

Análisis Cuantitativo de Sistemas de Fracturas como Aporte al Conocimiento Hidrogeológico
de la zona Sur de la Mesa de Los Santos,
Santander – Colombia.

Yessenia Tarazona Lizcano y María C. Vargas López

Trabajo de Grado para Optar el título de Geólogo

Director

Francisco Alberto Velandia Patiño

Doctor en Geociencias

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físico Químicas
Escuela de Geología
Bucaramanga

2020

Agradecimientos

Agradecemos a nuestro director de grado Francisco Velandia por hacernos parte de este gran proyecto. Gracias por su disposición y ayuda en este estudio. Por compartir su experiencia, conocimientos y pasión por la geología, el conocimiento aprendido fue invaluable.

A la gobernación de Santander por proporcionar los medios para el desarrollo de este proyecto.

A la Universidad Industrial de Santander y profesores de geología por brindarnos conocimiento en las aulas y en las campañas de campo. Gracias por las herramientas y consejos otorgados para perseguir metas académicas cada vez más altas en nombre de la ciencia.

A nuestras familias por el apoyo brindado durante todo nuestro proceso de formación.

A los habitantes del municipio de Los Santos por su hospitalidad y guía en el camino.

A todas aquellas personas que directa o indirectamente aportaron en la realización de este proyecto.

Dedicatoria

A la vida, por la creación de nuestro objeto de estudio como geólogos y por permitirme leer la historia de la tierra a atreves de las rocas.

A mis padres, Juvenal y Alba, por su incansable sacrificio y amor que me permitieron seguir adelante persiguiendo mis anhelos académicos y personales. Infinitas gracias, son el motor de mi vida.

A mis hermanas Tatis, Natis y Nana por su apoyo incondicional y guía en mi proceso universitario, por escuchar atentamente y aconsejarme en los momentos más difíciles. Son mi ejemplo a seguir.

A Cami, Robert, Stephen, Jeison y Rolo por su amistad a través de mi paso por la universidad, gracias por todos los momentos compartidos, hicieron de mi paso por la universidad la mejor experiencia de mi vida.

A Cami, mi amiga y confidente, por su amistad incondicional, compañerismo y amor otorgado. Fue un gusto cruzar caminos y compartir tantos momentos fuera y dentro del aula de clases.

A las Ammy por su amistad y hermandad desde el colegio. Gracias por estar siempre.

Yessenia T.

Dedicatoria

Principalmente a Dios.

Por brindarme sabiduría para realizar y culminar con éxito esta etapa tan importante de mi vida.

A mi Madre Mercedes.

Que es mi ángel protector y mi guía. Por darme la fortaleza en los momentos difíciles, por ser la fuente de inspiración para dar lo mejor de mí cada día. Simplemente porque todo lo que soy se lo debo a ella.

A mi Padre Jaime y a mis hermanas Erika, Diana y Paula.

Por su inmenso sacrificio, apoyo, amor incondicional, consejos y enseñanzas que me otorgan valentía, ganas y berraquera para salir adelante y alcanzar mis metas. Porque junto con mi madre son el motor de mi vida.

A Yesse, Robert, Steve, Jei, Rolo y Lau.

Por su amor y amistad incondicional. Le agradezco a la vida y a la universidad que me permitió conocerlos y forjar esta hermosa amistad. Gracias por las enseñanzas que cada uno aporta a mi vida, por los momentos fuera y dentro de la universidad y por hacer de esta etapa una experiencia inolvidable.

...A todos aquellos familiares, amigos y maestros que directa o indirectamente aportaron en la realización de este proyecto.

M^a Camila

Tabla de contenido

Introducción	15
1. Objetivos	18
1.1 Objetivo general	18
1.2 Objetivos específicos	18
2. Localización	19
3. Marco teórico.....	20
3.1 Esfuerzo y deformación.....	20
3.2 Deformación frágil	22
3.2.1 Estructuras de deformación frágil	22
3.2.1.1 Fracturas.	22
3.2.1.2 Fallas.	24
3.3 Análisis estructural	26
3.3.1 Análisis geométrico	26
3.3.2 Análisis cinemático	28
3.3.2.1 Indicadores Cinemáticos.	28
3.3.2.2 Análisis poblacional de fallas.	30
3.4 Análisis del sistema de fracturas	33
3.4.1 Características geológicas y geomecánicas de las fracturas	33
3.4.1.1 Atributos geológicos.	33

3.4.1.2	Orientación.....	33
3.4.1.3	Meteorización.....	34
3.4.1.4	Apertura.....	35
3.4.1.5	Relleno.....	37
3.4.2	Métodos de muestreo y parámetros para la caracterización de fracturas halladas en un afloramiento.....	38
3.4.2.1	Líneas de muestreo circular y ventanas circulares.....	39
3.4.3	Métodos de procesamiento.....	42
3.4.3.1	FracPaQ.....	42
4.	Geología de la Mesa de Los Santos.....	51
4.1	Evolución geológica.....	52
4.2	Estratigrafía.....	53
4.3	Geología estructural.....	61
4.3.1	Fallas.....	61
4.3.2	Estrías.....	66
4.3.3	Diaclasas.....	66
4.3.4	Geología estructural con enfoque hidrogeológico.....	68
5.	Metodología.....	69
5.1	Revisión bibliográfica.....	70
5.2	Validación de la información y planeación.....	71
5.3	Fase de campo.....	72

5.3.1	Medición de datos estructurales	72
5.4	Procesamiento de datos y análisis de resultados	74
6.	Análisis de Fractura y Cinemática del Sector Sur de la Mesa de los Santos	81
6.1	Revisión de Antecedentes	81
6.1.1	Direcciones preferenciales de fractura	82
6.1.2	Análisis del sistema de fracturas	85
6.2	Comparación y validación de datos previos	86
6.3	Procesamiento y Caracterización Cuantitativa del Sistema de Fractura	87
6.3.1	Análisis de las características geológicas y geomecánicas de las fracturas.....	89
6.3.1.1	Orientaciones	89
6.3.1.2	Atributos geológicos	96
6.3.1.3	Meteorización	99
6.3.1.4	Apertura.....	100
6.3.1.5	Relleno	101
6.3.2	Caracterización de parámetros de fractura.....	101
6.3.2.1	Análisis de intensidad, densidad y longitud de fractura.....	101
6.3.2.2	Análisis preliminar del flujo de fluidos.....	108
6.4	Análisis cinemático del sector Sur de la Mesa de Los Santos.	114
6.4.1	Estimación de tensor por estación	115
6.4.2	Tensor para el sur de la Mesa de Los Santos.	119

7.	Discusiones.....	123
8.	Conclusiones.....	127
9.	Recomendaciones	129
	Referencias bibliográficas.....	131

Lista de Tablas

Tabla 1. Régimen de esfuerzos a partir del índice R'	31
Tabla 2. Clasificación de las aperturas	35
Tabla 3. Descripción y aspecto de las aperturas.....	36
Tabla 4. Plantilla para la recolección de datos de diaclasas por medio del método línea de muestreo y ventana de muestra.....	73
Tabla 5. Plantilla para la recolección de datos de estrías.....	73
Tabla 6. Comparación de resultados originales con resultados corregidos.	84
Tabla 7. Atributos geológicos de las estaciones medidas.	96
Tabla 8. Medidas de intensidad, densidad y longitud promedio	102
Tabla 9 Datos y algunos resultados de los tensores de esfuerzos obtenidos con el análisis de planos estriados de falla en cada estación.	117

Lista de Figuras

Figura 1. Localización del área de estudio.....	19
Figura 2. Elipsoide de esfuerzos	22
Figura 3. Fracturas generadas por la aplicación de un sistema de esfuerzos	23
Figura 4. Tipos de fractura.....	24
Figura 5. Relación entre los esfuerzos principales, la inclinación de las fracturas y el movimiento de las fallas	25
Figura 6. Diagrama rosa de familias de fracturas mostrando direcciones preferenciales. 27	
Figura 7. Bloque diagrama y red estereográfica de un plano de falla	27
Figura 8. Arreglo geométrico característico de fracturas secundarias	29
Figura 9. Régimen de esfuerzos definidos por el cálculo de las relaciones de los esfuerzos principales σ_1 , σ_2 y σ_3 mediante el círculo de Mohr.....	32
Figura 10. Estimación de la meteorización del macizo rocoso.....	35
Figura 11. Comparador de apertura de fractura	37
Figura 12. Línea de muestreo y ventana circular	40
Figura 13. Intensidad de fracturamiento.....	41
Figura 14. Densidad de fracturamiento	42
Figura 15. Histogramas de Longitud.....	43
Figura 16. Gráficos log-log de longitud	44
Figura 17. Histograma y diagrama rosa.....	45
Figura 18. Mapas de intensidad, densidad y círculos de exploración	46
Figura 19. Topología de red definida por la disposición de líneas y nodos	47
Figura 20. Grafica ternaria de conectividad.....	48

Figura 21. Elipses de permeabilidad	51
Figura 22. Esquema tectónico de Santander y la Mesa de Los Santos.....	52
Figura 23. Evolución Morfoestructural de las mesas.	53
Figura 24. Afloramiento perteneciente a la zona superior de la Formación Jordán.....	55
Figura 25. Afloramiento perteneciente a la Formación Los Santos	56
Figura 26. Afloramiento perteneciente la Formación Rosablanca	59
Figura 27. Mapa geológico de la Mesa de Los Santos	65
Figura 28. Análisis cinemático de la Mesa de Los Santos.....	67
Figura 29. Diagramas del análisis cinemático de la Mesa de Los Santos	68
Figura 30. Mapas de distribución de la Mesa de Los Santos.....	69
Figura 31. Metodología del proyecto	70
Figura 32. Datos tomados en campo en los planos estriados.....	74
Figura 33. Ejemplo de diagrama de rosa en el programa GeoRose	75
Figura 34. Plantilla utilizada para el software WinTensor.	76
Figura 35. Ejemplo de los resultados obtenidos en WinTensor de la estación YC001.....	78
Figura 36. Ventana principal de FracPaQ.....	79
Figura 37. Imagen de afloramiento digitalizado	80
Figura 38. Bloques estructurales delimitados por Vargas (2008)	83
Figura 39. Comparación de datos en diagramas rosa	87
Figura 40. Mapa de Estaciones en el Sur de la Mesa de Los Santos.....	89
Figura 41. Diagrama rosa regional FRACPAQ	90
Figura 42. Diagramas rosa y densidad de polos de los bloques estructurales	91
Figura 43. Mapa de diagramas rosa por estación obtenidos a partir de FracPaQ	95

Figura 44. Gráfico de dispersión de los grados de meteorización	99
Figura 45. Gráfico de dispersión de la apertura	100
Figura 46. Mapa de intensidad de la zona de estudio	103
Figura 47. Mapa de densidad de la zona de estudio	104
Figura 48. Diagramas de dispersión de intensidad y densidad	106
Figura 49. Gráfico de dispersión de la longitud de traza promedio	107
Figura 50. Registro fotográfico digitalizado de la estación YC012.	110
Figura 51. Relación entre gráficos estación YC012	111
Figura 52. Relación entre gráficos estación YC001	112
Figura 53. Mapa de conectividad y permeabilidad de la zona.....	113
Figura 54 Gráficos de tensores obtenidos en cada una de las estaciones.	118
Figura 55. Distribución espacial de los tensores y esfuerzos principales de cada estación. -----	119
Figura 56. Orientación estimada del esfuerzo principal σ_1	120
Figura 57. Análisis poblacional de fallas al sur de la Mesa de los Santos. Bloque 2.....	122
Figura 58 Esquema de las fallas: Potreros, Las Calaveras, La Mojarra, Los Santos, La Pilonera, La Chivatera y Zanjón La Vega. (En rojo).....	124

Resumen

Título: Análisis Cuantitativo de Sistemas de Fracturas en la zona Sur como Aporte al Conocimiento Hidrogeológico de la Mesa de Los Santos, Santander – Colombia.

Autor: Yessenia Tarazona Lizcano, María Camila Vargas.

Palabras Clave: Sistema de Fractura, Análisis Cuantitativo, Mesa de Los Santos, Hidrogeología, FracPaQ, Ventanas Circulares.

Descripción:

El análisis cuantitativo al sistema de fracturas es una herramienta para determinar la geometría de las estructuras y los parámetros que describen el fracturamiento como intensidad, densidad y longitud de fractura con el fin de identificar las zonas más favorables para la infiltración y almacenamiento de fluidos en un área en específico.

Históricamente en la zona sur de la Mesa de Los Santos ha existido una escasez en el suministro de agua, es por esto que se realiza un estudio geológico cuantitativo enfocado a las estructuras que permiten conocer que tan favorable es una zona al flujo subsuperficial. Para este proyecto, el análisis cuantitativo se realizó en FracPaQ a partir de fotografías de afloramientos. Los resultados son plasmados en mapas de rangos y se relacionan con los atributos geológicos y el análisis preliminar al flujo de fluidos (conectividad y permeabilidad) para obtener las características más importantes que controlan el fracturamiento.

Como conclusión se obtiene que las fallas longitudinales NW-SE tienen gran influencia en el arreglo espacial del fracturamiento y su apertura, actuando su trazo como corredor, especialmente al sureste del área de estudio. Además, se establecen tensores locales de esfuerzo y uno general a partir de indicadores cinemáticos utilizando WinTensor, con el cual se propone un cambio en la cinemática actual de la zona.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Geología. Director: Ph.D. Francisco Alberto Velandia Patiño

Abstract

Title: Quantitative Analysis of Fracture Systems in the South Zone as a Contribution to Hydrogeological Knowledge of Mesa de Los Santos, Santander-Colombia.

Author: Yessenia Tarazona Lizcano, María Camila Vargas.**

Key Words: Fracture System, Quantitative Analysis, FracPaQ, Mesa de los Santos, Hydrogeology, Circular Windows.

Description:

The quantitative analysis of the fracture system is a tool to determine the geometry of the structures and the parameters that describe the fracturing such as intensity, density and length of fracture in order to identify the most favorable zones for the infiltration and storage of fluids in a specific area.

Historically, in Mesa de Los Santos there has been a shortage of water supply, which is why a quantitative geological study is carried out focused on the structures that allow us to know how favorable an area is to subsurface flow. For this study, the quantitative analysis was carried out in FracPaQ from outcrops photographs. The results are captured on range maps showing the study area at the south of La mesa de los santos and are related to the geological attributes and the preliminary fluid flow analysis (connectivity and permeability) to obtain the most important characteristics that control fracturing. As a result, it is concluded that the NW-SE longitudinal faults have a great influence on the spatial arrangement of the fracturing and its aperture, acting as a corridor, especially to the southeast of study area. In addition, local stress tensors and a general one was obtained from kinematic indicators using Wintensor, with the one a change in the current kinematics of the area is proposed.

* Bachelor Thesis

** Physical-Chemical Engineering Faculty. Department of Geology. Director: Ph.D. Francisco Alberto Velandia Patiño

Introducción

El agua subterránea es una fuente hídrica que se encuentra almacenada o en circulación en el subsuelo y representa un gran porcentaje de las reservas de agua dulce disponible en el planeta. Son un recurso de gran utilidad para llevar a cabo diferentes actividades como las agroindustriales, mineras o de hidrocarburos. Además, constituye una alternativa hídrica para el consumo humano en las zonas con demanda de agua potable.

Estas aguas se infiltran por medio de los poros de rocas sedimentarias y sedimentos (porosidad primaria) y a través de las fracturas (porosidad secundaria) presentes en las rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias bien consolidadas, almacenándose en las capas de rocas porosas o en constante circulación mediante los poros y grietas de las formaciones geológicas que yacen debajo de la superficie terrestre.

Históricamente en la Mesa de Los Santos ha existido escasez en el suministro de agua que repercute en la calidad de vida de los habitantes. Las pocas fuentes hídricas que en épocas de verano se secan completamente y la contaminación de ellas, han generado la necesidad de buscar otras alternativas para el abastecimiento como la explotación de aguas subterráneas.

Con el fin de encontrar una solución permanente y sostenible a lo anterior se han realizado diversos estudios en la zona que permiten conocer aspectos geológicos e hidrogeológicos involucrados en la caracterización del sistema. La geología estructural es una de las disciplinas más importantes implicadas en un estudio integral hidrogeológico siendo su análisis el insumo base para establecer sectores de importancia mediante el análisis de las características de las

fracturas que permitan reconocer y proponer potenciales canales de circulación y reserva (acuíferos) asociados a la porosidad secundaria.

Existen estudios estructurales previos realizados en el marco del convenio de INGEOMINAS y UIS como el de Vargas (2008), quien describió las características geológicas con énfasis en el control estructural de la zona, a partir de las fracturas observadas; el de Contreras (2008), quien ha establecido sectores de importancia hidrogeológica a través de mapas cualitativos relacionados con las fracturas encontradas en la Formación Los Santos; y el de Díaz et al. (2009) quienes establecieron zonas con potencial hidrogeológico, basados en estratigrafía, petrografía y análisis de fractura. Estos estudios permitieron un primer acercamiento a la definición de áreas de interés hidrogeológico.

Para el desarrollo de esta investigación y de acuerdo a lo expuesto anteriormente, se establece el problema: *Insuficiencia de información estructural cuantitativa que permita definir posibles áreas de infiltración y reserva de agua subsuperficial (sectores de importancia hidrogeológica) en la zona sur de la Mesa de Los Santos;* Y se formulan las siguientes hipótesis:

- ✓ La metodología y la escala influyen significativamente en los resultados de los atributos que describen el sistema de fracturas.
- ✓ Caracterizar cuantitativamente la información estructural permite correlaciones espaciales específicas y mayor detalle en atributos de fracturas.

A partir de estas ideas, se plantean las preguntas:

1. ¿Qué acciones podrían contribuir al avance en la descripción del sistema de fractura en la Mesa de Los Santos?

2. ¿Cómo la metodología de adquisición y procesamiento contribuye a la caracterización del sistema de fractura en la Mesa de Los Santos?
3. ¿Cuál es el aporte de un análisis cuantitativo a futuras investigaciones en la zona?

Basados en estas formulaciones y con el fin de contribuir a la información estructural de la Mesa de Los Santos se pretende caracterizar los atributos del sistema de fractura a partir de una metodología de adquisición y procesamiento de datos sistemática y rigurosa que permita la correlación espacial y la descripción de parámetros desde un punto de vista cuantitativo, otorgando soporte a antiguas investigaciones y permitiendo el avance hacia modelaciones de flujo de fluidos en medios fracturados y la evaluación de una permeabilidad equivalente en reservorios del subsuelo. Esta metodología de investigación se lleva a cabo en el área sur de La Mesa de Los Santos, mediante afloramientos que proporcionan información del comportamiento de las distintas unidades hidrogeológicas a profundidad.

Los métodos a utilizar son líneas de muestreo y ventanas circulares que reducen significativamente sesgos de adquisición otorgando información relacionada a la intensidad, densidad, conectividad y permeabilidad de las fracturas mediante el programa de procesamiento estadístico FracPaQ. Adicional a esto, se pretende realizar un análisis cinemático relacionado con las fallas longitudinales presentes en el área de estudio utilizando el programa WinTensor, que permita corroborar y/o aportar información a la cinemática de la zona.

Finalmente se considera necesario realizar este proyecto en el área sur de La Mesa de Los Santos, (reportada como la zona más afectada (Cipagauta, 2020), para apoyar y/o definir zonas de importancia hidrogeológica como áreas potenciales de infiltración o recarga, canales de circulación o sectores de almacenamiento, a partir de una base de datos creada con información

nueva y secundaria. Además, proporcionar un insumo base para la construcción de un modelo hidrogeológico o de flujo de fluidos, contribuyendo así al modelo geológico del proyecto del estudio integral de agua subterránea en la Mesa de Los Santos realizado actualmente en convenio entre la Universidad industrial de Santander y la Gobernación de Santander.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Realizar una caracterización cuantitativa del sistema de fractura en la zona sur de la Mesa de Los Santos para establecer la geometría de las estructuras y potenciales áreas de flujo subsuperficial.

1.2 Objetivos específicos

- Definir el estado actual del conocimiento del sistema de fractura en la Mesa de Los Santos con base en la información geológica e hidrogeológica disponible en la región.
- Describir el sistema de fracturas al sur de la Mesa de Los Santos en términos de intensidad, densidad y longitud promedio, mediante el uso de Líneas y Ventanas de Muestreo circulares en afloramientos y la herramienta informática FracPaQ.
- Aportar información relevante para la construcción de un modelo hidrogeológico conceptual y el estudio del flujo de fluidos de la Mesa de Los Santos, proporcionando datos cuantitativos de apertura, conectividad y permeabilidad mediante FracPaQ.
- Establecer orientaciones preferenciales y tensores de esfuerzo locales del sistema de fracturas al sur de la Mesa de Los Santos, utilizando los programas GeoRose y Wintensor.

La Mesa de Los Santos se encuentra ubicada en la zona meridional del departamento de Santander comprendiendo parte de los municipios de Los Santos, Girón y Piedecuesta. Fisiográficamente se localiza en el costado occidental de la cordillera oriental entre el piedemonte llanero y el Valle Medio del Magdalena (Figura 1). Comprende un área aproximadamente de 430 km² delimitada al norte por la quebrada los montes, al noreste por el río manco hasta la desembocadura en el río Chicamocha, del sueste al sur limita con el mismo río y al oeste con el río Sogamoso. La altura en la Mesa de Los Santos varía entre 300 y 1800 msnm.

El área de estudio se encuentra en la zona sur de la Mesa de Los Santos comprendida entre las coordenadas 1°09'69.10" a 1°11'69.10" Este y 1°23'54.35" a 1°24'97.86" Norte, con origen Bogotá, entre las cuales se encuentra el municipio de Los Santos y algunas veredas como Laguna baja y alta, El Pozo, Regadero Alto y Bajo, Espinal Alto y Bajo, Paso Chico, entre otras. La zona sur se caracteriza geomorfológicamente por tener pendientes suaves con pequeñas colinas y hacia los bordes de la mesa por tener pendientes medias a escarpadas.

3. Marco teórico

En este capítulo se definen los conceptos y métodos usados para el análisis estructural realizado de manera sencilla y clara con el fin de que el lector pueda familiarizarse con la terminología y entender en su totalidad el trabajo de investigación expuesto.

3.1 Esfuerzo y deformación

La deformación es la transformación de una geometría inicial a una final por medio de traslación, rotación, deformación (distorsión) y/o cambio de volumen de un cuerpo rígido (Fossen,

2010). Las rocas, al igual que otro material, se deforman generando estructuras observables y medibles que nos dicen algo sobre el campo de esfuerzos que experimentó la roca.

