227	22.38
NRL129	1358610	1137463	304	65	41	SW	DEX-INV	234	36.48
NRL129	1358610	1137463	311	76	25	SW	DEX-INV	227	24.21
NRL130	1359625	1138312	160	84	39	NE	DEX-INV	75	38.75
NRL130	1359625	1138312	249	86	0		DEX	159	0.00
NRL130	1359625	1138312	230	80	40	SE	SIN-NOR	148	39.27

NRL131	1376654	1140883	190	58	23	SW	SIN-INV	267	19.35
---------------	---------	---------	-----	----	----	----	---------	-----	-------

DIPDIR: Azimuth de buzamiento, DIP: Buzamiento, STRIAETREND: Azimuth de la estría. DEX: Mov. Dextral, SIN: Mov. Sinestral, INV: Mov. Inverso,

NOR: Mov. Normal.

ANEXO C. TABLA DE DATOS DE DIACLASAS MEDIDAS

ESTACIÓN	NORTE	ESTE	ALTURA	Buzamiento	DIP_DIR
ACM-37	1366365	1120361	1679	10	270
ACM-44	1371062	1127487	1145	62	130
ACM-45	1371152	1127636	1237	53	150
ACM-45	1371152	1127636	1237	87	161
ACM-66	1372373	1122728	1868	39	206
ACM-71	1375120	1128830	1850	58	360
ACM-76	1376967	1127875	1979	86	299
ACM-77	1375624	1127347	2189	69	84
ACM-90	1369325	1119982	2313	3	84
AMC-01	1361119	1148475	452	60	60
AMC-010	1362062	1145095	1238	90	80
AMC070	1374208	1141821	987	75	176
AMC070	1374208	1141821	987	69	320

AMC-107	1379754	1140972	585	55	205
AMC-107	1379754	1140972	585	75	245
AMC-15	1363550	1141440	1054	60	35
AMC-15	1363550	1141440	1054	60	95
AMC-15	1363550	1141440	1054	70	10
AMC-18	1365057	1137208	1575	56	270
AMC-18	1365057	1137208	1575	70	215
AMC-20	1365378	1140837	1127	88	195
AMC-20	1365378	1140837	1127	84	130
AMC-20	1365378	1140837	1127	86	155
AMC-22	1368160	1140649	0	90	360
AMC-23	1367332	1139736	1446	85	204
AMC-28	1360501	1144300	683	80	80
AMC-28	1360501	1144300	683	78	50
AMC-30	1362454	1142742	932	90	160

AMC-30	1362454	1142742	932	60	20
AMC-36	1367566	1147284	1320	85	90
AMC-36	1367566	1147284	1320	47	67
AMC-36	1367566	1147284	1320	80	130
AMC-37	1367597	1148102	1039	75	360
AMC-47	1371895	1143557	1982	68	140
AMC-49	1371526	1141342	1844	8	70
AMC-49	1371526	1141342	1844	80	360
AMC-84	1369156	1135774	1763	45	230
AMC-84	1369156	1135774	1763	58	65
AMC-84	1369156	1135774	1763	75	155
AMP - 051	1370581	1126639	0	63	83
AMP - 051	1370581	1126639	0	53	154
AMP - 051	1370581	1126639	0	47	87
AMP - 052	1370537	1127706	1495	55	94

AMP - 054	1370346	1125864	1497	67	104
AMP-067	1372373	1122728	1868	39	206
AMP-069	1372369	1121333	2278	83	99
AMP-076	1375602	1128710	2179	86	299
AMP-079	1373372	1127927	1856	28	58
AMP-080	1372681	1128668	1734	58	60
MVC-002	1391166	1124119	1246	72	133
MVC-024	1394968	1140070	511	70	45
MVC-024	1394968	1140070	511	87	137
MVC-035	1389021	1139283	394	73	320
MVC-037	1388921	1139788	434	70	180
MVC-100	1391925	1149249	588	85	75
MVC-100	1391925	1149249	588	70	198
MVC-102	1390354	1150190	713	72	115
NRL001	1362490	1126082	2025	84	194