El esfuerzo en una superficie es un vector que se puede definir como la relación entre la fuerza y el área sobre la cual actúa la fuerza (Fossen, 2010). Los esfuerzos son magnitudes vectoriales que generalmente actúan oblicuas a un plano, y pueden descomponerse en esfuerzos normales perpendiculares a una superficie y esfuerzos de cizalla paralelos al mismo. Dado que en la naturaleza los esfuerzos compuestos, es importante aclarar que el esfuerzo normal es el que tiende a comprimir o separar, según sea compresivo o tensional, las dos partes del cuerpo que quedan a ambos lados del plano sobre el que actúa, mientras que el esfuerzo de cizalla tiende a romper el cuerpo por este plano y a desplazar las dos mitades del cuerpo (Martínez, 2002).

Se define entonces el estado de esfuerzo como el conjunto de los infinitos vectores esfuerzo que actúan sobre los infinitos planos que pasan por un punto en un sistema tridimensional en un instante dado. Esto ya no es una magnitud vectorial, sino una cantidad física compuesta de infinitos vectores, que se denomina tensor de esfuerzo (Martínez, 2002). Al proyectar todos los vectores esfuerzo que actúan sobre un punto en un instante dado se produce una superficie tridimensional denominada elipsoide de esfuerzos (Figura 2), mostrando que los vectores no tienen magnitudes aleatorias, sino que se encuentran relacionados unos a otros. En estudios geológicos la orientación de los vectores nos dice todo sobre el estado de esfuerzos en un momento dado en una roca, o en un volumen de roca en el que el esfuerzo es homogéneo (Fossen, 2010).

El elipsoide de esfuerzo tiene tres ejes denominados σ_1 , σ_2 y σ_3 perpendiculares entre sí. El más largo σ_1 , es la dirección de esfuerzo máximo mientras que el más corto es normal al plano a través del cual hay menos tracción que en cualquier otro plano a través del punto (σ_3).

Figura 2.*Elipsoide de esfuerzos*

Nota. Representa la magnitud y orientación de los tensores de esfuerzos principales.
Tomado de Fossen (2010).

3.2 Deformación frágil

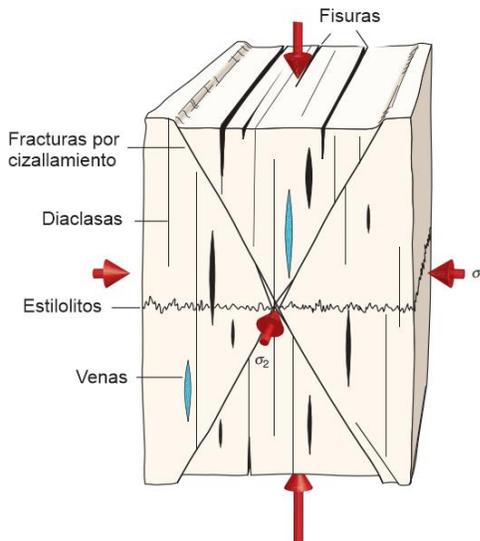
La deformación frágil es un cambio permanente en la corteza superior que se forma en áreas donde la tensión se acumula a niveles que exceden la resistencia local a la ruptura en la corteza generando un fracturamiento localizado (Fossen, 2010).

3.2.1 Estructuras de deformación frágil

3.2.1.1 Fracturas. Una fractura es cualquier discontinuidad planar o subplanar visible que separa dos cuerpos rocosos o minerales en desplazamiento y propiedades mecánicas, formándose como resultado de esfuerzos externos o internos (Fossen, 2010). Estas fracturas pueden ser clasificadas como fracturas de apertura o extensión (diaclasas, fisuras y venas) si son subparalelas al esfuerzo máximo y guardan una relación con el tensor de esfuerzo, o fracturas por cizallamiento (superficies de deslizamiento) diagonales al esfuerzo principal.

Figura 3.

Fracturas generadas por la aplicación de un sistema de esfuerzos



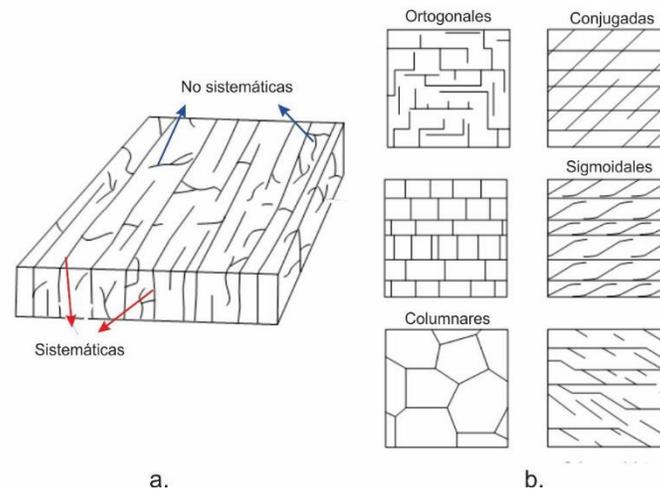
Nota. Orientación de los diferentes tipos de Fracturas generadas por la aplicación de un sistema de esfuerzos. En la imagen se muestra las fracturas de apertura o extensión generadas paralelas al esfuerzo máximo principal con abertura perpendicular al mismo esfuerzo, y fracturas por cizallamiento (shear fracture) generadas aproximadamente a 30° del esfuerzo principal. Tomado y modificado de Fossen (2010).

Las fracturas presentes en las rocas pueden ser aleatorias o sistemáticas (Van Der Pluijm & Marshak, 2004)(Figura 4) y en este último caso, si además se encuentran a escala regional, tienden a interpretarse como producto de campo de esfuerzos tectónicos (Arlegui & Simon, 1993). Las fracturas de la corteza terrestre tienen una gran influencia en el almacenamiento del agua de origen subterráneo puesto que permite que las rocas sean lo suficientemente permeables como para suministrar agua rápidamente y provocan la existencia de una porosidad suficiente como para albergar cantidad de agua aptas para su explotación (Martínez, 2002). El conocimiento de la conectividad en los sistemas de fracturas de una zona produce mejoras en los modelos

hidrogeológicos que evalúan la infiltración de la escorrentía superficial, flujo de agua subterránea y migración de sustancias contaminantes.

Figura 4.

Tipos de fractura



Nota. a. Diaclasas sistemáticas (igual tendencia en el rumbo, longitudes y separaciones) y diaclasas no sistemáticas (aleatorias) b. tipos de arreglos de diaclasas sistemáticas mostrando diaclasas ortogonales, conjugadas, sigmoidales y columnares. Tomado de Van Der Plujim & Marshak (2004).

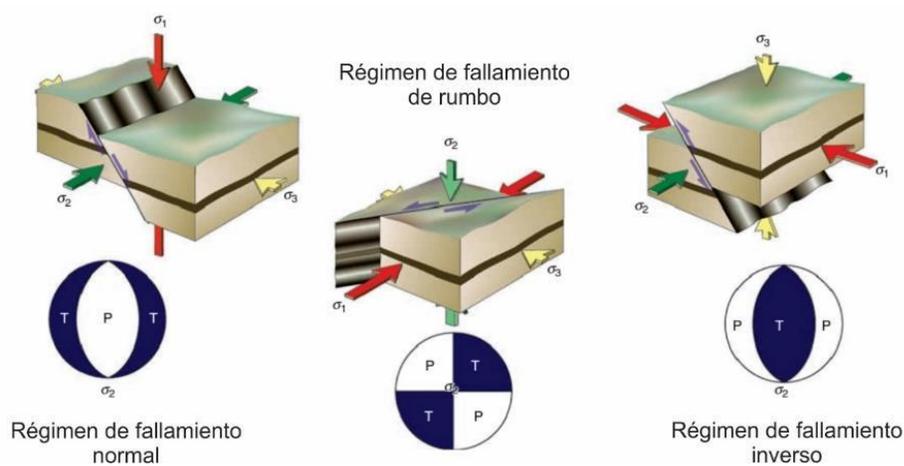
3.2.1.2 Fallas. Las fallas son fracturas de cizalla con un movimiento relativo apreciable. En rocas que no están fracturadas previamente, las fallas se crean cuando el estado de esfuerzo es tal que en planos determinados de la roca se cumple la condición de fracturación, que viene dada por la envolvente de Mohr de esa roca (Martínez, 2002).

En términos generales, se han establecido tres tipos principales de fallas las cuales cumplen con la ley de fracturamiento de Anderson (Davis et al., 2011), identificables por la inclinación del plano fracturado respecto a la horizontal y el sentido del deslizamiento de los bloques (Figura 5).

Estas son denominadas: fallas normales, que presentan un ángulo de inclinación superior a 45° respecto a la horizontal con un tensor de esfuerzo σ_1 vertical; fallas inversas, que presentan ángulos de inclinación inferiores a 45° con un tensor de esfuerzos σ_3 vertical y fallas de rumbo que presentan inclinaciones cercanas a los 90° con un σ_2 vertical (Davis et al., 2011).

Figura 5.

Relación entre los esfuerzos principales, la inclinación de las fracturas y el movimiento de las fallas



Nota. Los diagramas estereográficos representan los campos de compresión (P) y tensión (T). Tomado de Fossen (2010).

Sin embargo, el movimiento de las fallas no siempre responde a una dirección única de desplazamiento en el espacio, sino que se desliza en varias componentes al mismo tiempo, esto da como resultado fallas combinadas con deslizamientos oblicuos. Para identificar el movimiento de las fallas es importante contar con indicadores cinemáticos medidos en el terreno a estudiar.

3.3 Análisis estructural

El análisis estructural es un procedimiento que busca entender la historia deformacional de las estructuras en diferentes escalas de observación a partir de la aplicación de múltiples metodologías que permitan generar una cartografía geológica, describir la deformación, interpretar los caminos de la deformación y explicar el origen de las estructuras (Fossen, 2010; Davis et al., 2011). Según Fossen (2010) el análisis estructural se divide en un análisis geométrico, análisis cinemático y análisis dinámico.

3.3.1 Análisis geométrico

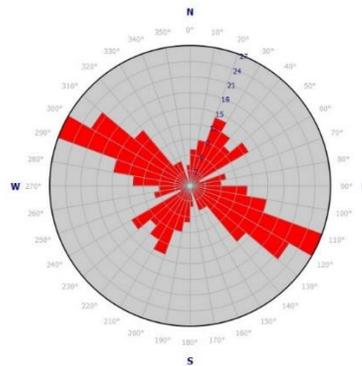
El análisis geométrico es la caracterización de la apariencia de las estructuras donde se detalla la localización, orientación geográfica, tamaño y forma de las estructuras. También se describe la relación geométrica entre la estructura principal y las estructuras secundarias.

En el análisis geométrico, es muy útil representar los datos de orientación por medio de proyecciones estereográficas. La proyección estereográfica se usa para mostrar o interpretar tanto la orientación como la geometría de las estructuras siendo el método más rápido y eficiente para presentar e interpretar datos espaciales.

- **Diagramas de rosa.** Los diagramas de rosa representan estadísticamente las tendencias principales de la orientación de los planos de fracturas medidos (strike). Los rangos de rumbo se ubican al margen del círculo desde arriba (Norte=0°) hacia abajo (Sur=180°) en sentido de las manecillas del reloj y la cantidad de datos respecto a un rumbo se miden desde el centro (0%) hacia los extremos (100%).

Figura 6.

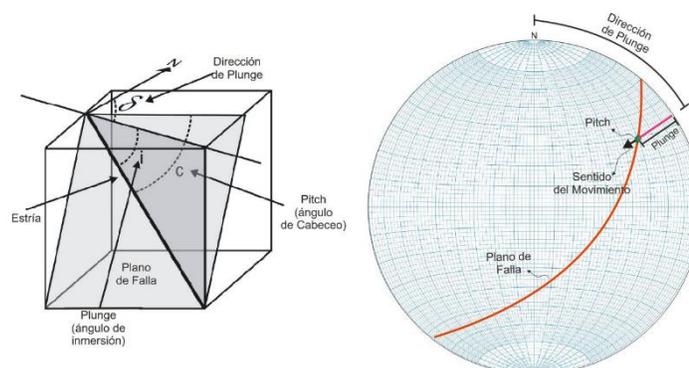
Diagrama rosa de familias de fracturas mostrando direcciones preferenciales.



- **Proyecciones estereográficas.** Las proyecciones estereográficas son una herramienta fundamental para representar datos estructurales tridimensionales en una forma gráfica bidimensional. La red estereográfica recomendada a utilizar es el Schmidt, pues permite definir la relación de los ángulos y evaluar estadísticamente los datos de orientaciones usando el contorno de esta proyección.

Figura 7.

Bloque diagrama y red estereográfica de un plano de falla



Nota. (A) Bloque diagrama que muestra los ángulos de Pitch, Plunge, y dirección de plunge de una estría de falla contenida en un plano de falla. (B) Red estereográfica que

muestra un plano de falla graficado junto con su línea de estría indicándose los ángulos de pitch y plunge y la dirección de plunge. Tomado de Vicente et al. (1992).

3.3.2 *Análisis cinemático*

El análisis cinemático determina el comportamiento de la roca durante la deformación, es decir, determina el patrón de los movimientos que se dieron en el cuerpo y al interior de él, desde un estado inicial no deformado hasta alcanzar la deformación final, sin asociar estos movimientos con esfuerzos (Davis et al., 2011).

Para la determinación de la cinemática de las fallas se debe contar con datos de diferentes planos de fallas que pertenezcan a una misma familia; esto es, aquellas que no han sido reactivadas ni reorientadas y son producto de un solo evento tectónico. Según (Huang & Angelier, 1989), es posible asignar un eje de presión y tensión causantes de la deformación si se conoce la orientación y sentido de movimiento de cada falla de una misma familia, los cuales a su vez pueden asociarse de manera indirecta con el campo de esfuerzos que causa o controla el fracturamiento. El análisis cinemático se efectúa a partir del estudio de indicadores cinemáticos en las estructuras.

3.3.2.1 Indicadores Cinemáticos. Los indicadores cinemáticos son evidencias físicas de campo que permiten conocer la cinemática (movimiento) de una falla. Corresponden a una serie de evidencias tangibles que suelen aparecer a lo largo de cualquier superficie donde haya ocurrido algún tipo de desplazamiento tectónico.

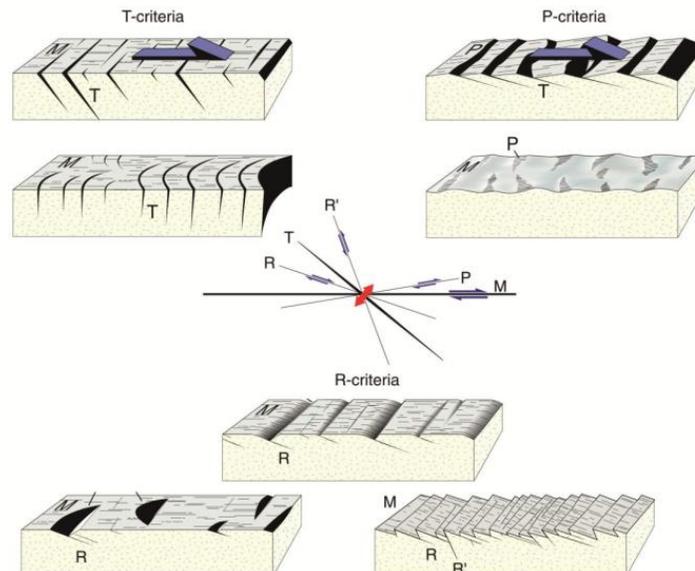
- **Estrías de falla.** Las estrías de falla son uno de los principales indicadores de la presencia de planos de falla, para tratarlas se tiene en cuenta la relación de los ángulos que forma la línea tanto con el rumbo del plano de falla (pitch o rake) (Figura 7).

- **Fracturas secundarias.** Son pequeñas fracturas que se forman a lo largo de la superficie del plano de falla (Figura 8), muestran un arreglo geométrico característico y dan información del sentido del deslizamiento de falla. Existen varios tipos de fracturas secundarias:

- ✓ Fracturas R: (Riedel) Son sintéticas con el movimiento principal formando un ángulo de $\sim 15^\circ$ con la falla principal.
- ✓ Fracturas R': (Antiriedel) Fracturas con movimiento antitético respecto de la falla principal, con la cual forma un ángulo $\sim 75^\circ$.
- ✓ Fracturas T: Pequeñas fracturas de extensión, normalmente mineralizadas de cuarzo o carbonatos presentando inclinaciones de 45° respecto a la superficie de deslizamiento.
- ✓ Fracturas P: Se originan por presión local entre fracturas riedel. Presentan un ángulo de $\sim 15^\circ$, pero en sentido contrario a las fracturas R.

Figura 8.

Arreglo geométrico característico de fracturas secundarias



Nota. Criterios cinemáticos para una falla dextral. M es el plano principal estriado.
Tomado de Fossen (2010).

3.3.2.2 Análisis poblacional de fallas. Los métodos de análisis poblacional de fallas proporcionan el tensor de esfuerzos y/o paleoesfuerzos reducidos que actúa o actuaron en determinada zona. Comúnmente nos encontramos con zonas donde han actuado varios eventos de deformación, probablemente causados por distintos campos de esfuerzos.

Con las observaciones de campo es posible definir la cinemática y temporalidad de la deformación, siendo esta la mejor forma de establecerlas, sin embargo, no siempre se cuentan con las condiciones necesarias para ello (Velandia, 2017). El avance tecnológico hace de los softwares una herramienta importante, que en este caso, procesa los datos estructurales y desarrolla una homogenización de los mismos, conformando grupos que son compatibles con determinadas condiciones mecánicas, reológicas y de campos de esfuerzos, logrando así la obtención de tensores actuales y paleoesfuerzos basándose en los principios, conceptos, mecanismos y ecuaciones definidos desde los años 50s tales como los citados en Velandia (2017): Wallace (1951); Anderson (1951); Bott (1959); Etchecopar et al. (1981); Angelier (1994); Mostafa (2005); entre otros.

El presente trabajo de investigación se basa en la metodología para obtención de tensores de esfuerzo a partir de la inversión de indicadores cinemáticos usando el software Win-Tensor 5.8.9 presentada en Velandia (2017) en el cual cita a Angelier (1994) para establecer que: Para el cálculo de un tensor de esfuerzos se requieren como mínimo cuatro planos que preferiblemente tengan distinta orientación, de tal manera que:

- Representen los tres esfuerzos principales ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$).
- Representen la relación de los tres esfuerzos principales (R):

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

- Representen el índice R' donde:
 - ✓ R' = R indica Extensión.
 - ✓ R' = 2-R indica Transcurrencia.
 - ✓ R' = 2+R indica Compresión.

Este índice permite identificar directamente el régimen de esfuerzos asociado de tal manera que:

Tabla 1.

Régimen de esfuerzos a partir del índice R'

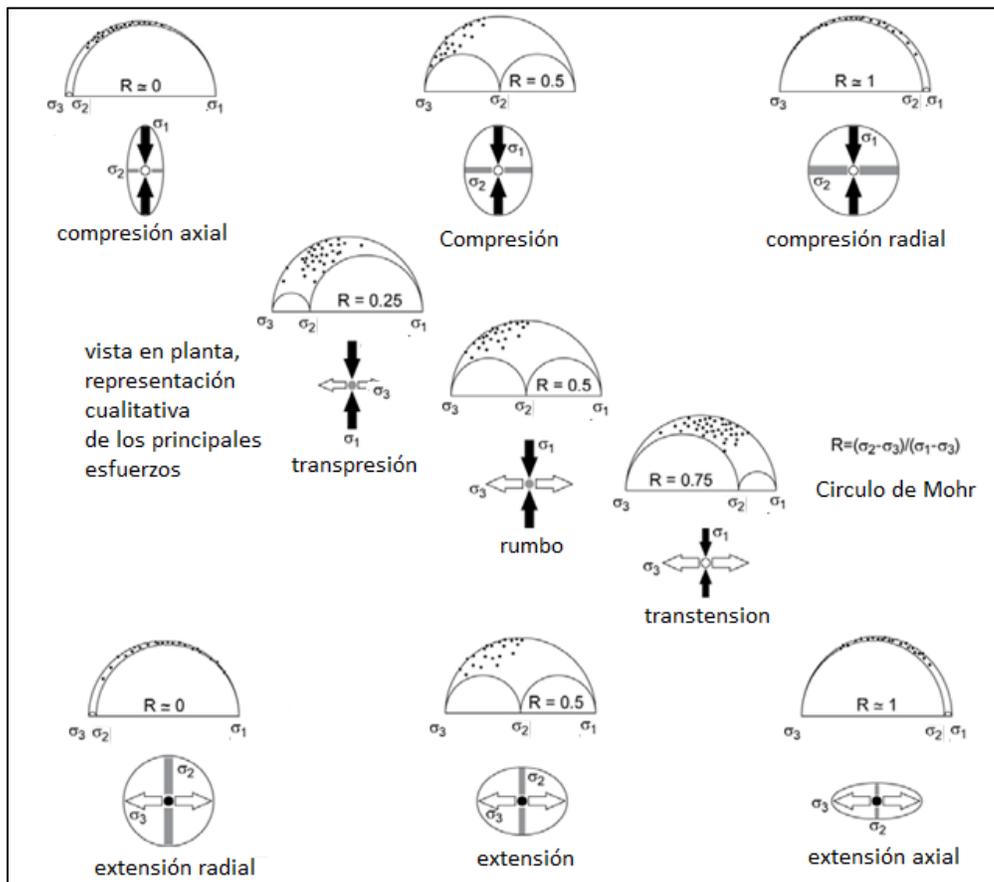
Índice R'	σ_x En la Vertical	Régimen de Esfuerzos
0-0.25	σ_1 en la vertical	Extensión radial
0.25-0.75	σ_1 en la vertical	Extensión Pura
0.75-1.25	σ_1 o σ_2 en la vertical	Transtensión
1.25-1.75	σ_2 en la vertical	Transcurrencia pura
1.75-2.25	σ_2 o σ_3 en la vertical	Transpresión
2.25-2.75	σ_3 en la vertical	Compresión pura
2.75-3.00	σ_1 en la vertical	Compresión radial

Nota. Tomado y adaptado de Delvaux et al. (1997), citado en Velandia (2017).

Así mismo, Las relaciones de los esfuerzos principales σ_1 , σ_2 y σ_3 , representadas en el círculo de Mohr junto con el índice R' muestran el régimen de esfuerzos que actuaron en la formación de las fallas.

Figura 9.

Régimen de esfuerzos definidos por el cálculo de las relaciones de los esfuerzos principales σ_1 , σ_2 y σ_3 mediante el círculo de Mohr.



Nota. Tomado de Castellanos y Cetina (2013), adaptado de Burg, 2011

3.4 Análisis del sistema de fracturas

Un rastro o traza de fractura “*fracture trace*” es la expresión superficial comúnmente observada de una fractura, es decir, la intersección de una fractura con una superficie expuesta, como un afloramiento de roca o una pared de mina (Mauldon et al., 2001).

A menudo, las orientaciones, los tamaños y las distribuciones espaciales de las trazas de fractura exhiben algún tipo de orden obedeciendo la historia tectónica de la región. La evaluación de estos patrones se realiza a través de diferentes metodologías con el fin de muestrear una superficie de roca expuesta, que en sí misma representa una muestra de la población de trazas subyacente para el plano coincidente.

Las trazas visibles se pueden usar para estimar los parámetros de población de trazas reales si se reconocen y corrigen los sesgos de la muestra. Estas relaciones son importantes porque las propiedades mecánicas y de transporte (por ejemplo, fluidos, calor) de la roca dependen de estos atributos y patrones de fractura (Healy et al., 2017).

3.4.1 Características geológicas y geomecánicas de las fracturas

3.4.1.1 Atributos geológicos. Entre los atributos geológicos se encuentran la litología y el espesor que ejercen una influencia al caracterizar la resistencia a la compresión que puede presentar una determinada roca y se puede estimar a partir de la dureza superficial de las mismas. Adicionalmente, se ha encontrado relación entre el espesor de la capa mecánica y las variaciones en la intensidad de la fractura (Ortega et al., 2006), sin embargo, aún sigue en estudio el posible patrón de control geológico.

3.4.1.2 Orientación. La orientación de una discontinuidad en el espacio se describe por el buzamiento (B) de la línea de declinación más pronunciada medida desde la horizontal, y por la

dirección del buzamiento (ΔB) medida en sentido horario desde el verdadero norte mediante la relación ($\Delta B/B$) (Barton, 1978).

3.4.1.3 Meteorización. Se describe como las modificaciones experimentadas en las rocas en su composición o estructura por la acción de agentes atmosféricos sin remoción de material. Desde el punto de vista de la mecánica de rocas, la importancia de la meteorización radica en los profundos cambios realizados en las propiedades físicas y mecánicas de los materiales rocosos (Ramírez & Alejano, 2004). La desintegración de origen físico provocada por la meteorización afecta la parte más superficial de los macizos rocosos y favorece la penetración del agua que puede dar lugar a la descomposición de los materiales constituyentes mediante cambios químicos en las rocas (Ramírez y Alejano, 2004).

En consecuencia, la meteorización de la roca fresca pasa gradualmente a suelo residual a través de estados intermedios. Las escalas de meteorización se basan en la descripción de estos estados y son normalmente utilizadas en mecánica de rocas. A continuación, se presenta la escala de estimación de la meteorización de un macizo rocoso basada en su descripción visual según parámetros de la ISRM publicados por Barton (1978) (Figura 10).

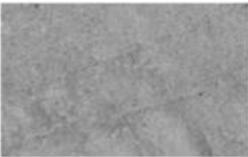
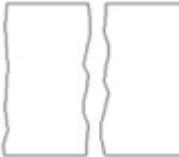
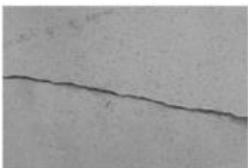
Figura 10.*Estimación de la meteorización del macizo rocoso*

Término	Descripción	Grado
Fresca	Sin signos visibles de meteorización. Quizás leve decoloración en las superficies de discontinuidades mayores.	I
Levemente meteorizada	Decoloración indica meteorización de la roca y de las superficies de las discontinuidades. Toda la roca puede estar decolorada por meteorización y puede estar más débil externamente que en su condición fresca.	II
Moderadamente meteorizada	Menos de la mitad de la roca está descompuesta y/o desintegrada a suelo. Roca fresca o decolorada está presente como un marco continuo.	III
Altamente meteorizada	Más de la mitad de la roca está descompuesta y/o desintegrada a suelo. Roca fresca o decolorada está presente como un marco discontinuo.	IV
Completamente meteorizada	Toda la roca está descompuesta y/o desintegrada a suelo. La estructura original del macizo está aún en gran parte intacta.	V
Suelo residual	Toda la roca está convertida a suelo. La estructura del macizo y la fábrica está destruida. Hay un gran cambio en el volumen, pero el suelo no ha sido transportado significativamente.	VI

Nota. Tomado de las publicaciones de la ISRM, Barton (1978).

3.4.1.4 Apertura. La apertura o abertura se conoce como la distancia perpendicular medida entre las paredes adyacentes de una discontinuidad en un macizo rocoso (Barton, 1978). Según esta característica, las discontinuidades pueden ser clasificadas en cerradas, abiertas o rellenas (Tabla 2).

Tabla 2.*Clasificación de las aperturas*

<p>Discontinuidad cerrada: no hay nada ni material ni hueco entre los labios de la discontinuidad</p>		
<p>Discontinuidad abierta: existe una distancia entre ambos labios de la discontinuidad, sin ningún tipo de material</p>		
<p>Discontinuidad rellena: existe un material de rellano entre ambos lados de la discontinuidad.</p>		

Nota. Modificado de Ramírez y Alejano (2004).

Las aperturas también pueden ser clasificadas siguiendo los siguientes parámetros y terminología recomendada por la ISRM:

Tabla 3.

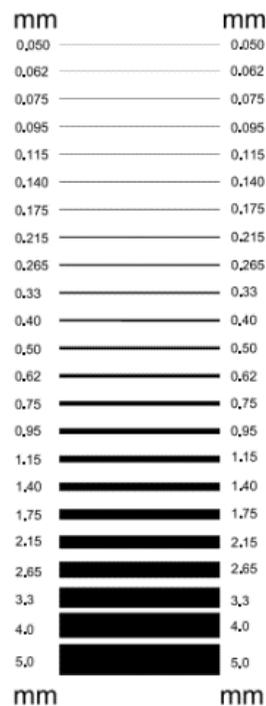
Descripción y aspecto de las aperturas

Apertura	Descripción	Aspecto
<0.1 mm	Muy cerrada	Cerrado
0.1-0.25 mm	Cerrada	
0.25-0.5 mm	Parcialmente abierta	
0.5-2.5 mm	Abierta	De hendidura
2.5-10 mm	Moderadamente ancha	
>10 mm	Ancha	
1-10 cm	Muy ancha	Abierto
10-100 cm	Extremadamente ancha	
>1 cm	Cavernosa	

En campo, la apertura de la fractura se midió utilizando un comparador graduado logarítmicamente propuesto por Ortega et al. (2006), el cual se calibró para la precisión en su uso, el empleo de esta herramienta junto con una lupa manual permitió documentar aperturas de fractura tan pequeñas como aproximadamente 0.05 mm en afloramientos suficientemente expuestos en campo. Los incrementos en el ancho de línea representan múltiplos aproximadamente uniformes entre sí y, por lo tanto, están espaciados igualmente cuando se trazan en un eje logarítmico. De esta manera, las aperturas se pueden medir con una precisión constante (Ortega et al., 2006).

Figura 11.

Comparador de apertura de fractura



Nota. Tomado de Ortega et al. (2006).

3.4.1.5 Relleno. Relleno es el término para el material que separa las paredes de roca adyacentes de las discontinuidades, por ejemplo, calcita, clorita, arcilla, limo, gouge de

falla (Salbanda), brecha, entre otros. La distancia perpendicular entre las paredes de roca adyacentes se denomina ancho de la discontinuidad llena, en lugar de la apertura de un espacio abierto.

3.4.2 Métodos de muestreo y parámetros para la caracterización de fracturas halladas en un afloramiento

La evaluación del grado de fractura en el subsuelo se puede estimar a partir de la caracterización de los sistemas de fractura de afloramientos análogos (Zeeb et al., 2013) mediante la adquisición de datos geométricos de trazas de fractura visibles y el posterior procesamiento de las mismas para encontrar distribuciones estadísticas y relaciones entre parámetros.

Para describir la cantidad de fracturamiento en una roca se cuentan con diferentes métodos de muestreo lineal o areal, siendo los más utilizados: (1) Muestreo de línea de exploración “Scanline Sampling” (2) Muestreo de ventana y (3) Método de líneas de muestreo circular y ventanas circulares “Estimator Circular”. Estos métodos han sido previamente evaluados (por ejemplo; (Rohrbaugh et al., 2002), (Zeeb et al., 2013)) proporcionando una revisión a fondo del uso, la aplicabilidad y las limitaciones de los mismos para la caracterización de redes de fracturas en afloramientos.

A partir de esta información se concluye que el método más adecuado a utilizar en este proyecto es el Método de líneas de muestreo circular y ventanas circulares aplicado a afloramientos de igual litología, el cual se realiza a través del programa FracPaQ.

La caracterización de estos sistemas de fractura cuenta con la descripción de parámetros claves como Intensidad, Densidad, Tamaño de fractura, Conectividad y Permeabilidad, los cuales

puede proporcionar información valiosa para los modelos de reservorios subterráneos (Zeeb et al., 2013).

3.4.2.1 Líneas de muestreo circular y ventanas circulares. Las líneas de muestreo (Scanline) y ventanas circulares fueron propuestas por Mauldon et al., (2001) como una herramienta de muestreo eficiente para estimar medidas de abundancia de fracturas en dos dimensiones.

Su propósito principal es la caracterización sistemática y eficiente de los sistemas de fractura reduciendo significativamente el sesgo por orientación, el sesgo por censuramiento y el sesgo por longitud (problemas generados por la limitada exposición del mismo) que afectan a las técnicas de medición de líneas de muestreo comunes.

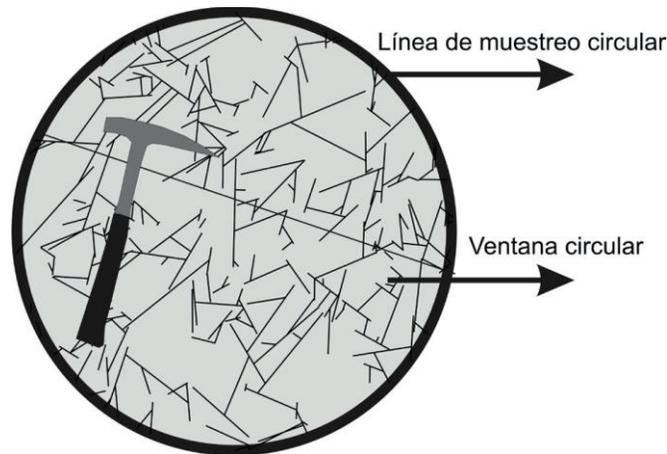
Para ello se traza una línea de muestreo circular que consiste en un círculo dibujado sobre la superficie estructural del afloramiento en donde se desarrollan las trazas de fractura o sobre una imagen digitalizada de la misma, sobre la cual se hallan parámetros posteriormente explicados que describen el sistema de fracturas. La ventana circular corresponde al área encerrada por la línea de muestreo circular que debe ser una representación significativa del afloramiento y por tanto de la zona. Para ello, se debe considerar diversos afloramientos con el fin de escoger la mejor exposición del sistema de fracturamiento del cual se obtendrán las estimaciones de parámetros que permiten caracterizar de forma completa el sistema de fracturamiento en estudio.

- **Intensidad de fracturamiento.** Es la cantidad de fracturas promedio (paralelas y no paralelas) a través de una línea de muestreo definida en alguna dirección determinada (Moreno & García, 2006). La intensidad de fracturamiento es una medida de la abundancia

de fracturas y generalmente se define como el número de fracturas por la longitud de la línea de muestreo.

Figura 12.

Línea de muestreo y ventana circular



Nota. Estas técnicas de muestreo dependen exclusivamente del radio del círculo y de la ubicación del centro. Debido a la configuración geométrica de estas ventanas el sesgo por orientación se elimina de forma automática. Tomado de Moreno & García (2006).

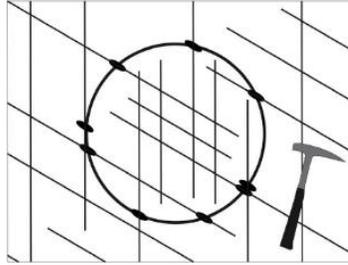
Para hallar la intensidad de fracturamiento mediante las líneas de muestreo circulares se debe determinar el número de intersecciones entre las fracturas y la circunferencia externa (Figura 13). Con este conteo la intensidad se puede calcular mediante la expresión:

$$I = \frac{n}{4r}$$

n = número de intersecciones

r = radio de la circunferencia usada

Mauldon et al. (2001) recomienda trazar varias líneas de exploración circular para obtener una estimación de intensidad mejorada, práctica que es utilizada por el software FracPaQ.

Figura 13.*Intensidad de fracturamiento*

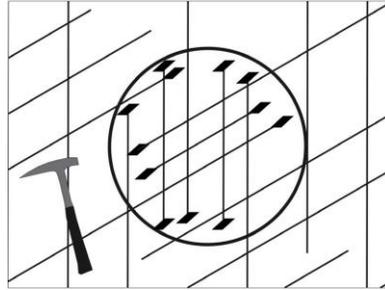
Nota. Los óvalos sólidos representan intersecciones de la línea de muestre circular con las trazas de fractura. Tomado de Moreno & García (2006).

- **Densidad de fracturamiento.** La densidad de fracturamiento hace referencia al número de fracturas por unidad de área. La estimación de la densidad se realiza a través de la ventana circular usando la asociación entre extremos de trazas y centros de trazas (Mauldon et al., 2001) y es determinada por medio de la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{m}{2\pi r^2}$$

m = número de inicios y terminaciones de las fracturas dentro de la ventana de muestra (Figura 14)

r = radio de la circunferencia usada

Figura 14.*Densidad de fracturamiento*

Nota. Número de puntos terminales que caen dentro de la ventana circular (rombos solidos). Tomado de Moreno & García (2006).

- **Longitud promedio.** Para esta medida se realiza una aproximación con la ventana de muestra, en la cual se consideran tanto las intersecciones de las fracturas con la circunferencia externa (n), como el número de puntos terminales que caen dentro de la misma (m) y el radio de circunferencia (r), como muestra la siguiente ecuación:

$$\mu = \frac{\pi r}{2} \left(\frac{n}{m} \right)$$

La ecuación anterior es dimensionalmente correcta y las unidades obtenidas corresponden a unidades de longitud.

3.4.3 Métodos de procesamiento

3.4.3.1 FracPaQ. FracPaQ, es una caja de herramientas (Toolbox) de código abierto escrita en el entorno informático técnico de MATLAB™ diseñada para cuantificar patrones de fractura en rocas a partir de imágenes 2D.

La caja de herramientas comprende un conjunto de scripts basados en métodos cuantitativos publicados previamente para el análisis de atributos de fractura como intensidad, densidad, conectividad y permeabilidad.

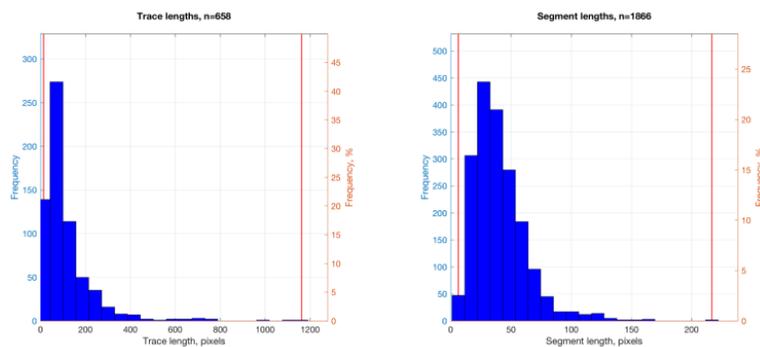
El software proporciona una metodología objetiva y consistente para cuantificar las medidas que describen los patrones de fractura y sus variaciones en 2-D en una amplia gama de escalas de longitud, tipos de rocas y configuraciones tectónicas (Healy et al., 2017)

A continuación, se describen los archivos de salida generados en el programa con sus respectivas técnicas de procesamiento:

- **Estadísticas de longitud.** Las funciones del programa permiten cuantificar la distribución de longitud en una red de fractura mediante histogramas de longitudes y log-log de datos de longitud. Se producen gráficos separados para trazas de fractura y segmentos de fractura (longitud de traza = suma de longitudes de segmento).

Figura 15.

Histogramas de Longitud

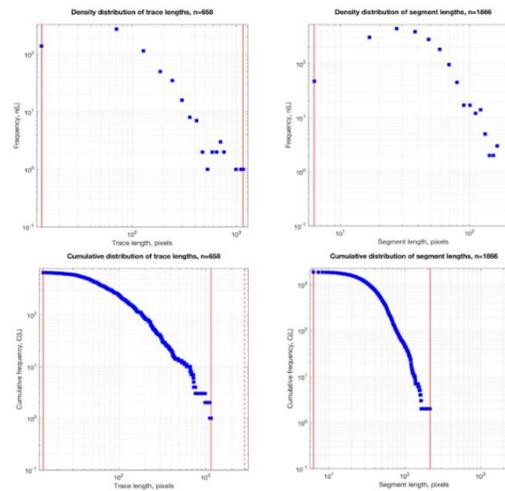


Nota. El lado izquierdo muestra el histograma de tamaño de frecuencia para trazas de longitud. El lado derecho muestra el histograma de frecuencia de frecuencias para

segmentos de longitud. Las líneas rojas muestran las longitudes mínima y máxima. Tomado de la guía de usuario de FracPaQ (2019).

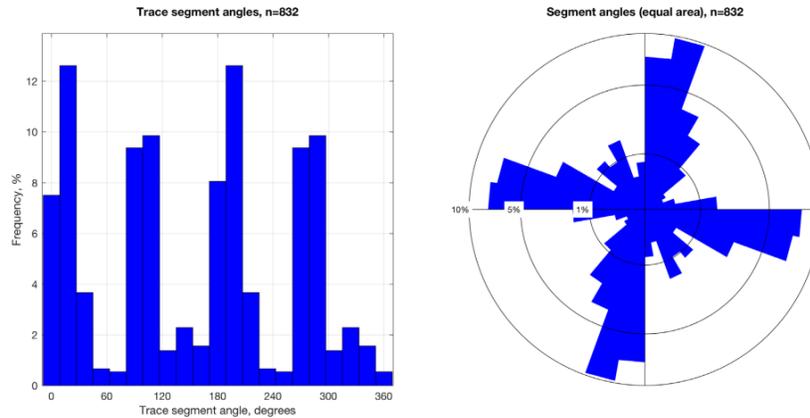
Figura 16.

Gráficos log-log de longitud



Nota. Gráficos log-log de densidad y distribuciones acumulativas vs trazas y longitudes de segmento. Las líneas continuas rojas muestran las longitudes mínima y máxima, y la línea discontinua muestra la longitud máxima posible para esta área. Tomado de la guía de usuario de FracPaQ (2019).

- **Estadísticas de orientación.** FracPaQ proporciona dos gráficos de datos de orientación derivados de los ángulos de los segmentos de traza: Histogramas de ángulos de segmentos y diagramas de rosa. Los ángulos de segmento se calculan con respecto al eje Y, tomando como positivo el movimiento en sentido horario. En caso de que el eje Y no esté alineado hacia el norte, se permite ingresar la corrección con la respectiva rotación desde el norte. Este número se resta a cada uno de los ángulos del segmento para producir una gráfica "corregida".

Figura 17.*Histograma y diagrama rosa*

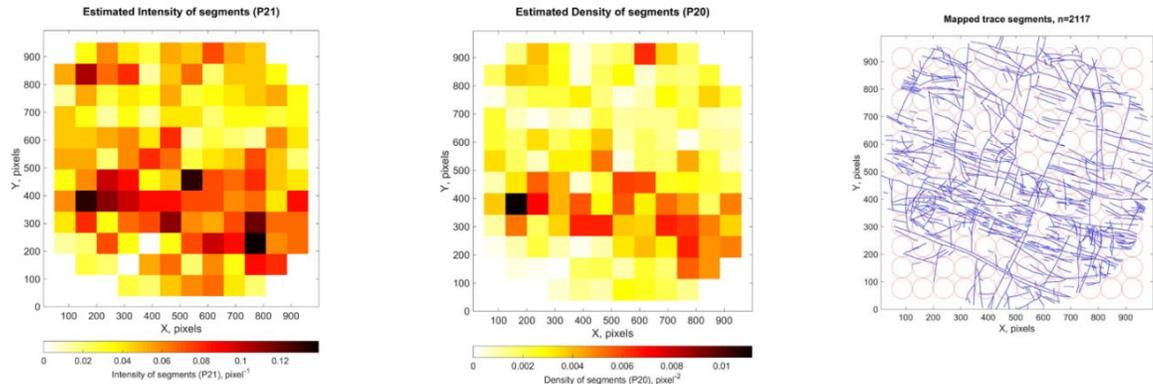
Nota. A la izquierda se muestra un histograma de ángulos de segmento y a la derecha un diagrama de rosas de área igual de los mismos datos. Tomado de la guía de usuario de FracPaQ (2019).

- **Intensidad y densidad.** Para realizar estimaciones de intensidad y densidad, FracPaQ emplea el método de líneas de muestreo circular y ventanas circulares de Mauldon et al. (2001) explicado anteriormente con cada una de las imágenes digitalizadas. Las estimaciones de intensidad y densidad se realizan en un patrón de cuadrícula regular utilizando el número de círculos de escaneo especificados por el usuario.

El código dibuja círculos de exploración (Figura 18) en las direcciones X y Y, y cuenta las intersecciones de segmentos de fractura con el perímetro del círculo (n) y el número de segmentos que terminan dentro del círculo (m). Estas medidas se utilizan para estimar la intensidad (unidades de L^{-1}) y la densidad (unidades de L^{-2}) de las ecuaciones en Mauldon et al. (2001).

Figura 18.

Mapas de intensidad, densidad y círculos de exploración



Nota. El lado izquierdo muestra un mapa de intensidad estimada (P21, m^{-1}). El centro muestra un mapa de densidad estimada (P20, m^{-2}). El lado derecho muestra las posiciones y los tamaños de los círculos de exploración utilizados en las estimaciones. Tomado de la guía de usuario de FracPaQ (2019).