NRL003	1360316	1129101	2043	61	167
NRL003	1360316	1129101	2043	86	205
NRL003	1360316	1129101	2043	40	300
NRL004	1361117	1128441	2249	74	342
NRL004	1361117	1128441	2249	56	317
NRL032	1365448	1120482	1741	75	90
NRL034	1366575	1122292	1492	90	81
NRL034	1366575	1122292	1492	86	70
NRL041	1364425	1123224	1911	79	255
NRL041	1364425	1123224	1911	64	206
NRL041	1364425	1123224	1911	59	350
NRL043	1363766	1121618	2551	76	307
NRL045	1369118	1123303	1487	46	274
NRL045	1369118	1123303	1487	52	208
NRL045	1369118	1123303	1487	87	191

NRL052	1365591	1128875	3145	57	116
NRL054	1361132	1127705	1276	43	144
NRL055	1371122	1128062	1134	52	62
NRL055	1371122	1128062	1134	88	340
NRL055	1371122	1128062	1134	68	245
NRL071	1374207	1128384	1947	43	335
NRL076	1372648	1141657	1840	86	117
NRL080	1376342	1141409	987	75	320
NRL080	1376342	1141409	987	69	176
NRL081	1370925	1136525	1215	19	142
NRL081	1370925	1136525	1215	71	275
NRL081	1370925	1136525	1215	68	65
NRL081	1370925	1136525	1215	68	195
NRL082	1371608	1136360	1217	87	72
NRL082	1371608	1136360	1217	68	248

NRL082	1371608	1136360	1217	75	240
NRL082	1371608	1136360	1217	64	244
NRL082	1371608	1136360	1217	82	50
NRL082	1371608	1136360	1217	35	270
NRL082	1371608	1136360	1217	56	212
NRL084	1373561	1136425	1097	31	335
NRL084	1373561	1136425	1097	55	197
NRL084	1373561	1136425	1097	79	129
NRL084	1373561	1136425	1097	43	40
NRL084	1373561	1136425	1097	85	85
NRL084	1373561	1136425	1097	39	40
NRL088	1375641	1136057	1327	90	140
NRL089	1376361	1136152	1391	67	150
NRL089	1376361	1136152	1391	72	105
NRL089	1376361	1136152	1391	82	11

NRL090	1376737	1136240	1471	68	20
NRL090	1376737	1136240	1471	63	289
NRL090	1376737	1136240	1471	61	325
NRL090	1376737	1136240	1471	76	159
NRL090	1376737	1136240	1471	69	334
NRL090	1376737	1136240	1471	26	156
NRL092	1376108	1136117	1400	22	96
NRL092	1376108	1136117	1400	76	280
NRL093	1368773	1136944	1543	70	93
NRL093	1368773	1136944	1543	45	29
NRL093	1368773	1136944	1543	64	25
NRL093	1368773	1136944	1543	90	139
NRL097	1370837	1134827	1843	48	338
NRL097	1370837	1134827	1843	29	314
NRL097	1370837	1134827	1843	33	315

NRL097	1370837	1134827	1843	40	305
NRL099	1371106	1135378	1747	42	331
NRL099	1371106	1135378	1747	89	134
NRL099	1371106	1135378	1747	80	10
NRL099	1371106	1135378	1747	55	349
NRL099	1371106	1135378	1747	41	240
NRL099	1371106	1135378	1747	46	336
NRL099	1371106	1135378	1747	36	325
NRL100	1369852	1137510	1566	74	356
NRL100	1369852	1137510	1566	79	195
NRL101	1369753	1137816	1595	90	180
NRL101	1369753	1137816	1595	59	195
NRL101	1369753	1137816	1595	64	235
NRL101	1369753	1137816	1595	86	185
NRL103	1370376	1137480	1463	62	188

NRL103	1370376	1137480	1463	83	339
NRL104	1370616	1137428	1437	72	172
NRL104	1370616	1137428	1437	80	215
NRL104	1370616	1137428	1437	75	245
NRL104	1370616	1137428	1437	86	40
NRL104	1370616	1137428	1437	70	85
NRL105	1373386	1142730	1350	85	94
NRL105	1373386	1142730	1350	79	342
NRL105	1373386	1142730	1350	86	4
NRL105	1373386	1142730	1350	80	120
NRL105	1373386	1142730	1350	67	345
NRL105	1373386	1142730	1350	69	135
NRL105	1373351	1142698	1373	56	90
NRL105	1373351	1142698	1373	90	114
NRL105	1373351	1142698	1373	25	184