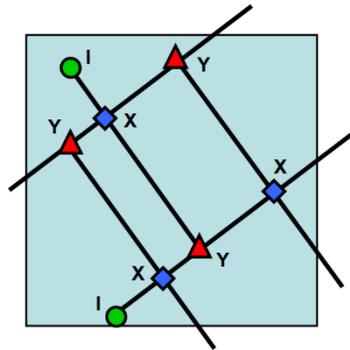
- **Conectividad.** Los mapas de patrones de fractura pueden proporcionar restricciones importantes sobre la capacidad de una masa de roca para conducir fluidos en el subsuelo (Healy & Rizzo, 2019); es por esto que FracPaQ proporciona dos gráficos directamente relevantes para los estudios de flujo de fluido en rocas fracturadas: el triángulo de conectividad y la elipse tensor de permeabilidad 2D.

La conectividad se evalúa a través de la topología, la cual describe la relación entre fracturas individuales en un sistema de fractura usando el gráfico ternario de conectividad propuesto por (Manzocchi, 2002). El gráfico cuenta con tres vértices que denota los nodos I (para extremos aislados de trazas), Y (para puntos de ramificación, aplastamientos o estribos) y X (para intersecciones transversales). De esta manera, las redes más conectadas

se trazarán hacia la línea Y-X, en la parte inferior de este diagrama, mientras que las redes menos conectadas se trazarán hacia el vértice I.

Figura 19.

Topología de red definida por la disposición de líneas y nodos

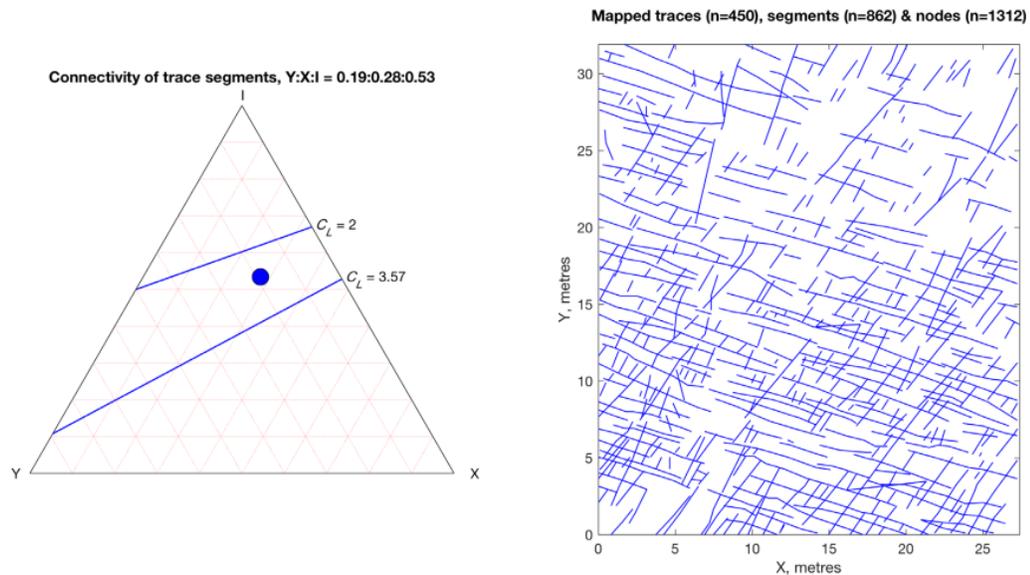


Nota. Representación esquemática de una red de fracturas. Tomado de Sanderson & Nixon (2015).

FracPaQ recorre toda la estructura de datos de trazas y segmentos de fracturas y encuentra las intersecciones mutuas; Luego calcula las proporciones relativas de los nodos I, Y y X con respecto al número total de intersecciones encontradas, y traza el triángulo de conectividad. Además, se visualizan dos líneas de conectividad de "contorno", para $CL = 2.0$ y 3.57 donde CL es el número promedio de conexiones (intersecciones) por línea (o trazo) (Sanderson & Nixon, 2015). CL se define como:

$$CL = 4 (N_y + N_x) / (N_I + N_y)$$

donde N_j se refiere al número (no la proporción) de nodos de tipo j .

Figura 20.*Grafica ternaria de conectividad*

Nota. Gráfica ternaria de la conectividad del segmento de fractura (izquierda) para el patrón de fractura que se muestra en el mapa (derecha). También se muestran dos líneas de contorno para Conexiones por línea (CL), utilizando valores indicativos descritos por Sanderson & Nixon (2015). Tomado de la guía de usuario de FracPaQ (2019).

Si la conductividad hidráulica de las fracturas difiere significativamente de la de la matriz de roca (ya sea mayor o menor), entonces la conectividad tiene implicaciones para el flujo de fluido a través de la masa de roca (Healy & Rizzo, 2019).

- **Crack tensor y permeabilidad.** Para estimar la permeabilidad de un sistema de fracturas en dos dimensiones FracPaQ utiliza la medida del tensor de fracturas de las líneas trazadas y genera dos gráficos de anisotropía de permeabilidad, uno en dirección del flujo y otro en la dirección del gradiente de presión del fluido (Healy & Rizzo, 2019).

El tensor de fractura utilizado proviene de Oda (1983) quien ha propuesto una ecuación para caracterizar la geometría de las discontinuidades llamada “crack tensor” o tensor de fractura a través de la expresión:

$$P_{ij} = \left(\frac{\pi}{4}\right) * \rho * R^2 * T^3 * N_{ij}$$

Donde ρ es la densidad de las fracturas (número por unidad de área), R^2 es la media de las longitudes al cuadrado de las fracturas, T^3 es la media de las aperturas al cubo de las fracturas (actualmente FracPaQ supone una apertura constante aplicada a todas las fracturas en la red). y N_{ij} es la matriz de orientación.

De esta manera, el tensor de fractura incorpora información sobre tamaños de fractura (longitudes), orientaciones (ángulos) y densidades espaciales en una sola medida adimensional del patrón de fractura (Oda, 1983). Este puede evaluarse como un tensor de segundo, cuarto o mayor rango, dependiendo de los datos disponibles. FracPaQ usa una aproximación de tensor de segundo rango y calcula la anisotropía de la permeabilidad en 2D.

La estimación del tensor de permeabilidad k_{ij} de segundo orden para el flujo de fluido en medios fracturados ha sido formulada tomando el tensor P_{ij} (Suzuki et al., 1998), siguiendo la expresión:

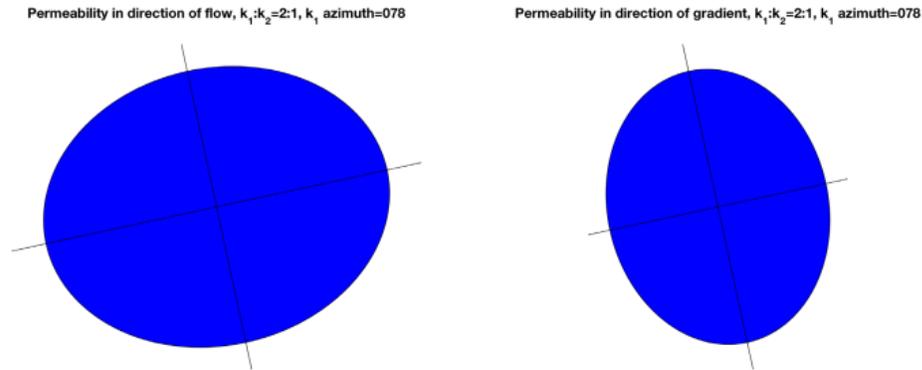
$$k_{ij} = \frac{\lambda}{12} (P_{kk} \delta_{ij} - P_{ij})$$

Donde λ es una constante empírica que puede usarse para modelar el grado de conectividad en la red de fracturas, por ejemplo, una red totalmente conectada tiene $\lambda = 1$ y δ , es el delta de Kronecker, siendo $\delta_{ij} = 1$ cuando $i = j$, y $\delta_{ij} = 0$ cuando $i \neq j$.

Esta ecuación es basada en los supuestos de que: (1) cada grieta está idealizada por un conjunto de placas paralelas con una apertura uniforme (apertura predeterminada constante por FracPaQ en 1×10^{-3} metros = 1 mm. También se pueden usar aperturas escaladas), (2) la matriz sólida es impermeable, (3) el gradiente hidráulico está uniformemente distribuido en toda la región, (4) El flujo de filtración a través de una grieta puede tratarse como flujo laminar y (5) no hay pérdida de carga en las intersecciones entre grietas.

A partir de esta medida se muestra la elipse para la permeabilidad en dirección del flujo, siguiendo a Long et al. (1982) quien toma los ejes de la elipse como $\sqrt{k_1}$ y $\sqrt{k_2}$, donde k_1 es la permeabilidad máxima y k_2 es el mínimo siguiendo la ecuación de la ley de Darcy y la elipse de permeabilidad del gradiente con ejes de longitudes $1/\sqrt{k_1}$ y $1/\sqrt{k_2}$.

Para la permeabilidad medida en la dirección del flujo, el eje principal del elipsoide está en la dirección de máxima permeabilidad. Para la permeabilidad medida en la dirección del gradiente, el eje mayor de los elipsoides en la dirección de mínima permeabilidad (Long et al., 1982).

Figura 21.*Elipses de permeabilidad*

Nota. Permeabilidad de una red de fracturas, trazada como elipses 2D para visualizar la anisotropía en la dirección del flujo (izquierda) y la dirección del gradiente de presión (derecha). Tomado de la guía de usuario de FracPaQ (2019).

4. Geología de la Mesa de Los Santos

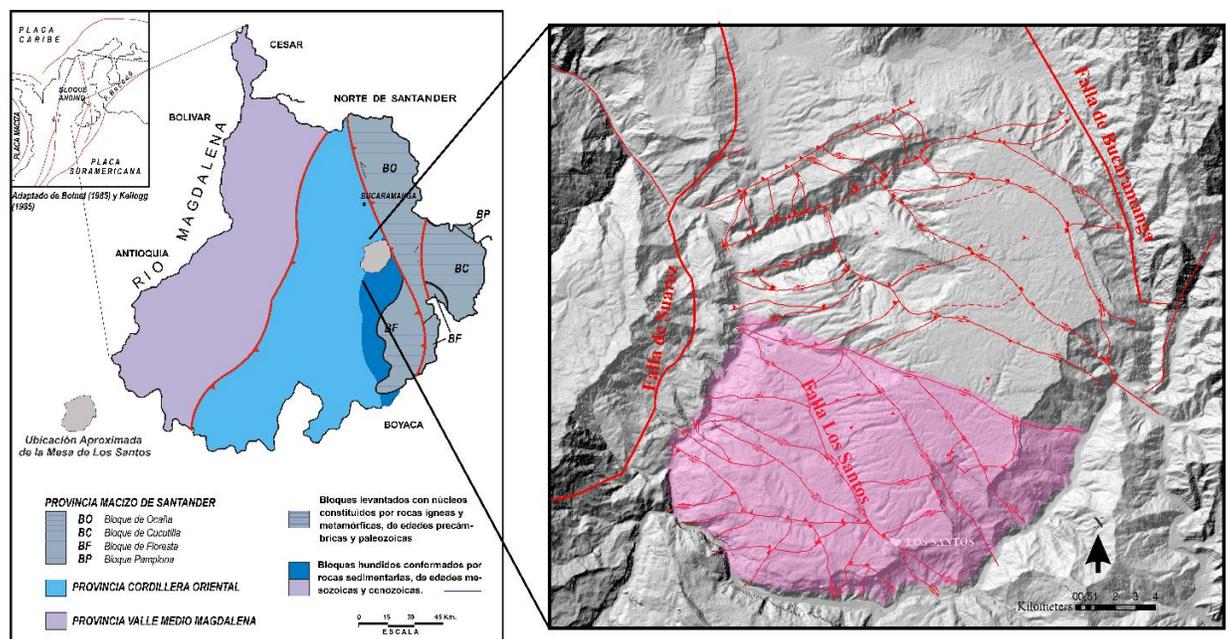
La Mesa de Los Santos cuenta con estudios geológicos de diferentes enfoques, sin embargo, se tuvo en cuenta los trabajos destacados y afines al presente proyecto, entre los cuales se encuentra los estudios geológicos y cartográficos realizados por Julivert et al. (1958); Julivert et al. (1964); Clavijo y Royero (2001) y trabajos de grado como el de Vargas (2008). Así mismo, sobresalen estudios de enfoque estructural con fines hidrogeológicos como el de Velandia (2010) y el trabajo de grado realizado por Contreras (2008). A estos estudios se suman las investigaciones netamente hidrogeológicas entre las cuales se encuentra: Pinto et al. (2007); Díaz et al. (2009) y Morales et al. (2010).

4.1 Evolución geológica

La Mesa de Los Santos se encuentra ubicada dentro de la zona tectonoestratigráfica central del departamento de Santander y pertenece al área de bloques hundidos conformadas por rocas sedimentarias de edades Mesozoicas y Cenozoicas (Clavijo & Royero, 2001). Las fallas principales que la rodean son la Falla de Suarez y la Falla de Bucaramanga.

Figura 22.

Esquema tectónico de Santander y la Mesa de Los Santos.



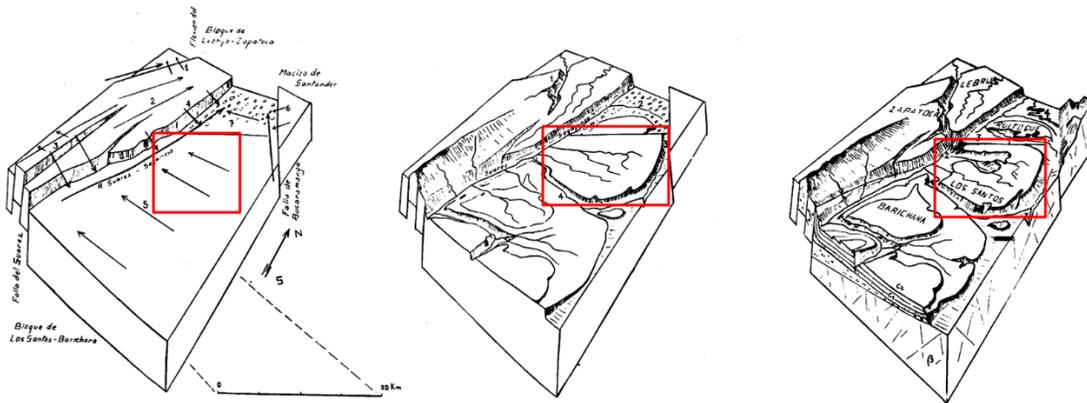
Nota. A la izquierda, la Mesa de Los Santos en el esquema tectónico de Santander, tomado y modificado de Clavijo y Royero (2001). A la derecha, un bosquejo tectónico de la Mesa de Los Santos. La sombra rosada indica el área de estudio del presente trabajo

Julivert (1958) Describe la evolución de la Mesa de Los Santos y la define como parte del paisaje morfoestructural de las mesas al oeste de Bucaramanga, caracterizada por la formación de cañones a través de la erosión fluvial de los principales ríos Chicamocha, Suarez y Sogamoso

(Figura 1), los cuales siguen las fallas principales socavando y fragmentando. Como etapa inicial, se da el basculamiento y fracturamiento hacia el occidente generando drenajes consecuentes con direcciones NE y NW evolucionando la superficie. La elevación de la plataforma continúa con la socavación de los ríos. el río Chicamocha toma dirección E-W y el río Sogamoso se mantiene con la dirección de la Falla de Suarez (Julivert, 1958).

Figura 23.

Evolución Morfoestructural de las mesas.



Nota. El rectángulo rojo señala la Mesa de Los Santos. Tomado y editado de Julivert (1958).

4.2 Estratigrafía

La siguiente descripción geológica abarca todas las formaciones presentes en la Mesa de Los Santos en orden estratigráfico ascendente, sin embargo, se enfatiza en las formaciones Los Santos y Rosablanca, formaciones de interés del presente proyecto de investigación.

- **Formación Silgará (OSs):** Edad entre el Cámbrico al Ordovícico (Ward et al., 1973). Se presenta en el borde este y sureste de la Mesa de Los Santos. Constituida por rocas metamórficas de estructura esquistosa fina y bien definida conformados por esquistos

micáceos cloríticos con granate de textura lepidoblásticas. Presenta baja porosidad primaria y alta porosidad secundaria debido a su alto fracturamiento (Pinto et al., 2007).

- **Granito de Pescadero (J1gp):** La edad corresponde al Jurásico Temprano (Ward et al., 1973). Aflora al este de la Mesa de Los Santos mostrándose como cuerpos alargados intrusivos de orientación N-S. Conformado por una roca ígnea de textura porfirítica a afanítica, con una composición mineralógica tales como el feldespatos potásico, cuarzo, biotita y moscovita de grano grueso. Únicamente presenta porosidad secundaria (Pinto et al., 2007).
- **Formación Jordán (J1-2j):** Nombrada y descrita por Cediel (1968) en la pendiente norte del cañón de Chicamocha a 1 km del municipio de Jordán – Santander. De edad Jurásico Inferior y Medio a partir de sus relaciones estratigráficas (Clavijo & Royero, 2001). En la Mesa de Los Santos aflora en la vertiente del río Chicamocha y en la vertiente del río Sogamoso. Compuesta por intercalaciones entre limolitas y areniscas lodosas de grano fino dentro de capas medias y gruesas con forma plana paralela y así mismo en menor proporción capas de conglomerados líticos rojizos. Se encuentra en contacto inconforme y fallado con la Formación Silgará y en discordancia angular con la Formación Los Santos (Morales et al., 2010). Presenta baja porosidad primaria debido a la alta cementación en las rocas y baja porosidad secundaria ya que las diaclasas se encuentran cerradas o algunas rellenas de calcita (Pinto et al., 2007).

Figura 24.

Afloramiento perteneciente a la zona superior de la Formación Jordán



Nota. Estación YC0010 de la campaña de campo. Orientación de la foto: 300°N

- **Formación Girón (J3g):** Sección tipo en la angostura del río Lebrija (Langenheim & R.L, 1959). Edad del Jurásico Superior – Cretácico Inferior (Pons, 1982, como se citó en, Clavijo y Royero, 2001). Actualmente existe duda sobre el porqué de la escasa aparición de la Formación Girón en la Mesa de Los Santos, Pinto et al. (2007) mencionan que esta formación aflora en la zona únicamente en un sector de la carretera que va de La Punta hasta el municipio de Piedecuesta, presentándose como una franja que se acuña hacia el NE de la Mesa, sin embargo, en el mapa geológico de La Mesa de Los Santos, suministrado por el Servicio Geológico (Figura 27) no se evidencia. Litológicamente está conformada por areniscas conglomeráticas de color violeta y conglomerados de color, mayormente fragmentos de rocas metamórficas, aunque también incluye cuarzo. Se encuentra en contacto concordante con la suprayacente Formación Los Santos. Presenta alta porosidad

primaria en los niveles conglomeráticos y en general se encuentra altamente fracturada (Pinto et al., 2007).

- **Formación Los Santos (K1ls):** Nombrada por Cediell (1968) y redefinida por Laverde (1985). La sección tipo de la Formación Los Santos se ubica en la vereda El Pozo, en el camino de El Roto en la Mesa de Los Santos, de donde proviene su nombre. Se considera de edad Berriasiano (Etayo y Rodríguez, 1985). Aflora en gran parte del área de la Mesa de Los Santos (Figura 25). Está subdividida en tres miembros litoestratigráficos: Miembro inferior (K1ls_mi), Miembro medio (K1ls_mm) y Miembro superior (K1ls_ms) (Morales et al., 2010).

Figura 25.

Afloramiento perteneciente a la Formación Los Santos



Nota. Estación YC009 de la campaña de campo. Orientación de la foto: 30°N

- ✓ ***Miembro Inferior (K1ls_mi)***: Este miembro se encuentra constituido por conglomerados arenosos y areniscas conglomeráticas en capas medias a muy gruesas con estructuras sedimentarias como laminación cruzada y estructura grano decreciente. En algunas zonas, en la parte basal presenta composición sublitoconglomerática y sublitoarenita y a medida que asciende estratigráficamente va creciendo el contenido de cuarzo y fragmentos líticos de cuarcitas. Así mismo presenta un cambio facial al suroeste del área pasando a areniscas cuarzosas ligeramente conglomeráticas de grano medio a muy grueso y algunas capas de conglomerados arenosos con guijarros cuarzosos. Este miembro presenta las características de un acuífero mostrando alta porosidad primaria y permeabilidad, en algunas zonas presenta niveles arcillosos pudiendo originar acuíferos confinados (Pinto et al., 2007).
- ✓ ***Miembro Medio (K1ls_mm)***: Este miembro se encuentra constituido por limolitas y arcillolitas intercaladas con areniscas de grano muy fino a medio. Presentan estructuras sedimentarias como laminación plano paralela y laminación cruzada. Los mayores espesores de este miembro se presentan al norte de la zona. Este miembro presenta bajo grado de porosidad, bajo fracturamiento comportándose como acuífugo limitando hidráulicamente al miembro superior (Pinto et al., 2007).
- ✓ ***Miembro Superior (K1ls_ms)***: Este miembro se encuentra constituido por cuarzoarenitas y sublitaarenitas en capas medianas a gruesas que presentan una geometría cuneiforme. Presenta estructuras sedimentarias tales como laminación cruzada, plana paralela y en artesa. El mayor espesor de esta Formación se da al norte de la Mesa de Los Santos. Este miembro presenta una porosidad media a alta

y alto grado de fracturamiento dándole características de acuífero libre en la Mesa de Los Santos y acuífero fracturado en algunas zonas cerca al sistema de fallas de la Mesa (Pinto et al., 2007).

La Formación Los Santos se encuentra en discordancia angular con la Formación Jordán e inconforme con la Formación Silgará y en contacto concordante con la Formación Rosablanca.

- **Formación Rosablanca (K1r):** Descrita por primera vez por Wheeler, 1929 (citado en Pinto et al, 2007) derivando su nombre del cerro Rosablanca localizado a 5km del ángulo noreste de la Concesión de Mares. La edad comprende el intervalo Valanginiano–Hauteriviano Inferior (Etayo & Rodriguez, 1985). Aflora en la zona sur de la Mesa de Los Santos. Pacheco (2012) describe la estratigrafía al oeste del río Chicamocha y en la quebrada Chivatera, en un afloramiento de casi 400 m de espesor, para esto, divide la formación en tres niveles:
 - ✓ **Nivel I:** Con un espesor aproximado de 25 m, compuesto por calizas micríticas de color gris oscuro, de aproximadamente de 0.5 a 1.5 m de espesor, intercaladas en contacto plano-paralelo con lutita color negro, fisil, hacia la base. Hacia el techo, presenta calizas con cristales de yeso diseminado. Muestra gran contenido de calcita, la cual se encuentra rellenando venas.
 - ✓ **Nivel II:** Con un espesor aproximado de 25 m. Se localiza nivel yesífero paralelo a la estratificación de color gris claro, con intercalaciones de lutitas calcáreas y calizas masivas. En este nivel, Pacheco (2012) presenta siete niveles de yeso encontrados en la mina La Nacuma, municipio de Los Santos: manto pizarra, manto

la churca, manto lajeo, manto chaqueta, manto la dura, manto cuero de sapo y manto galletica.

- ✓ **Nivel III:** Con un espesor aproximado de 300 m, compuesto por calizas masivas micríticas y dolomíticas altamente fosilíferas (en su mayoría gasterópodos, bivalvos y braquiópodos) con niveles de bioesparita en estratificación plano paralela. Presentan espesores de 0.5 cm hasta 1.5 m de espesor. Están intercaladas con lodolitas calcáreas y lodo-arenitas de color gris oscura, margas de color pardo debido a las alteraciones.

Figura 26.

Afloramiento perteneciente la Formación Rosablanca



Nota. Estación YC018 de la campaña de campo. Ubicación: Mina el Carrancho.

Orientación de la foto: 137°N.

La Formación Rosablanca se encuentra en contacto neto y concordante con la Formación Paja. En la Mesa de Los Santos, se comporta como un acuífero cárstico hacia el tope ya que presenta porosidad secundaria debido a procesos de disolución y carstificación; hacia la base se comporta como acuitardo ya que presenta calizas masivas y yesíferas con alto grado de fracturamiento, pero sin procesos significativos de carstificación (Pinto et al., 2007).

- **Formación Paja (K1p):** Descrita por Wheeler (citado en Clavijo y Royero, 2001). Nombre derivado de la quebrada La Paja, afluente del río Sogamoso entre Bucaramanga y San Vicente. Con edad desde el Barremiano inferior al Aptiano Inferior (Clavijo & Royero, 2001). Alflora al suroeste de la Formación Mesa de Los Santos. Presenta capas muy gruesas de lodolitas físis rojizas con laminación plano paralela muy notoria, con láminas de yeso relleno de fracturas y paralelas a la estratificación, de hasta 8 mm de espesor. Están intercaladas con capas medias, tabulares de margas negras. Se encuentra en contacto concordante y transicional con la Formación Tablazo y contacto neto y concordante con la Formación Rosablanca. Presenta baja porosidad primaria y alto grado de fracturamiento (Pinto et al., 2007).
- **Formación Tablazo (K1t):** Descrita por Wheeler (citado en Clavijo y Royero, 2001). Edad entre Aptiano Superior y Albiano Inferior (Clavijo y Royero, 2001). En la Mesa de Los Santos se presenta hacia el suroeste con muy poca expresión, observada en las zonas más altas. Litológicamente se comprende capas gruesas tabulares de areniscas calcáreas de grano fino a medio fosilíferas (bivalvos). Se encuentra en contacto neto con la Formación Paja. El nivel de areniscas calcáreas se presenta alto grado de fracturamiento dándole características de un acuífero (Pinto et al., 2007).

- **Qal Depósitos Aluviales:** Hace referencia a sedimentos y fragmentos de roca depositados por corrientes. Se encuentran ubicados por encima del nivel de los cauces de los ríos Sogamoso y Chicamocha. Son depósitos de origen hidrogravitacional (Pinto et al., 2007).
- **Qd Depósitos Coluviales y de Derrubio:** Desarrollados por la acción de la gravedad, haciendo referencia a depósitos acumulados en la base de los escarpes debido al desprendimiento de materiales de las laderas. Los más representativos se encuentran en los escarpes del río Chicamocha depositándose sobre rocas de la Formación Jordán y Los Santos (Morales et al., 2010).

4.3 Geología estructural

La Mesa de Los Santos se encuentra ubicada en la región estructural central de las tres zonas tectonoestratigráficas clasificadas por Clavijo y Royero (2001) (Figura 22). Las estructuras que afectan en gran medida el área son la Falla de Suarez al occidente y la Falla de Bucaramanga al oriente; la primera corresponde una falla inversa de alto ángulo, con dirección N20-25E e inclinación al oeste que sigue el curso de los ríos Suarez y Sogamoso (Pinto et al., 2007); y la segunda pertenece al sistema de fallas de rumbo Bucaramanga-Santa Marta con componente sinistral, que se comporta como falla inversa en las zonas meridionales, presenta trazo con dirección N20W (Clavijo y Royero, 2001)(Figura 22).

4.3.1 Fallas

En Morales et al. (2010) se presenta y se describe tres sistemas de fallas principales con características geométricas y cinemáticas particulares para la Mesa de Los Santos: fallas del sistema longitudinal con dirección predominante NW, fallas del sistema transversal con dirección

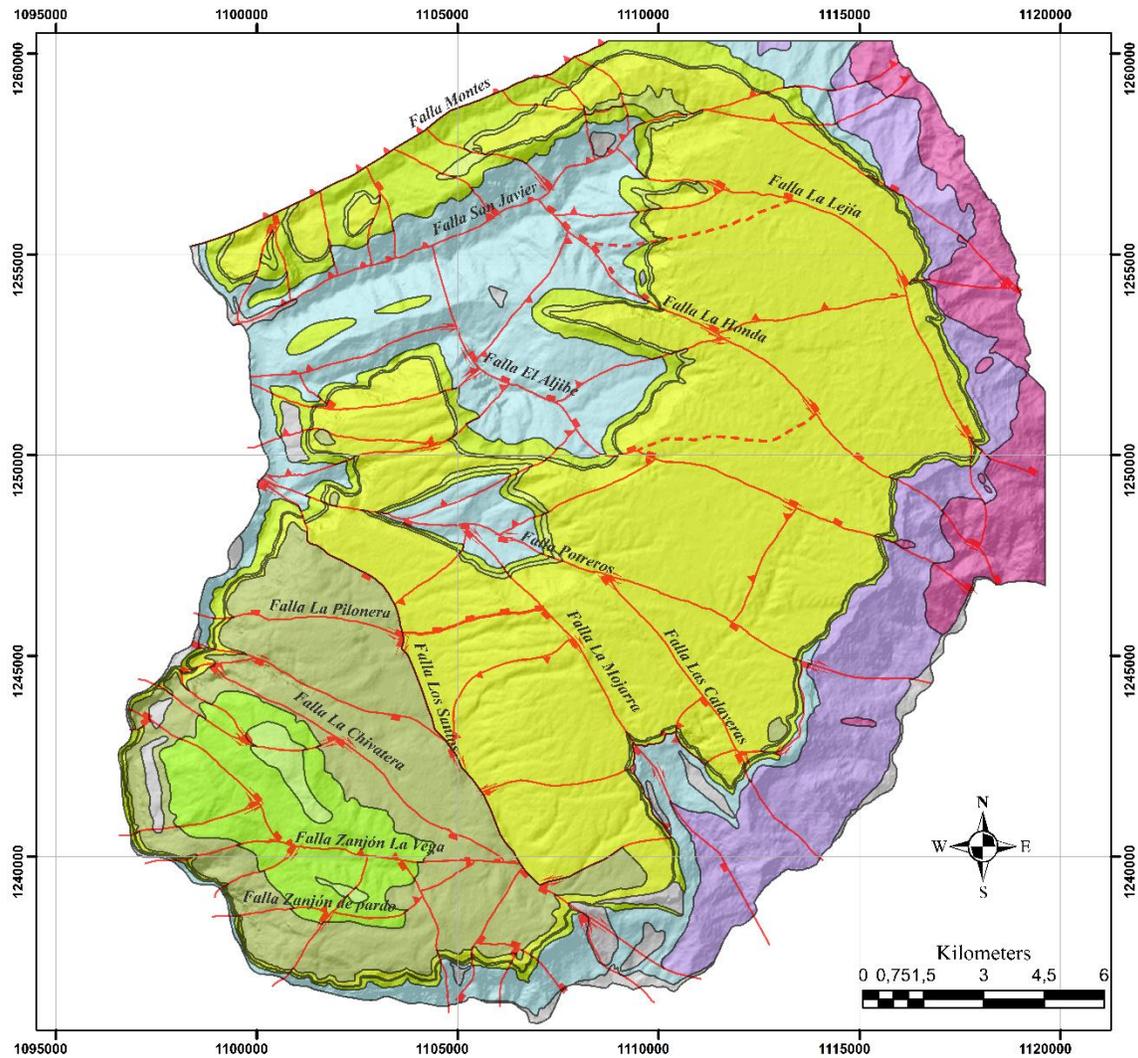
predominante NE y fallas del sistema menor con dirección EW (Figura 27), los cuales se resumen a continuación:

- **Sistema de fallas longitudinales:** Fallas con dirección predominante NW, expresiones rectas, sinuosas y curvas, paralelas en su gran mayoría. Afectan el basamento y la secuencia sedimentaria Jurásica y Cretácica. Estas fallas muestran un grado de penetrabilidad alta y se encuentran espaciadas en un promedio de 4 km (Morales et al., 2010) (Figura 27).
 - ✓ **Falla La Lejía:** Falla normal con componente de rumbo dextral y vergencia al NE. Presenta un trazo curvo y sinuoso que afecta las formaciones Los Santos, Jordán, Silgará y granito de Pescadero.
 - ✓ **Falla Honda:** Muestra una extensión aproximada de 11 km, cortando trazos de fallas trasversales. Falla de rumbo sinistral con componente normal y vergencia al NE. Afecta rocas de la Formación Los Santos, Jordán, Silgará y granito de Pescadero.
 - ✓ **Falla El Aljibe:** Muestra comportamiento rectilíneo en la parte sureste y sinuoso hacia el noroeste. Falla de tipo dextral con componente normal y vergencia al SE. Afecta litologías como el granito de pescadero, Formación silgará, jordán y los Santos.
 - ✓ **Falla Potreros:** Presenta una extensión aproximada de 13 Km. Es una falla de rumbo dextral con componente normal y vergencia hacia el NE. Presenta una curvatura en la zona de escarpe del Rio Chicamocha y recto en la parte plana de la mesa. Afecta las formaciones Silgará, Jordán y Los Santos.
 - ✓ **Falla Las Calaveras:** Muestra una extensión aproximada de 6 km. Presenta trazo recto que termina en la Falla Potreros. Falla con sentido normal y vergencia al NE.

- ✓ **Falla La Mojarra:** Tiene una extensión aproximada de 9 km. Trazo al noroeste que termina en la Falla Potreros. Falla de rumbo dextral con componente normal y vergencia al NE. Afecta las rocas de las formaciones Silgará, Jordán y Los Santos.
- ✓ **Falla Los Santos:** Tiene una extensión aproximada de 34 km. Trazo sinuoso al noroeste hacia el río Sogamoso y curvo al sureste hacia el río Chicamocha. Falla de rumbo dextral con componente normal y vergencia al SW. Afecta rocas del Cretácico Inferior y Jurásico Superior.
- ✓ **Falla la Chivatera:** Presenta trazo sinuoso. Falla de rumbo dextral normal con vergencia al SW. Afecta las rocas de la Formación Jordán y Los Santos al oeste y la Formación Rosablanca al sureste.
- **Sistema de fallas transversales:** Fallas con dirección preferencial NE, expresión sinuosa y curva, subparalelas, espaciadas en un promedio de 3 km. Fallas inversas las cuales presentan orientación preferencial NE. Muestran expresión sinuosa y curva (Morales et al., 2010). (Figura 27). En el sistema sobresalen dos fallas principales:
 - ✓ **Falla Los Montes:** Longitud aproximada de 9 km con trazo recto. Falla dextral inversa con vergencia al SE. Afecta las litologías de las formaciones Jordán y Los Santos.
 - ✓ **Falla San Javier:** Presenta extensión aproximada de 13 km. Exhibe un trazo recto con poca sinuosidad. Se asume como falla de rumbo dextral con componente inversa y vergencia al NW. Afecta las rocas metamórficas de la Formación Silgará, las rocas ígneas del granito de Pescadero y las rocas sedimentarias de las formaciones Jordán y Los Santos.

- **Sistema de fallas menores:** Fallas con dirección preferencial EW. Producto de tectónica local por relajación y/o acomodación de las rocas después de eventos tectónicos (Morales et al., 2010) (Figura 27).
 - ✓ **Falla La Pilonera:** Con extensión aproximada de 4 km. Muestra trazo sinuoso que termina en la falla Los Santos. Falla de rumbo dextral normal con vergencia al S. Afecta las rocas de las formaciones Jordán, Los Santos y Rosablanca.
 - ✓ **Falla Zanjón La vega:** Presenta extensión aproximada de 8 km de longitud. Trazo recto y sinuoso hacia el escarpe. Falla de rumbo dextral e inversa con vergencia al N. Afecta las rocas de las formaciones Jordán, Los Santos, Rosablanca y Paja.
 - ✓ **Falla Zanjón de Pardo:** Tiene una extensión aproximada de 5 km con trazo sinuoso desde el río Chicamocha la falla Los Santos Se cruza con dos fallas locales, las cuales las desplaza con movimiento sinistral hacia el norte.

Figura 27.
Mapa geológico de la Mesa de Los Santos



FORMACIONES GEOLÓGICAS		FALLAS
Qal	Depósitos aluviales	Falla Normal
Qd	Depósitos de derrubio	Falla Inversa
K1t	Formación Tablazo	Falla Sinistral
K1p	Formación Paja	Falla Dextral
K1r	Formación Rosablanca	
k1ls_ms	Formación Los Santos miembro superior	
k1ls_mm	Formación Los Santos miembro medio	
K1ls_mi	Formación Los Santos miembro inferior	
J1-2j	Formación Jordan	
J1gp	Granito de pescadero	
OSs	Formación silgara	

Nota. Información tomada de la base de datos del Servicio Geológico Colombiano del proyecto Pinto et al. (2007).

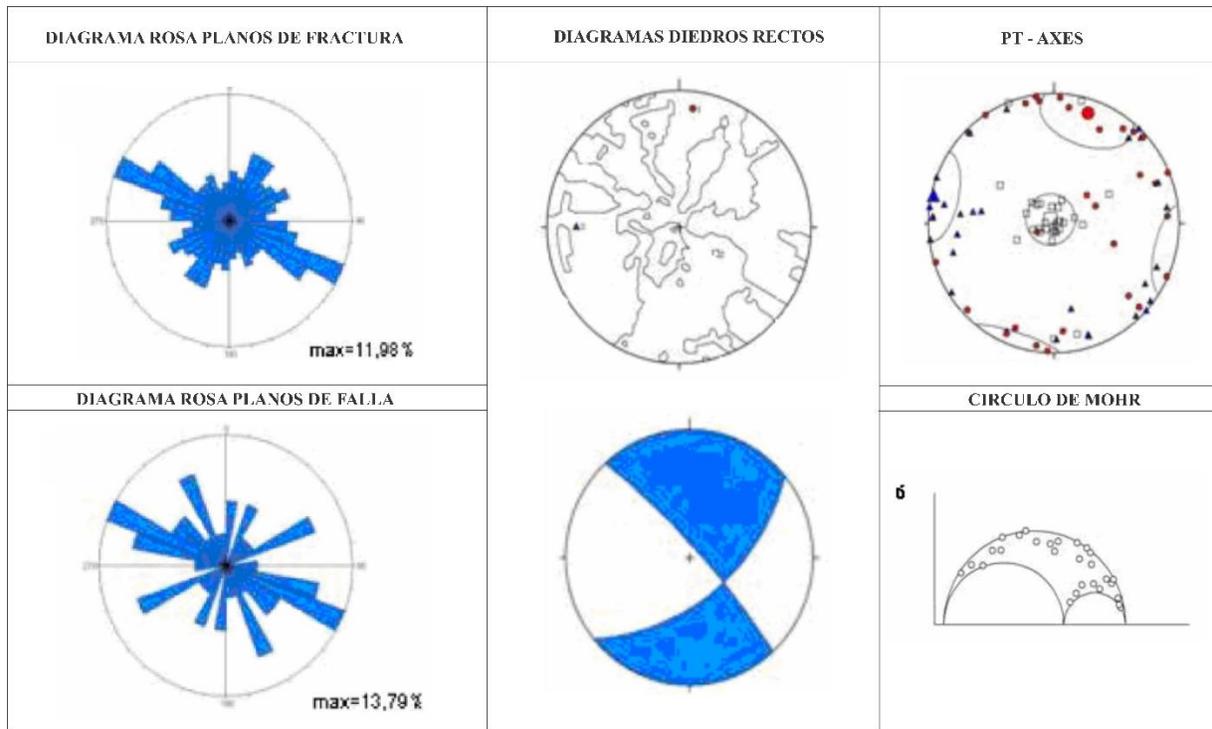
4.3.2 *Estrías*

Según Vargas (2008), los planos de estría de la Mesa de Los Santos presentan dos direcciones preferenciales: N50-60W y N80-90E (Figura 29). Así mismo determina el campo de fuerzas de deformación, con valores de esfuerzos principales: σ_1 : 345/14, mínimo σ_3 :81/21 e intermedio σ_2 : 225/64. Vargas (2008) concluye, a partir de la orientación del esfuerzo principal (N-S) y la simetría de deformación, un patrón cinemático normal de rumbo dextral para el sistema de fallas longitudinal principal de la zona las cuales cortan el sistema transversal secundario.

Por su parte, Velandia et al. (2007) determina una tendencia N60-80W para las direcciones de planos con estrías de falla (Figura 28). Así mismo, encuentra la distribución de los esfuerzos con σ_2 en la vertical y en sentido horizontal σ_1 : N-S y σ_3 : W-E; asignando un dominio tectónico de tipo transcurrente dextral a lo largo de las fallas transversales NW. Adicionalmente distingue dos direcciones N20-30° y N60-70E perpendiculares entre sí sugieren movimiento a lo largo de trazos locales cartografiados a menor escala.

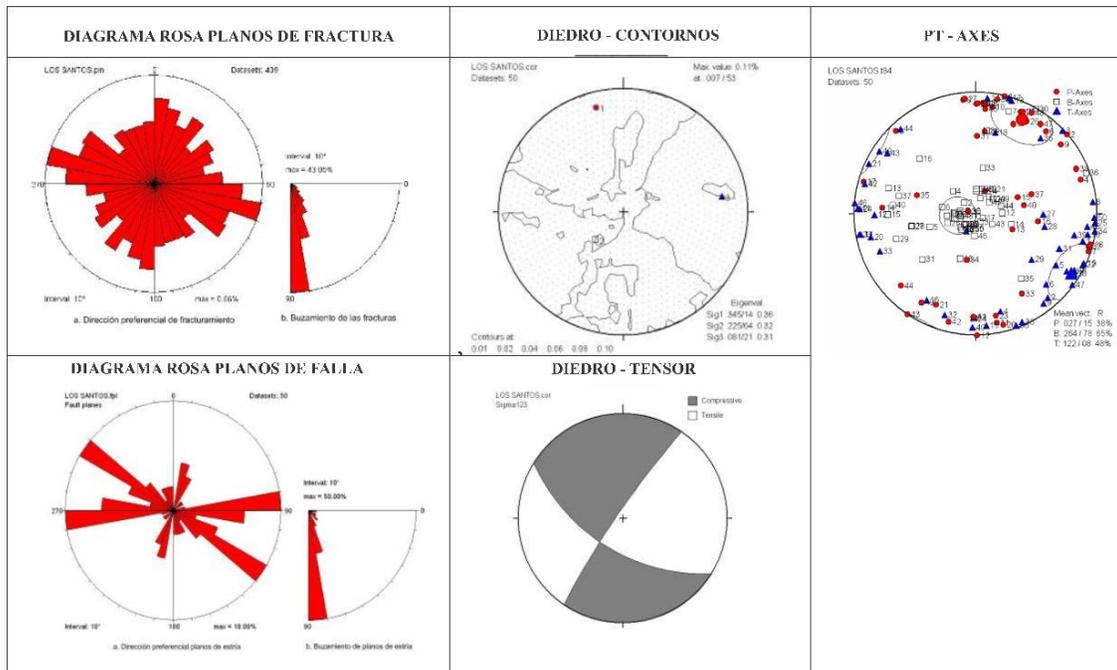
4.3.3 *Diaclasas*

Velandia et al. (2007) determina un predominio en la dirección de las diaclasas o planos de fracturas de: N50-70W a partir de 192 datos de planos de fracturas (Figura 28).

Figura 28.*Análisis cinemático de la Mesa de Los Santos*

Nota. Tomado y editado de: Velandia et al. (2007).

Por su parte, Vargas (2008) recopiló 439 datos de fracturas, encontrando un predominio en la dirección N80-90W la cual considera coherente con la tendencia de las principales fallas de la zona (Figura 29).

Figura 29.*Diagramas del análisis cinemático de la Mesa de Los Santos*

Nota. Tomado y modificado de Vargas (2008).

4.3.4 Geología estructural con enfoque hidrogeológico

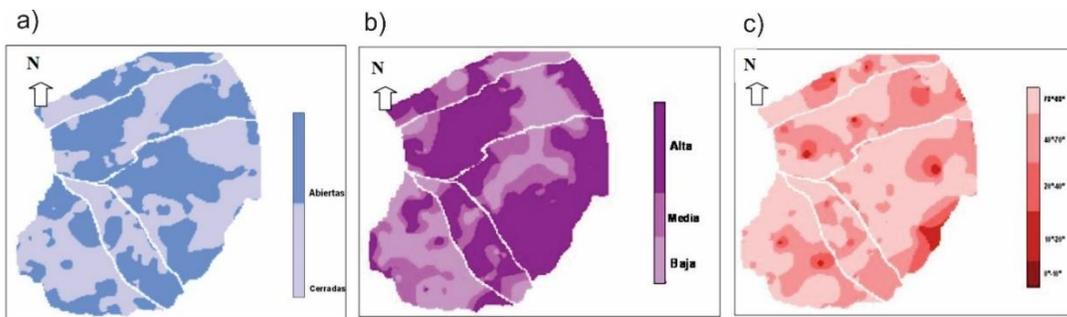
Contreras (2008) identifica dos sectores de gran interés hidrogeológico a partir del análisis de distribución de diaclasas abiertas y cerradas, la densidad del fracturamiento y los rangos de buzamiento (Figura 30); siendo estos el Noreste de la Mesa en la vereda Holanda, probablemente constituyendo un acuífero donde las fracturas permiten la recarga se encuentran cinco familias de diaclasas las cuales están interconectadas posiblemente facilitando el flujo de agua a través del acuífero en dirección de buzamiento siendo estos entre 40° y 70° posible este flujo seguiría las direcciones este, norte y noreste principalmente y en menor proporción hacia el sureste y suroeste. Y el Centro de la Mesa en las veredas El Verde, La Fuente y Tabacal probablemente constituyendo un acuífero fracturado donde se encuentran tres familias de diaclasas las cuales están

interconectadas con buzamiento preferenciales entre 70° y 90° y apertura entre 1 y 10 cm que a profundidad presenta un mayor grado de fracturamiento.