NRL106	1373357	1142713	1330	50	340
NRL106	1373357	1142713	1330	90	83
NRL106	1373357	1142713	1330	46	330
NRL106	1373357	1142713	1330	29	263
NRL108	1378971	1140846	628	29	45
NRL108	1378971	1140846	628	5	195
NRL109	1377961	1141197	681	79	169
NRL109	1377961	1141197	681	86	10
NRL109	1377961	1141197	681	73	102
NRL109	1377961	1141197	681	80	194
NRL109	1377961	1141197	681	90	36
NRL111	1377681	1141290	705	90	162
NRL118	1363099	1140598	1187	71	135
NRL118	1363099	1140598	1187	79	133
NRL118	1363099	1140598	1187	56	30

NRL120	1361087	1148428	463	46	303
NRL120	1361087	1148428	463	60	235
NRL121	1363211	1141333	1064	79	90
NRL121	1363211	1141333	1064	52	205
Pto de control	1361091	1145732	1142	65	205
Pto de control	1361091	1145732	1142	60	65
pto de control	1365529	1137739	1616	38	95
pto de control	1365529	1137739	1616	85	270
pto de control	1367733	1137376	1722	65	170
pto de control	1367759	1147545	1247	45	340
pto de control	1367759	1147545	1247	70	65

AMC - 144	1375038	1147942	1213	32	320
AMC - 144	1375038	1147942	1213	18	230
AMC - 144	1375038	1147942	1213	76	60
AMC-151	1368574	1137508	1688	58	328
AMC-151	1368574	1137508	1688	57	285
AMC-151	1368574	1137508	1688	52	195
AMC-154	1369521	1137089	1477	70	130
AMC-170	1370516	1138166	1549	45	50
AMP-183	1371142	1116770	2742	70	60
AMP-183-1	1371938	1117459	2852	88	207
NRL124	1365448	1120482	1741	45	60
NRL124	1365448	1120482	1741	35	76
NRL124	1365448	1120482	1741	64	88
NRL124	1365448	1120482	1741	61	86
NRL124	1365448	1120482	1741	81	236

NRL124	1365448	1120482	1741	74	191
NRL124	1365448	1120482	1741	82	85
NRL124	1365448	1120482	1741	66	81
NRL124	1365448	1120482	1741	75	81
NRL124	1365448	1120482	1741	55	42
NRL124	1365448	1120482	1741	81	260
NRL124	1365448	1120482	1741	62	65
NRL124	1365448	1120482	1741	64	64
NRL124	1365448	1120482	1741	55	235
NRL124	1365448	1120482	1741	79	240
NRL124	1365448	1120482	1741	50	255
NRL124	1365448	1120482	1741	80	60
NRL124	1365448	1120482	1741	80	130
NRL124	1365448	1120482	1741	34	101
NRL124	1365448	1120482	1741	85	232

AMP199	1365448	1120482	1741	61	32
AMP199	1365448	1120482	1741	69	23
AMP199	1365448	1120482	1741	87	78
AMP199	1365448	1120482	1741	71	11
AMP199	1365448	1120482	1741	74	28
AMP199	1365448	1120482	1741	75	18
AMP199	1365448	1120482	1741	62	93
AMP199	1365448	1120482	1741	83	41
AMP199	1365448	1120482	1741	78	12
AMP199	1365448	1120482	1741	69	21
AMP199	1365448	1120482	1741	84	134
AMP199	1365448	1120482	1741	74	31
AMP199	1365448	1120482	1741	54	72
AMP199	1365448	1120482	1741	64	16

DipDir: Dirección de Buzamiento (Azimuth de Buzamiento)

ANEXO D. TABLA DE DATOS DE PLANOS DE ESTRATIFICACIÓN

Estaciones	NORTE	ESTE	DIP	Dip dir
AMC-01	1361119	1148475	57	1148205
control	1361935	1147257	35	1146987
control	1362722	1147347	22	1147077
AMC-04	1363982	1147353	40	1147083
control	1362272	1143204	25	1142934
AMC-07	1362342	1143319	45	1143049
AMC-08	1362503	1144585	25	1144315
AMC-011	1361983	1145622	10	1145352
AMC-012	1362103	1145939	10	1145669
control	1361836	1145343	10	1145073
control	1361091	1145732	35	1145462
control	1360941	1145756	40	1145486
AMC-13	1360772	1145798	25	1145528