Debido a la poca profundidad de los pozos, se deduce que el miembro superior de la Formación los Santos es el acuífero principal y el que está siendo más explotado en el área (Contreras, 2008) .

Figura 30.

Mapas de distribución de la Mesa de Los Santos



Nota. a) Mapa de Distribución de Diaclasas abiertas y cerradas. b) Mapa de distribución espacial de la densidad de fracturamiento. c) Mapa de distribución espacial de los rangos de buzamiento de las diaclasas. Tomado y editado de: Contreras (2008).

5. Metodología

La metodología de investigación engloba cinco grandes etapas: revisión bibliográfica, validación de la información y planeación, fase de campo, procesamiento y análisis de resultados; las cuales tienen como alcance encontrar un resultado teóricamente válido que logre los objetivos propuestos.

Figura 31.*Metodología del proyecto*

5.1 Revisión bibliográfica

Como un primer acercamiento al proyecto de investigación se realizó la revisión de la información geológica e hidrogeológica disponible en la zona de estudio (área escogida y delimitada previamente para realizar la investigación. Ver sección 2: [LOCALIZACIÓN](#)), con el fin de conocer el estado actual del conocimiento.

Esta revisión incluyó todos los escritos de carácter académico que, una vez detallados, permitieron proponer un diagnóstico tanto geológico como del sistema de fractura de la zona de

interés, por medio del cual se establecieron los objetivos, alcances y limitaciones del presente proyecto, identificando los problemas sin resolver y la necesidad que conlleva la realización del estudio.

5.2 Validación de la información y planeación

Con la información reunida anteriormente, se creó una base de datos en un Sistema de Información Geográfica (ArcGIS) donde se ingresaron todos los datos reportados en campañas de campo previas relacionados con el análisis cinemático y el análisis del sistema de fractura en las localidades de interés.

La información se distinguió por tipo (diaclasa, estratificación o estría) y autor de los datos; una vez clasificados se generó un mapa preliminar donde se visualiza gráficamente la cantidad y distribución espacial de la información recolectada.

En base a este gráfico se plantearon áreas y puntos estratégicos a estudiar según nuestro enfoque, junto con la selección de diez estaciones tomadas aleatoriamente que permitieron la corroboración de dicha información en campo, con el fin de otorgar una confiabilidad a la información suministrada antes de ser procesada.

Así mismo, al tener una cantidad significativa de datos provenientes de diferentes autores y años se precisó revisar la metodología con la que se adquirieron y procesaron los datos estructurales para darles el uso adecuado. También se examinaron las propuestas y recomendaciones de cada documento, las cuales sirvieron de base y discusión para este estudio.

5.3 Fase de campo

Una vez enfocado el proyecto se realiza una campaña de campo de reconocimiento junto con el director del proyecto y otros participantes de diferentes áreas donde se comparten ideas y se establece una ruta de trabajo.

Posteriormente se realizó una salida de campo que consistió en la visita a las estaciones seleccionadas para verificar la información suministrada y la toma de nuevos datos estructurales y litológicos en diferentes áreas y puntos estratégicos previamente distinguidos.

Esta toma de datos consistió en identificar las diaclasas y estrías, si están presentes, en diferentes afloramientos a lo largo de la zona de estudio; Para las familias de diaclasas se reunieron datos de orientación y apertura junto con evidencia fotográfica orientada para su posterior análisis por medio del método de la ventana de muestra en el software FracPaQ y para las estrías, se midió el rumbo e inclinación del plano, el pitch y su dirección, y se estableció la cinemática del movimiento. A continuación, se detalla cómo se realizó la medición de los datos estructurales en campo:

5.3.1 *Medición de datos estructurales*

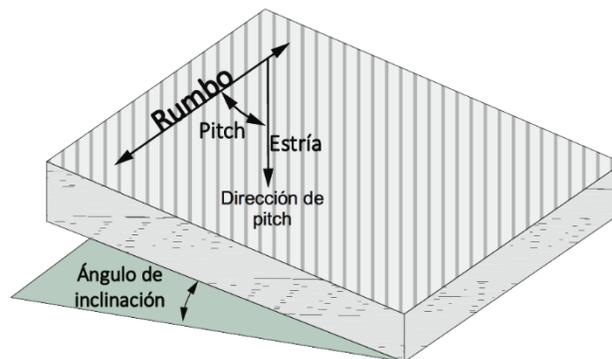
- **Diaclasas.** Para la caracterización de las diaclasas en la zona de estudio se eligieron afloramientos de rocas competentes con un grado de meteorización entre medio y bajo en los cuales se pudieran identificar familias de diaclasas y tomar las respectivas mediciones.

En una plantilla previamente diseñada se registró las coordenadas correspondientes a la estación (x,y) del afloramiento, la litología, el espesor y la estratigrafía de la capa de roca sobre la cual se encontraban las diaclasas. Seguidamente se midieron en los planos de

-
-
-
-
- ✓ Registrado el pitch, se determina su dirección que corresponde al sentido en el que la estría esta inclinada con respecto al rumbo del plano en el que se encuentra (Figura 32).
 - ✓ Una vez tomado los datos, se establece el movimiento relativo de los bloques, indicando la cinemática en función de la componente tanto horizontal como vertical del movimiento mediante indicadores cinemáticos (ver Marco teórico).

Figura 32.

Datos tomados en campo en los planos estriados



Nota. Tomado de Castellanos & Cetina (2013).

5.4 Procesamiento de datos y análisis de resultados

Una vez recopilada, organizada y digitalizada la información obtenida se inició su procesamiento y tratamiento estadístico utilizando los siguientes softwares:

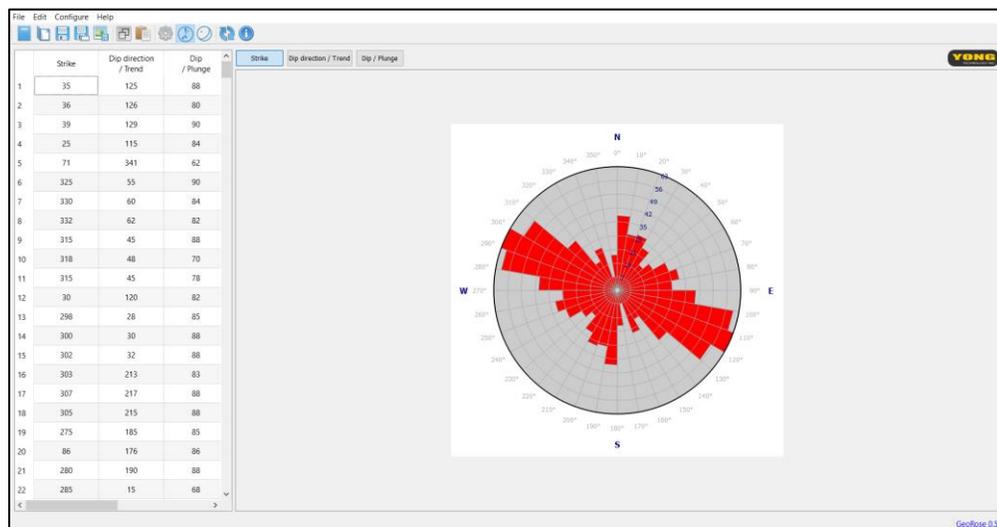
- **GeoRose 0.5.1:** Permitió la comparación y validación de los planos de diaclasas de diez estaciones seleccionadas, pertenecientes a la base de datos recopilada en la revisión bibliográfica, las cuales fueron visitadas y medidas nuevamente en la campaña de campo

del presente trabajo, esto con el fin de otorgar confiabilidad a estos datos secundarios. Para ello, se procesaron los dos grupos de planos de diaclasas, generando diagramas rosa, los cuales permiten observar la variación en la orientación de los datos.

Después de organizar en cinco subgrupos los datos estructurales de diaclasas medidos en campo y los recopilados en la revisión bibliográfica, se procede a generar los diagramas de rosa pertenecientes a cada subgrupo y el diagrama correspondiente a toda la zona de estudio, mediante el software GeoRose. Estos resultados permiten identificar la orientación preferencial del sistema de fracturas para analizar su posible relación con las fallas principales y con los tensores locales.

Figura 33.

Ejemplo de diagrama de rosa en el programa GeoRose



- **WinTensor 5.8.9:** Este software permite la obtención de tensores de esfuerzos pertenecientes a la zona de estudio plasmados en diferentes diagramas como diagramas Angelier, círculo de Mohr, entre otros. Esto se llevó a cabo, basadas en la metodología para

obtención de tensores de esfuerzo a partir de la inversión de indicadores cinemáticos presentada en Velandia (2017). Se procesan únicamente los datos de estrías medidos en la campaña de campo del presente trabajo. Para esto, se debió crear un documento en Microsoft Excel, como la que se muestra a continuación, para cada una de las estaciones con sus respectivos datos estructurales y se guardó como archivo “Texto (delimitado por tabulaciones)”.

Figura 34.

Plantilla utilizada para el software WinTensor.

Fault-slip data			Input row data (User format)									
Properties			Orientation 1		Orientation 2		Slip	Conf.	Weight	Activ.	Striae	Subset
Id	Format	Type	Ori1A	Ori1B	Ori2A	Ori2A	Sense	Level	Factor	Type	Intens.	Index
YC001-1												
YC001-2												
YC001-3												

Donde:

- ✓ **Id:** Es el nombre de la estación y número de dato.
- ✓ **Format:** Es el formato utilizado, en este caso el número: 23 (2: Dip-direction / Dip-Angle y 3: Pitch)
- ✓ **Type:** Es el tipo de información que se suministrará, en este caso es el tipo: 1 (Fault plane with slip line)
- ✓ **Ori1A:** Es el dato de orientación en azimut de buzamiento (Dip-direction).
- ✓ **Ori1B:** Es el dato del buzamiento (Dip-Angle).
- ✓ **Ori2A:** Es el dato de pitch y su respectiva dirección, por ejemplo: 22N
- ✓ **Ori2A:** Vacío.
- ✓ **Slip Sense:** Hace referencia al Tipo de la falla (I: inversa, N: Normal; S: Sinistral, D: Dextral)

- ✓ **Conf. Level:** Indica el nivel de confianza del dato medido (C: Certero; P: Probable; S: Supuesto; X: desconocido)
- ✓ **Weight Factor:** Indica la importancia dada al dato durante el proceso. En este caso todos se colocaron en 2.
- ✓ **Activ. Type:** Hace referencia al tipo de activación de la falla (N: Neoformada; R: Reactivada y X: Desconocido.
- ✓ **Striae Intensity:** Es el dato que indica la intensidad de la estria (0: No estriado; 1: Débilmente marcado; 2: Bien marcado; 3: Profunda y 4: Corrugación.
- ✓ **Subset. Input:** Dato para agrupar los datos en un Subset. En este caso todos se colocaron en 1.

Posteriormente se analizan los datos de cada estación en el software WinTensor, Siguiendo los pasos mostrados en Velandía (2017). Resumidos a continuación:

1. Importar al software el archivo de texto de la estación.
2. Procesar los datos mediante el método de Diedros Rectos Mejorado (R. Dihedr.) filtrando los datos hasta obtener Counting Value (C.V) de 0% para σ_1 y 100% para σ_3 . Y un Counting Deviation (Counting Dev.) menor a 30. Esto permite filtrar los datos en el círculo de Mohr.
3. Si al revisar el círculo de Mohr, todos los datos se encuentran dentro del campo de los neoformados o reactivados, se puede pasar a analizar los datos a R Optim. Si no es así, se debe realizar un nuevo filtro en R Dihedr.
4. Al pasar al método de R Optim. se debe filtrar los datos hasta obtener valores de α (ángulo promedio de ajuste entre las direcciones de deslizamiento modeladas y observadas) menores a 30. Así mismo, procurar tener la mejor calidad posible del

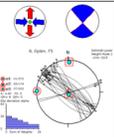
tensor (Tensor Quality Rank (QRt) y World Stress Map Quality Rank (QRw)) categorizados como A, B, C, D o E, donde A es de muy buena calidad. También es importante que el histograma de la función F5 mostrado en este método muestre los valores lo más cercano posible a cero y no presenten dispersión.

- Si estas condiciones se cumplen, se pueden utilizar los diagramas obtenidos como lo son: Diagrama de Angelier, Circulo de Mohr, Balones de playa, Proyección de Hoepener.

Si los datos desechados por el programa son más de cuatro, se puede repetir el proceso con estos y obtener otro tensor. Es decir, que al final del proceso se puede obtener uno o más tensores por estación con distintas características en su régimen de esfuerzos. Se muestra un ejemplo con los resultados de la estación YC001:

Figura 35.

Ejemplo de los resultados obtenidos en WinTensor de la estación YC001.

Estación	Coordenadas		Unidad Geológica	Edad	Método	Tensor	Gráfica Tensor	n Subcon	n Total Tensor	N Total Estación	Ejes de Esfuerzos			Counting Deviation	α	R	R'	Shmax	QRt	Régimen de Esfuerzo
	X (m)	Y (m)									σ_1	σ_2	σ_3							
YC001	1110616	1239254	Los Santos Miembro Superior	Berriasiano	R. Optim	YC001		24	22	24	01/272	83/174	07/002		10,6	0,45	1,5	91	D	Transcurrenacia pura

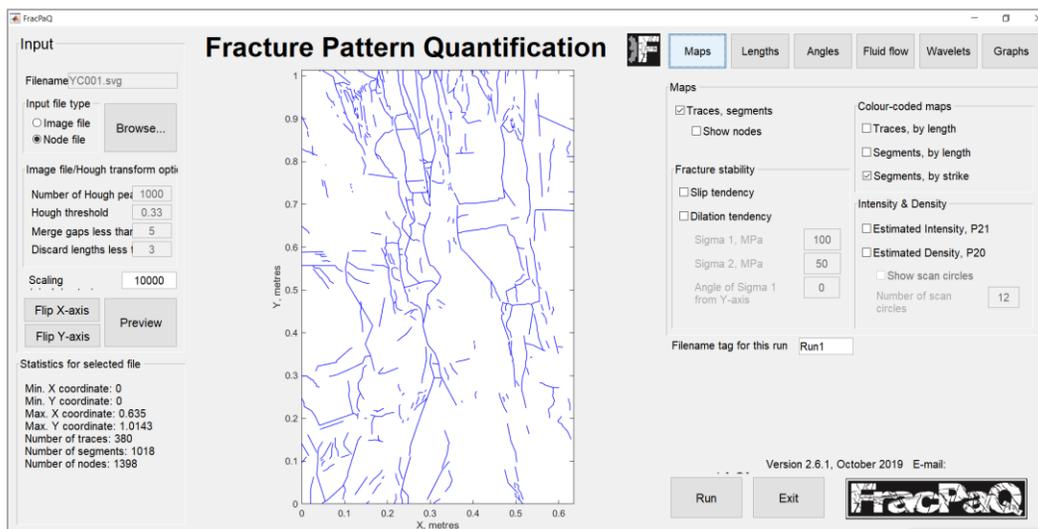
- FracPaQ:** Para el análisis al sistema de fractura se utilizó principalmente FracPaQ, un software de código abierto escrito en MATLAB™ (Figura 36), el cual sirve como herramienta para medir y cuantificar patrones de fracturas en dos dimensiones (2D) a partir de datos digitales. El archivo de entrada puede ser una imagen binaria de trazas de fracturas (.jpg/.jpeg o .tif/.tiff) o un archivo de texto (.txt o .svg) delimitado por tabulaciones ASCII

de coordenadas (x, y) que marcan los nodos de cada traza de fractura (Healy et al., 2017), siendo esta la manera más sólida para ingresar datos.

Para generar este tipo de archivo de entrada se utilizó el software de diseño gráfico vectorial CorelDRAW®, donde se realizaron trazas con la herramienta Polilínea siguiendo el camino de las fracturas visibles sobre las fotografías de los afloramientos visitados (Figura 37). Antes de empezar el reconocimiento de dichas fracturas se seleccionó una subárea de la imagen propiamente escalada evitando cantidades significativas de vegetación o zonas cubiertas mediante un rectángulo delimitador y se evaluó el nivel apropiado de aumento a utilizar.

Figura 36.

Ventana principal de FracPaQ



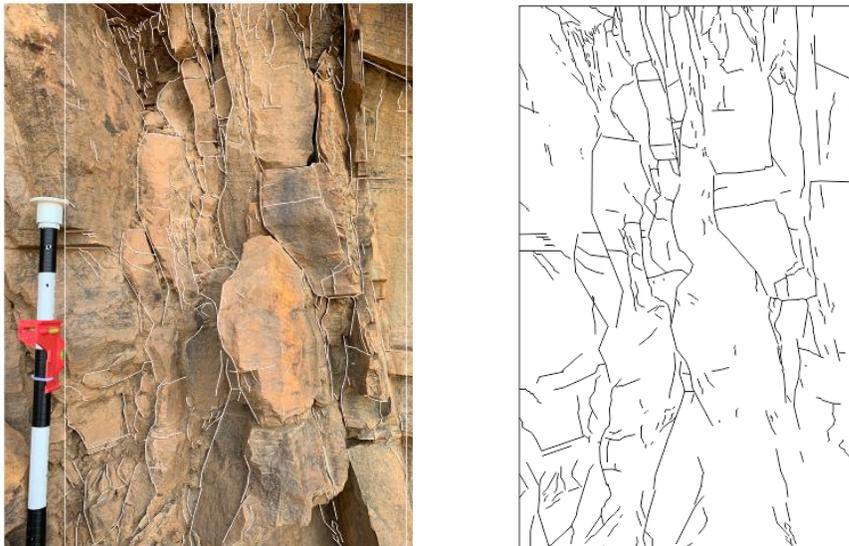
Healy y Rizzo (2019) recomiendan aumentar la ampliación (zoom) hasta que la traza de fractura se pixele, y que la mejor relación entre la resolución y el tiempo dedicado al rastreo es de alrededor de 4-5 niveles de zoom por debajo del máximo (cuando las fracturas se pixelan).

Siguiendo esta recomendación, se trazaron las líneas de fractura visibles con el aumento seleccionado (sin acercar ni alejar, ya que esto puede generar un sesgo de muestreo) haciendo clic en cada trazo de fractura a intervalos en los que cambia la orientación. Cada clic define un nuevo nodo y los nodos definen segmentos individuales de línea recta que forman la traza de fractura (Healy & Rizzo, 2019). Se tuvo especial cuidado de no unir accidentalmente dos trazas de fractura distintas, ya que FracPaQ leerá esto como una sola traza de fractura.

Una vez realizado este proceso se elimina la capa que contiene la imagen de nivel base, se ajusta la subárea a la esquina superior izquierda de la página del documento y se guarda el archivo en formato .svg.

Figura 37.

Imagen de afloramiento digitalizado



A partir de esta entrada, FracPaQ puede cuantificar las longitudes y orientaciones de las fracturas constituyentes y la intensidad, densidad, conectividad y permeabilidad del patrón de fractura, permitiendo con estos dos últimos un análisis preliminar del flujo de fluidos (Healy et al., 2017), de acuerdo con las técnicas descritas en el apartado anterior (ver sección 4.4.3.1).

Por defecto, FracPaQ supone que se miden las orientaciones de fractura en sentido horario desde el eje Y positivo, suponiendo esta dirección como el norte. Si este no es el caso, se ingresa un ángulo (0-180°) entre el eje Y y el norte verdadero.

La información y mapas suministrados por FracPaQ se presentan sobre el mapa de la zona, estación por estación, donde es provisto de valores numéricos de acuerdo al parámetro estudiado y arrojado por el programa en consecuencia a los datos. Estos valores se revisan y se discuten, dando interpretaciones al respecto siguiendo los objetivos propuestos.

- ***Gráficos estadísticos:***

Al mismo tiempo, esta misma información junto con las aperturas medias (tomadas de afloramientos) es sintetizada en gráficos estadísticos de dispersión generados en Excel que permitieron una mayor comprensión y comparación espacial.

6. Análisis de Fractura y Cinemática del Sector Sur de la Mesa de los Santos

6.1 Revisión de Antecedentes

La descripción del sistema de fracturas en la Mesa de los Santos ha tenido avances significativos contando con publicaciones de entidades reconocidas como el Servicio Geológico Colombiano y la Universidad Industrial de Santander (Pinto et al., 2007; Diaz et al., 2009; Vargas, 2008; Velandia et al., 2010); Morales et al., 2010). Estas investigaciones enfocan su estudio en la Formación Los Santos permitiendo un diagnóstico inicial de la situación del fracturamiento al sur de la Mesa de los Santos. Sin embargo, no son suficientes para permitir el avance académico hacia la definición de modelos de flujo de agua subsuperficial y subterránea en rocas fracturadas identificadas como los principales acuíferos.

6.1.1 Direcciones preferenciales de fractura

Como primer paso para realizar el análisis del fracturamiento se deben establecer las direcciones preferenciales de fractura, las cuales han sido determinadas previamente por diversos autores a partir de datos reunidos en campañas de campo.

Velandia (2007) presenta como ponencia en el XI Congreso Colombiano de Geología, el trabajo: *Análisis cinemático de la región central del departamento de Santander* en el cual se encuentra incluida la Mesa de Los Santos, determinando para esta una dirección preferencial N50-70W de los planos de fracturas (Figura 28). Dicho proyecto fue basado en la interpretación de imágenes satelitales, fotografías aéreas, modelos de elevación digital y toma de datos estructurales en campo.