AMC-14	1360450	1145351	65	1145081
AMC-15	1363550	1141440	15	1141170
AMC-16	1363176	1140626	30	1140356
AMC-17	1365629	1138316	23	1138046
AMC-20	1365378	1140837	18	1140567
AMC-22	1368160	1140649	23	1140379
AMC-23	1367332	1139736	30	1139466
AMC-28	1360501	1144300	23	1144030
AMC-30	1362454	1142742	27	1142472
AMC-31	1363111	1142237	27	1141967
AMC-33	1366493	1145491	11	1145221
control	1366645	1145842	20	1145572
AMC-34	1366934	1146298	50	1146028
control	1368885	1148785	20	1148515
control	1367469	1143346	20	1143076

control	1367261	1143220	16	1142950
AMC-42	1367271	1141178	22	1140908
AMC-44	1373051	1143738	10	1143468
AMC-47	1371895	1143557	30	1143287
AMC-48	1371856	1142005	16	1141735
AMC-49	1371526	1141342	18	1141072
control	1371064	1141066	30	1140796
control	1360838	1149000	32	1148730
AMC-59	1360503	1141842	25	1141572
AMC-60	1361450	1141883	25	1141613
AMC-62	1361767	1140143	20	1139873
AMC-100	1376820	1138069	5	1137799
AMC-104	1379199	1140386	20	1140116
AMC-107	1379754	1140972	25	1140702
AMC-108	1378960	1140868	39	1140598

AMC-113	1375477	1139062	18	1138792
AMC-114	1374264	1138320	19	1138050
AMC-115	1373165	1137853	24	1137583
AMC-116	1372294	1137922	23	1137652
AMC-119	1376662	1135376	42	1135106
AMC-96	1374246	1136699	35	1136429
AMC-97	1374814	1137055	42	1136785
CONTROL	1378673	1140090	10	1139820
CONTROL	1378209	1141179	45	1140909
CONTROL	1377669	1141274	25	1141004
CONTROL	1377277	1138790	54	1138520
CONTROL	1376110	1140387	35	1140117
CONTROL	1375590	1138942	19	1138672
CONTROL	1370193	1137685	46	1137415
NRL076	1372648	1141657	2	1141387

NRL077	1372737	1141474	13	1141204
NRL081	1370925	1136525	32	1136255
NRL085	1373678	1136426	29	1136156
NRL103	1370376	1137480	44	1137210
NRL104	1370616	1137428	21	1137158
NRL105	1373351	1142698	6	1142428
NRL107	1379248	1140840	39	1140570
NRL108	1378971	1140846	45	1140576
NRL109	1377961	1141197	25	1140927
NRL110	1377733	1141240	39	1140970
AMC-149	1374518	1145540	11	180
AMC-151	1368574	1137508	30	301
pto de control	1369477	1137575	65	160
AMC-153	1370093	1137058	32	105
AMC-154	1369521	1137089	17	300

AMC-158	1375745	1139761	18	295
pto de control	1375581	1139907	20	160
AMC-159	1375424	1140075	20	320
pto de control	1375358	1140202	65	285
pto de control	1375356	1140241	38	270
pto de control	1375342	1140389	55	310
AMC-161	1374192	1140327	45	310
pto de control	1374188	1140091	45	320
pto de control	1373089	1139120	18	270
AMC-162	1372976	1138904	18	310
AMC-165	1373211	1137085	12	290
AMC-166	1373172	1136973	15	285

AMC-170	1370516	1138166	30	280
AMC-172	1369795	1138401	18	280
AMC-173	1371068	1143447	18	255
AMC-174	1370213	1143459	23	260
AMC-176	1369674	1142648	16	280
AMC-179	1368475	1141961	30	250
AMC-191	1370740	1136224	43	66
AMP-182	1370338	1117269	21	288
AMP-183	1371142	1116770	20	194
AMP-183-1	1371938	1117459	57	304
AMP-190-1	1362821	1147326	27	276
AMP-192	1362035	1149226	20	42
AMP-194	1369259	1148888	60	281
AMP-195	1368269	1149821	53	36
AMP-196	1368185	1150363	30	174