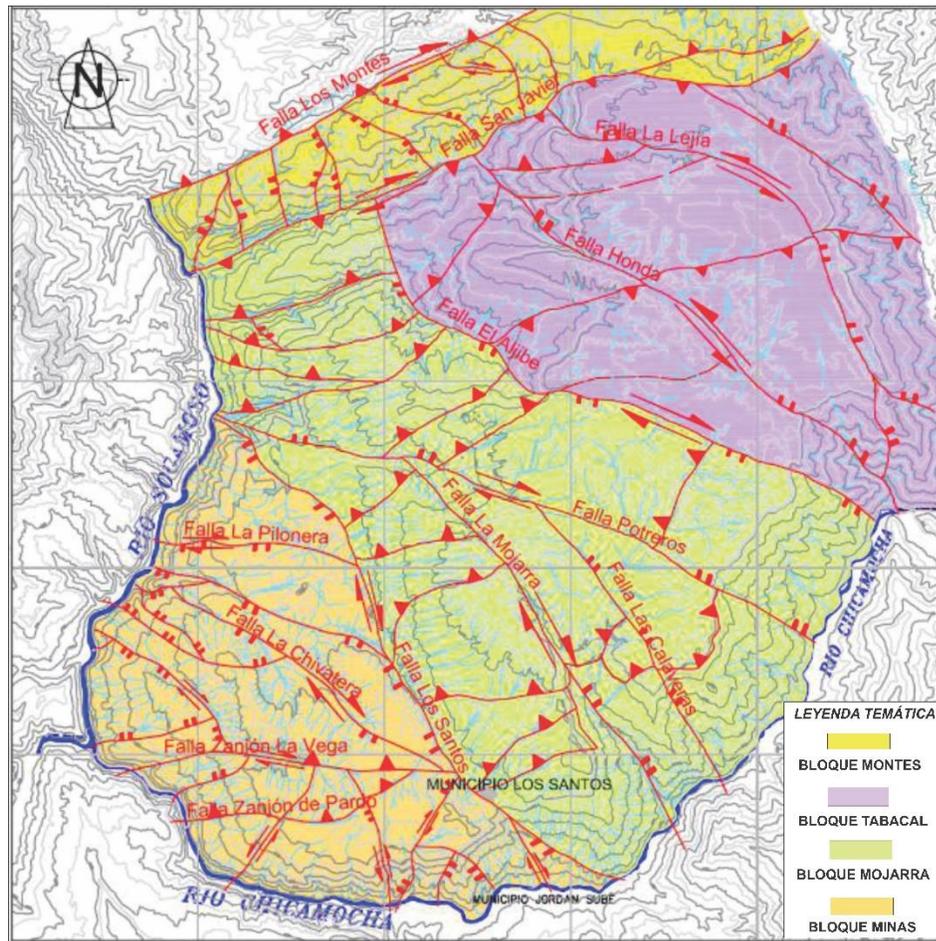
Vargas (2008) presenta un trabajo enfocado a la cartografía geológica de la Mesa de Los Santos en donde realiza un análisis estructural obtenido a partir de observaciones de campo, interpretación de imágenes satelitales y un análisis geoestadístico de planos de fracturas y planos de estrías. Para lo anterior divide la Mesa de los Santos en cuatro bloques estructurales de acuerdo con los tipos de fallas y características particulares del área: bloque Montes, bloque Tabacal, bloque Mojarra y bloque Minas (Figura 38).

Uno de los resultados estructurales entregado por Vargas (2008), fue la determinación de la dirección preferencial de los planos de fractura N80-90W en la Mesa de Los Santos (Figura 29). Debido a la similitud entre sus objetivos estructurales con el presente trabajo de investigación, este estudio fue tomado como una referencia base, empleándose como fuente de datos secundarios, sin embargo, en el momento de revisar los mismos, fueron encontradas inconsistencias en la recopilación de estos, ya que los datos usados por Vargas (2008) cuenta con un total 441 planos

de fractura, de los cuales 87 se encuentran repetidos, que al momento de eliminarlos ajusta parcialmente el resultado mostrando una población en dirección N0-10E.

Figura 38.

Bloques estructurales delimitados por Vargas (2008)



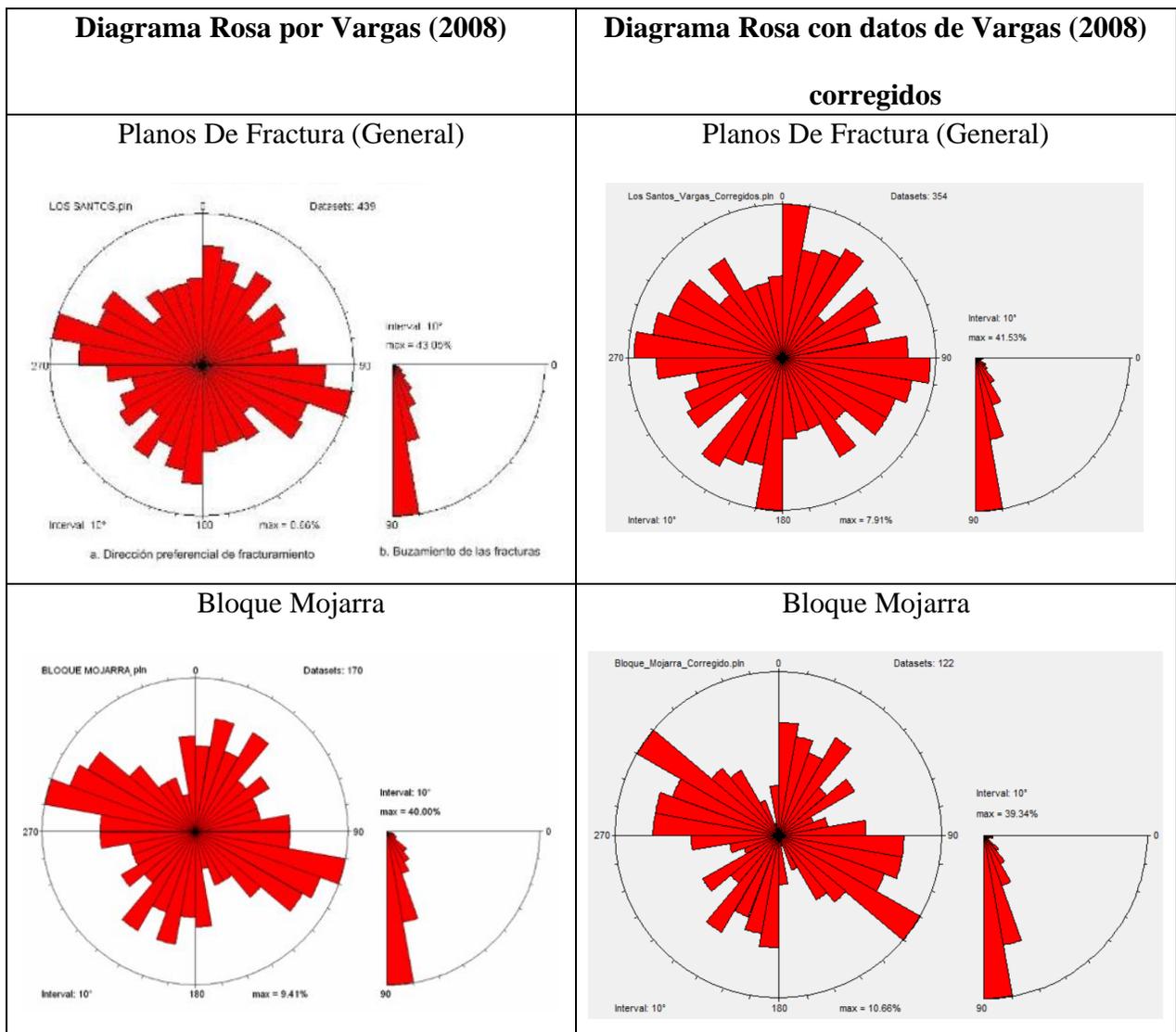
Nota. Tomado y editado de Vargas (2008).

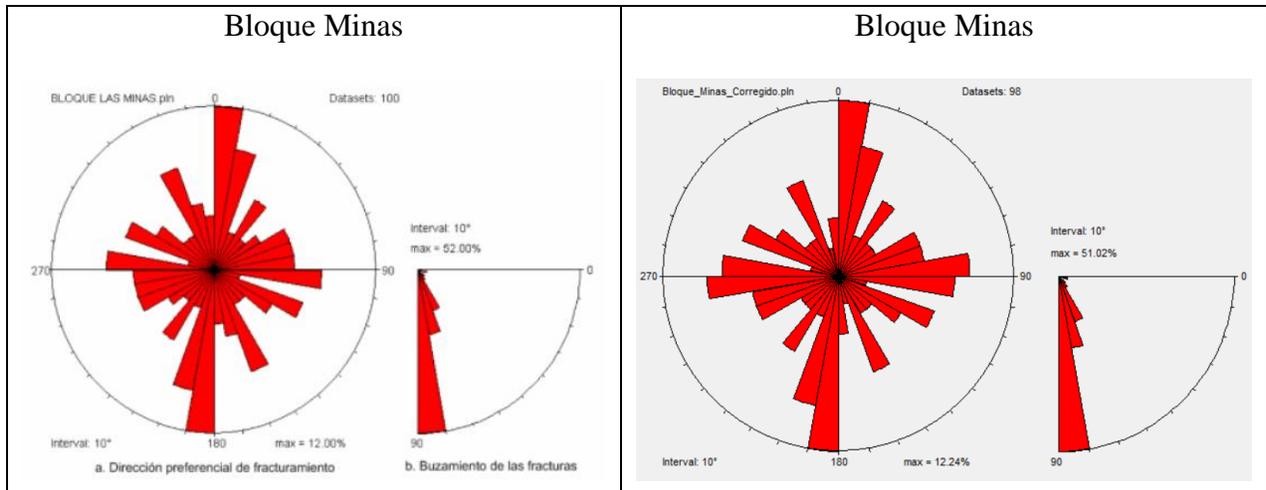
La información desajustada se centra en los bloques Tabacal y Mojarra. Parte de este último se encuentran dentro del área del presente proyecto, junto con el bloque Minas. Es por esto que a continuación se muestra la comparación entre los resultados obtenidos por Vargas (2008) en la

zona de interés y los que resultan al eliminar los datos repetidos ya mencionados, observándose cambio solo en la dirección preferencial en el bloque Mojarra, que pasa de N70-80W a N50-60W. Para una mejor comparación, el procesamiento de los datos se realiza en TectonicsFP, el mismo programa utilizado por Vargas (2008).

Tabla 6.

Comparación de resultados originales con resultados corregidos.





Al igual que los trabajos ya mencionados, la identificación de la dirección preferencial de diaclasas del presente trabajo de investigación se desarrolla a partir de la recopilación de datos estructurales medidos en campo y datos secundarios, seguido del respectivo tratamiento geostadístico, en este caso se utilizó el software GeoRose 0.5.1.

6.1.2 Análisis del sistema de fracturas

En relación al análisis de los patrones de fractura en la Mesa de los Santos, Contreras (2008) propone sectores de interés hidrogeológico asociados a la Formación Los Santos a través de mapas cualitativos de distribución espacial usando atributos de fractura relacionados con la apertura, la densidad y el buzamiento (Figura 30). Debido a la similitud del anterior proyecto con el presente trabajo de investigación, es necesario conocer la metodología y la naturaleza de su diagnóstico para esclarecer diferencias.

En primer lugar, el criterio de apertura utilizado por Contreras (2008) se definió a partir de las direcciones de los esfuerzos de la zona asignando un carácter abierto o cerrado si era un esfuerzo distensivo o compresivo; diferente al abordaje cuantitativo de apertura realizado en el

presente trabajo, el cual consiste en medir directamente en campo el espaciamiento entre las paredes de la fractura con un comparador graduado logarítmicamente.

El segundo parámetro evaluado es la densidad, la cual se categoriza en alta, media y baja según el espaciamiento promedio entre fracturas encontrado en campo sin especificar algún método de muestreo. En publicaciones recientes (por ejemplo, Zeeb et al., 2013) esta definición de espaciamiento es reemplazada por el concepto de intensidad, el cual abordaremos en dos dimensiones con líneas y ventanas circulares permitiendo estimar intensidad, densidad y tamaño de fractura. Finalmente, para el último mapa correspondiente al buzamiento, Contreras (2008) separa los buzamientos tomados en campo en rangos desde 0° hasta 90° creando cinco rangos: entre 0° - 10° , 10° - 20° , 20° - 40° , 40° - 70° y 70° - 90° .

Los mapas de distribución espacial de estos parámetros son por tanto un primer acercamiento, mayormente cualitativo, al estudio del sistema de fracturamiento en la zona sur de la Mesa de los Santos.

6.2 Comparación y validación de datos previos

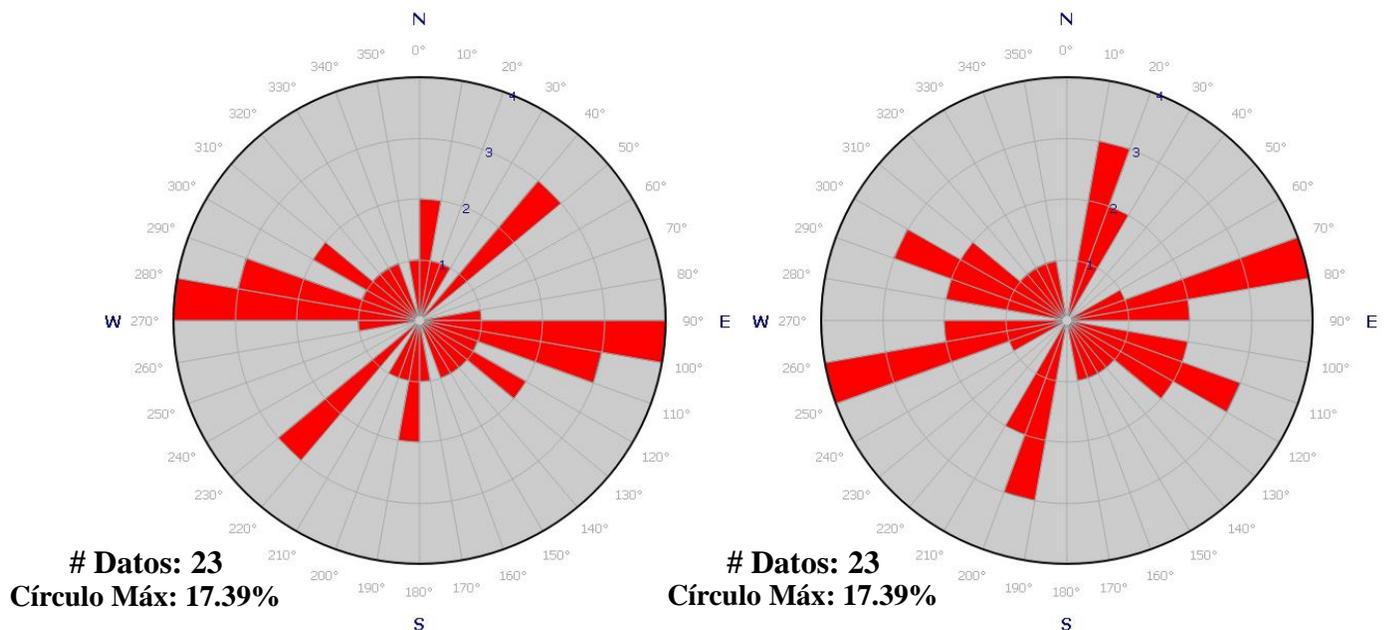
Previo a la campaña de campo se escogieron diez estaciones pertenecientes a la base de datos de planos de fracturas recolectados (estaciones del proyecto de Pinto et al., 2007) con el fin de hacer control al medir nuevamente y realizar comparaciones. Para esto, se generaron dos diagramas rosa mediante el software GeoRose, uno correspondiente a los planos de diaclasas de las diez estaciones de la base recolectada y otro a los nuevos planos medidos en la fase de campo del presente proyecto, generados con 23 datos estructurales cada uno.

Estos diagramas rosa permitieron observar la diferencia en orientación de los dos grupos de datos. Aunque se identifican algunas variaciones, no se consideran lo suficientemente

significativas para descartar la base de datos recolectada, por lo tanto, se confía en la información secundaria y se utiliza en el procesamiento de análisis de orientaciones preferenciales (presentado en la siguiente sección) con el mismo grado de importancia de los datos medidos en la campaña campo.

Figura 39.

Comparación de datos en diagramas rosa



Nota. A la izquierda el diagrama rosa de la base de datos (estaciones del proyecto de Pinto et al. (2007)) y a la derecha el diagrama rosa de los nuevos datos medidos en la campaña de campo.

6.3 Procesamiento y Caracterización Cuantitativa del Sistema de Fractura

En la campaña de campo se visitaron 22 estaciones donde se midieron datos estructurales y se tomó registro fotográfico para el posterior procesamiento. Los datos de diaclasas pertenecientes a las estaciones de la base de datos recolectada (Pinto et al., 2007) sólo se tuvieron

en cuenta para el cálculo de las orientaciones preferenciales. Ambos grupos de estaciones se muestran en la figura 40.

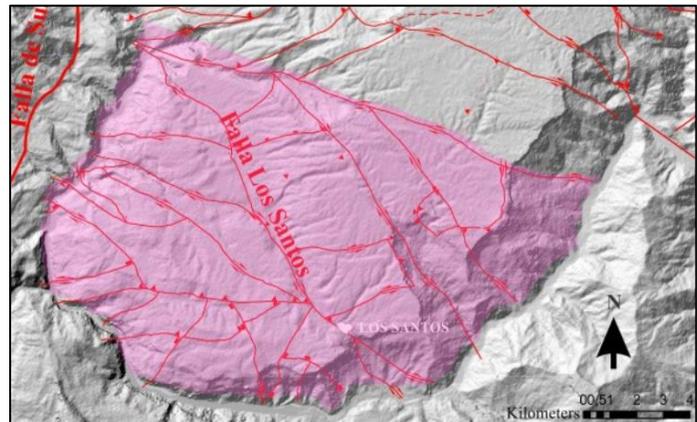
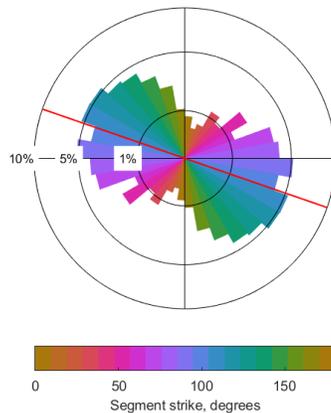
Los diagramas de dispersión de apertura, densidad, intensidad y longitud de fractura mostrados más adelante se organizan en sentido NE-SW, siguiendo una orientación perpendicular a las fallas longitudinales las cuales se representan como líneas rojas verticales en dichos diagramas. Debido a la linealidad de los diagramas de dispersión, la distribución representada no permite escalar las distancias reales entre las estaciones y las fallas, es por esto que para mayor comprensión espacial se recomienda revisar en conjunto los diagramas de dispersión (Figuras 44, 45, 48 y 49) y el mapa de fallas y estaciones (Figura 40).

- **Orientaciones regionales.** A través de FracPaQ se realizó el análisis a escala regional tomando como base el mapa de sombras de la zona, en el cual se trazaron lineamientos estructurales relacionados a las diferentes fallas que afectan la zona sur de la Mesa de Los Santos. El resultado indica una tendencia NW con el vector medio en dirección N70W (línea roja a lo largo del gráfico) (Figura 41) que marca la media circular resultante. La evaluación de esta tendencia es importante para determinar la influencia de las grandes trazas en pequeñas fracturas evidenciadas en afloramientos.

Figura 41.

Diagrama rosa regional FRACPAQ

Segment angles (equal area, length weighted), n=219



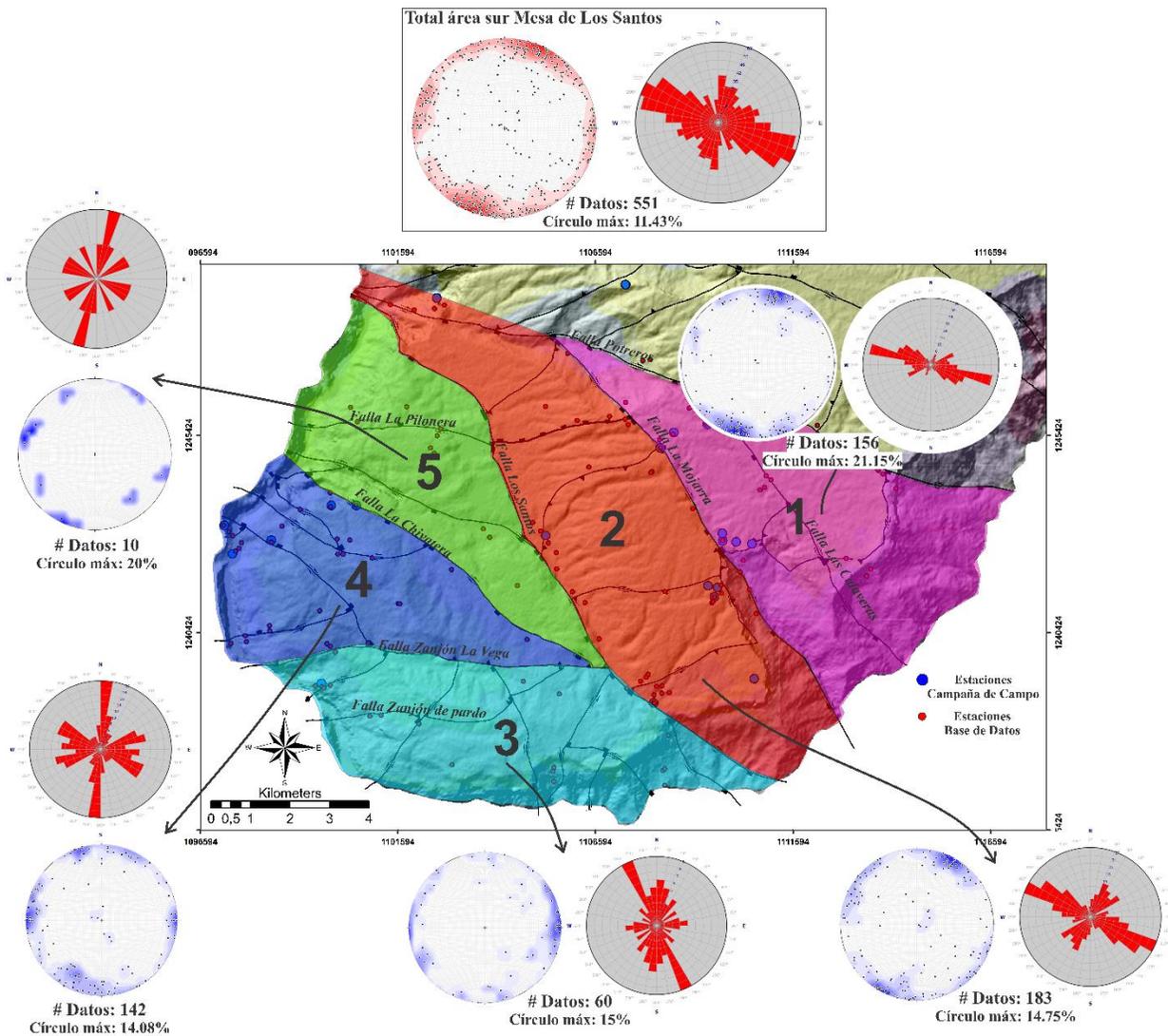
Nota. Diagrama rosa de toda el área de estudio obtenido a partir del trazo de lineamientos regionales. La línea roja a lo largo del gráfico de rosa indica la media circular resultante. A la izquierda se muestra el mapa de sombras utilizado para el procesamiento.

- **Orientación a escala de afloramiento: Datos medidos en campo.** Mediante el programa GeoRose 0.5.1 se determinaron tendencias de orientación preferencial a partir de la base de datos recolectada (Datos de Pinto et al. (2007)) y los nuevos datos medidos en la campaña de campo, con un total de 551 planos de fractura. La figura 42 muestra diagramas

rosa con las direcciones preferenciales de las fracturas del área de estudio y diagramas de densidad de polos que muestran predominios de inclinación de estos planos de fractura. Para esto se subdivide el área en bloques estructurales los cuales fueron delimitados por fallas.

Figura 42.

Diagramas rosa y densidad de polos de los bloques estructurales



Nota. En la zona superior se muestra el diagrama rosa y el diagrama de densidad de polos de todas las fracturas del área de estudio. En el mapa se ubican los mismos diagramas por bloques estructurales.

En la parte superior de la figura se encuentran los diagramas de toda la zona sur de la Mesa de Los Santos. La densidad de polos muestra predominio de altos grados de buzamiento, mientras que el diagrama rosa indica una orientación preferencial de **N65W**.

En cuanto a los resultados obtenidos en cada bloque estructural, se logra identificar predominio de altos grados de buzamiento en todos los casos, mientras que los diagramas rosa muestran tres tendencias principales de orientación de fracturas:

- ✓ Los bloques 1 y 2 comparten una orientación preferencial cercana de **N60-70W** y **N70-80W** respectivamente, concordantes con la orientación preferencial de toda el área y el rumbo regional de las fallas NW (fallas Potrereros, Las Calaveras, La Mojarra, Los Santos y La Chivatera), mostrados en el mapa (Figura 42).
- ✓ El bloque 3 registra una orientación preferencial **N20-30W**, la cual concuerda con algunos trazos de fallas cortas que intersecan la Falla Zanjón La Vega.
- ✓ El bloque 4 presenta una tendencia principal **N0-10E** representando las fracturas generadas por liberación de energía hacia el escarpe de la mesa (estaciones al oeste del bloque),
- ✓ Al suroeste, las orientaciones de los bloques 4 y 5 cambian de cuadrante presentando tendencias principales **N0-10E** y **N10-20E**, respectivamente, posiblemente representando fracturas ubicadas hacia el escarpe de la mesa, generadas por liberación de energía. El segundo conjunto de datos preferenciales

del bloque 4 muestra una dirección **N50-70W** y **N70-80E** concordante con el trazo de las fallas NW y NE del mismo bloque.

- ***Orientación a escala de afloramiento: Registro fotográfico.*** Se presentan los diagramas rosa obtenidos en FracPaQ de las 22 estaciones visitadas en campo (Figura 43). De manera individual, cada uno de estos diagramas presenta dos tendencias de orientación preferencial de fracturas correspondientes a las diaclasas trazadas perpendiculares a los planos de estratificación y a las subparalelas a la estratificación. Para la interpretación de estos resultados se realiza un análisis estadístico con el fin de determinar la media y la moda de las direcciones principales resultantes, ya que no es posible generar un solo diagrama a partir de estaciones individuales.

La primera moda registra una dirección **N20-30W** seguido de **N50-60W**; además se encuentra una segunda tendencia significativa **N60-70E** y **N30-40E**.

En comparación con las orientaciones obtenidas a partir de los datos medidos directamente en campo, se encuentran similitudes al correlacionar los datos y agruparlos en dos tendencias, sin embargo, la primera orientación preferencial se encuentra más hacia el norte (del diagrama rosa) de la encontrada para toda el área de estudio con GeoRose (**N60-70W**) (Figura 42), siendo más análoga con la encontrada para el bloque 3 (**N20-30W**). Por otro lado, la segunda tendencia **N60-70E** corresponde a una orientación perpendicular al anterior grupo, es decir son relacionadas a fracturas trazadas subparalelas a la estratificación (Tabla 7), por tanto, la más significativa es **N30-40E**.

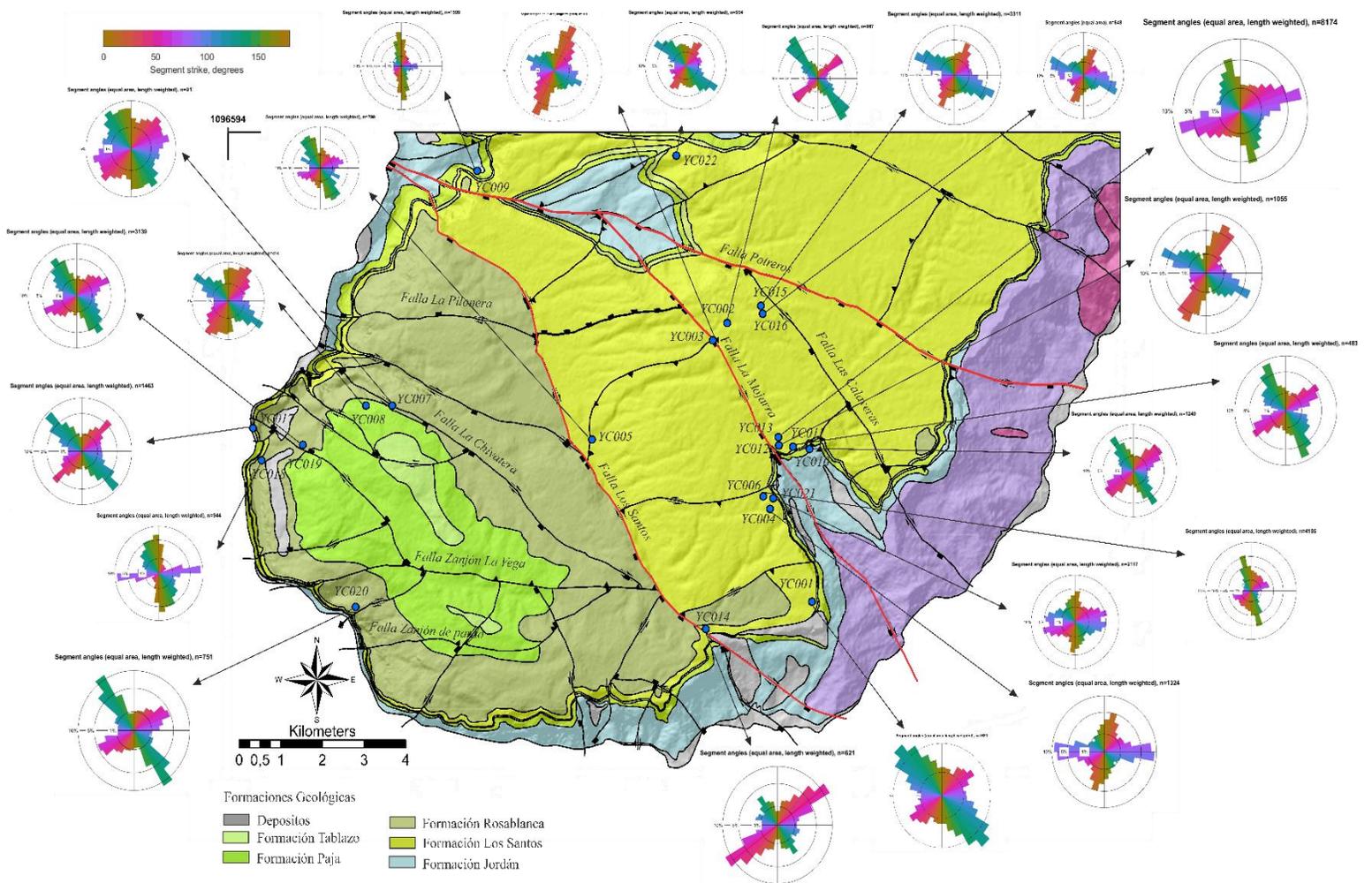
Del gráfico se analiza que las dos estaciones más cercanas a la Falla de Los Santos, YC005 y YC014, muestran tendencia hacia la orientación principal de la falla, aunque al sur

(YC014) predomine una tendencia ortogonal, es decir que se genera tensión asociada a la falla principal (la tensión es más propia de niveles superficiales de la falla). La gran mayoría de las estaciones cercanas a la Falla La Mojarra muestran este patrón similar, en donde las estaciones YC003 y YC013 son las que presentan la tendencia principal ortogonal a la falla. Las estaciones YC021 y YC004 muestran la orientación de la falla E-W antitética a la Falla La Mojarra. En el caso de las dos estaciones cercanas a la Falla Las Calaveras se identifica la tendencia hacia la orientación de la falla. Los diagramas de las estaciones YC009, YC018 y YC020, ubicadas en los escarpes de la mesa y que no muestran la orientación de algún trazo de falla cercano a la misma, podrían estar representando fracturas generadas por liberación de energía en esos bordes de mesa.

Las diferencias encontradas entre estos diagramas de rosa obtenidos por medio del registro fotográfico en FracPaQ y los diagramas rosa obtenidos por medio de GeoRose con datos estructurales medidos en campo, se pueden deber a que en campo no se midieron fracturas subparalelas a la estratificación.

Figura 43.

Mapa de diagramas rosa por estación obtenidos a partir de FracPaQ



6.3.1.2 Atributos geológicos. Las características litológicas y el espesor de la capa fotografiada se tuvieron en cuenta para hacer correlaciones con los demás parámetros en busca de patrones y tendencias que permitieran relacionar las diferentes estaciones. En la tabla 7 se registran estas características resumidas y ordenadas por estación.

Tabla 7.

Atributos geológicos de las estaciones medidas.

<i>Estación</i>	<i>Litología</i>	<i>Estratificación</i>	<i>Clasificación</i>	<i>Apertura promedio (mm)</i>	<i>Espesor (m)</i>
YC001	Bancos de arenisca de grano medio con lentes de arcillolitas verdosas.	170/8	Miembro medio de la Formación los Santos	5 Aperturas moderadamente anchas, algunas con relleno arcilloso y suelo residual.	4
YC002	Arenisca cuarzosa de grano fino.	30/4	Miembro superior de la Formación los Santos	3.9 Aperturas moderadamente anchas, algunas con relleno arcilloso y suelo residual.	1.25
YC003	Arenisca cuarzosa de grano fino.	22/5	Miembro superior de la Formación los Santos	9.2 Aperturas moderadamente anchas, algunas con relleno arcilloso y suelo residual.	0.75
YC004	Arenisca cuarzosa de grano fino.	35/18	Miembro superior de la Formación los Santos	1.5 Aperturas cerradas y rellenas de arcilla y suelo residual.	2.8
YC005	Arenisca cuarzosa de grano fino a medio.	230/15	Miembro superior de la Formación los Santos.	2 Aperturas moderadamente anchas rellenas parcialmente de fragmentos de roca.	1.5
YC006	Arenisca cuarzosa de grano fino.	225/6	Miembro superior de la Formación los Santos.	2 Aperturas abiertas, algunas con relleno de suelo residual.	1

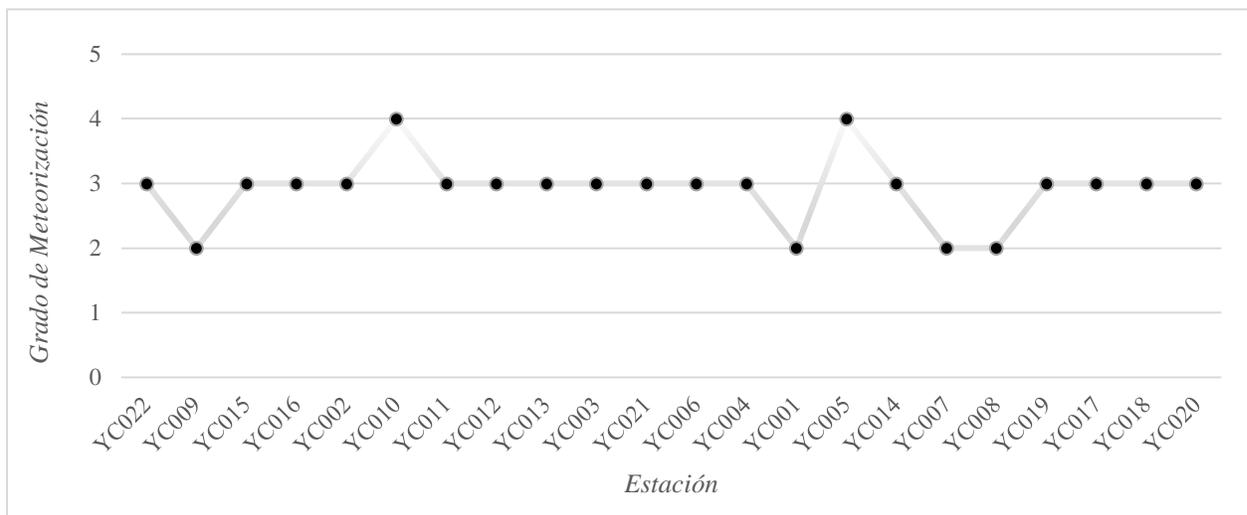
YC007	Bioesparita altamente fosilífera intercalada con niveles de micrita con intraclastos.	336/18	Nivel III de la Formación Rosablanca	22	1.8	Aperturas anchas, algunas con relleno arcilloso y suelo residual.
YC008	Micritas con contenido fósil (-10%) y lutitas calcáreas con concreciones.	225/10	Nivel III de la Formación Rosablanca	5	0.4	Aperturas moderadamente anchas, algunas rellenas con suelo residual (más delgadas).
YC009	Arenisca cuarzosa de grano fino.	241/14	Miembro superior de la Formación los Santos.	1.1	3	Aperturas rellenas parcialmente de suelo residual.
YC010	Arenisca de grano muy fino.	330/7	Formación Jordán	0.5	0.3	Aperturas parcialmente abiertas.
YC011	Arenisca de grano fino intercalada con arcillolita verde grisácea.	190/18	Miembro superior a medio de la Formación los Santos	1.6	1.75	Aperturas abiertas, algunas con relleno arcilloso y suelo residual.
YC012	Arenisca de grano fino intercalada con arcillolita verde grisácea.	225/10	Miembro superior a medio de la Formación los Santos.	2	2	Aperturas abiertas, algunas con relleno arcilloso y suelo residual
YC013	Arenisca de grano medio a fino moderadamente cementada	146/11	Miembro superior de la Formación los Santos	13.5	2	Aperturas anchas, algunas con relleno arcilloso y suelo residual
YC014	Arenisca de grano medio a fino con intercalaciones acuñaadas de arenisca de grano muy fino verdosas.	210/13	Miembro superior a medio de la Formación los Santos	0.8	3	Aperturas abiertas
YC015	Arenisca de grano grueso a medio	141/6	Miembro superior de la Formación los Santos	4	1.7	Aperturas moderadamente anchas. La mayoría parcialmente rellena de fragmentos de roca.
YC016	Arenisca de grano fino intercalada con arcillolita verde grisácea.	131/6	Miembro superior a medio de la Formación los Santos	0.7	1.5	Aperturas rellenas de suelo.

YC017	Arenisca de grano medio.	248/8	Miembro Superior de la Formación los Santos.	10 Aperturas moderadamente anchas	2
YC018	Capas de yeso intercaladas con calizas y margas.	350/4	Mina El Carrancho. Nivel II de la Formación Rosablanca	3.5 Aperturas moderadamente anchas	1.7
YC019	Capas tabulares de roca calcárea color negro intercaladas con capas delgadas de lodolitas calcáreas con concreciones de 7cm	345/6	Nivel III de la Formación Rosablanca	5 Aperturas moderadamente anchas, algunas rellenas de sedimentos.	1.5
YC020	Capas de yeso intercaladas con calizas y margas.	272/8	Mina la Nacuma. Nivel II de la Formación Rosablanca	2.2 Abiertas en su mayoría y otras rellenas de sedimentos.	1.6
YC021	Arenisca de grano medio a fino moderadamente cementada	295/6	Miembro superior de la Formación los Santos	10 Aperturas moderadamente anchas, algunas con relleno arcilloso y suelo residual	1.75
YC022	Arenisca de grano fino a muy fino	260/8	Miembro superior de la Formación los Santos	9.6 Aperturas moderadamente anchas, algunas con relleno arcilloso y suelo residual	2.3

6.3.1.3 Meteorización. El grado de meteorización en los afloramientos utilizados para realizar las mediciones es similar en toda el área de muestreo (Figura 44). Para la zona sur de la Mesa de los Santos es de grado II a IV, donde la mayoría de afloramientos se encuentran en grado III con la característica común del desarrollo de suelo residual color amarillento rojizo en la parte más superficial.

Figura 44.

Gráfico de dispersión de los grados de meteorización



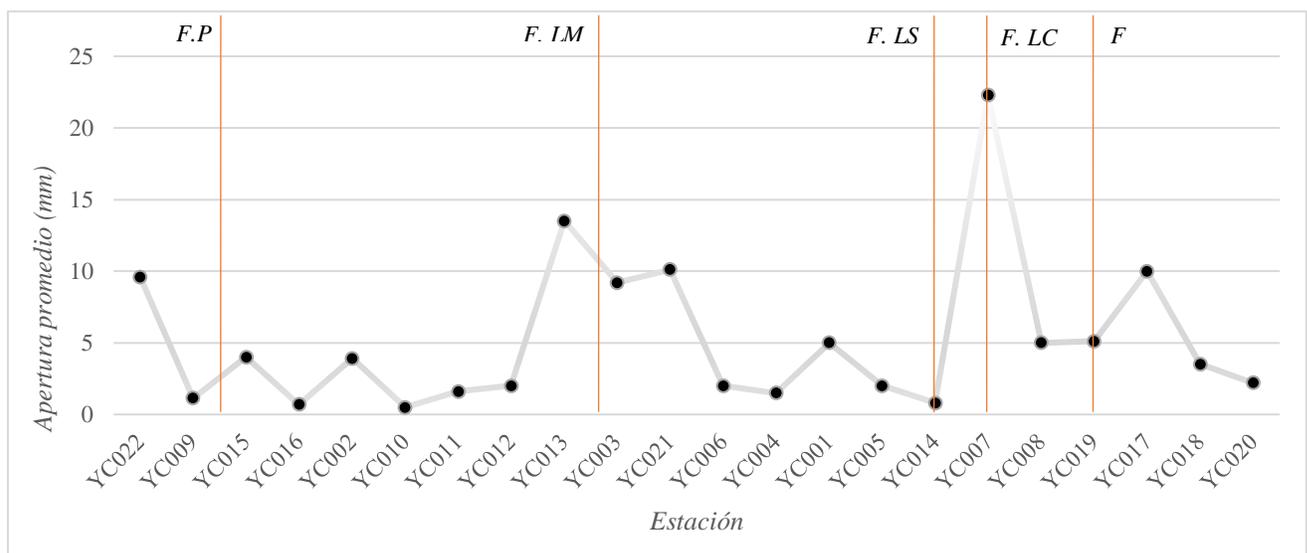
Esta similitud resultante permite la comparación de los datos en diferentes zonas y son un insumo para la definición de parámetros que clasifican detalladamente los macizos rocosos y permiten una lectura más detallada de sus propiedades geomecánicas como el índice de calidad Q (Ramírez & Alejano, 2004). La importancia de realizar comparaciones de meteorización entre los afloramientos de la zona radica en su efecto sobre las propiedades mecánicas de los materiales a los que afecta, ya que estos ejercen una influencia en el grado de fracturamiento y, por tanto, favorecen o impiden la infiltración de agua.

6.3.1.4 Apertura. La escala mínima utilizada para identificar las aperturas en campo fue de 0.05 mm utilizando el comparador logarítmico de Ortega et al. (2006). A partir de esta escala se registraron valores mínimos de 0.14 mm y máximos de 80 mm. El valor máximo promedio fue de 22 mm en la estación YC007 (Figura 45); esta estación se encuentra localizada en las laderas de la quebrada Chivatera, por lo cual se consideró un valor anormal debido a la acción erosiva de la corriente de agua en las paredes de la roca que pudo influir en el grosor de la abertura. Por tanto, las aperturas más significativas se encuentran en las estaciones YC013, YC017, YC003, YC021 y YC022 pertenecientes al miembro superior de la Formación los Santos asociadas a las fallas NW de la zona (Los Santos y La Mojarra) (Figura 40).

Generalmente las menores aperturas se encuentran en zonas distanciadas de fallas; un ejemplo de esto es la correlación de un grupo de estaciones ubicadas al noreste de la Falla la Mojarra desde la estación YC010 (estación más lejana a la falla) hasta la estación 13, en la cual se observa un aumento progresivo en el valor de la apertura al acercarse a su trazo regional.

Figura 45.

Gráfico de dispersión de la apertura



Nota. F: Falla, F. P: Falla Potreros, F. LM: Falla La Mojarra, F.LS: Falla Los Santos, F.LC: Falla La Chivatera.

6.3.1.5 Relleno. Debido al grado de meteorización promedio registrado para el área de estudio (Grado III), la mayoría de fracturas se rellenan parcialmente de fragmentos de suelo residual. Las más avanzadas en grado presentan relleno arcilloso sellando el espacio vacío.

6.3.2 Caracterización de parámetros de fractura

6.3.2.1 Análisis de intensidad, densidad y longitud de fractura. Siguiendo la metodología descrita anteriormente, se estimó la intensidad, densidad y longitud promedio de los patrones de fractura a través de FracPaQ. Los resultados se organizan en el mapa geológico del área (Figuras 47 y 48) donde se visualizan los rectángulos delimitadores utilizados por estación y clasificados en un rango comparativo de bajo, medio, alto y muy alto según los valores obtenidos. Los resultados cuantitativos se muestran en la tabla 8 y en graficas estadísticas de dispersión (Figura 48) que permiten una mejor visualización y comparación espacial de los datos de las diferentes estaciones.

En los rectángulos delimitadores se distinguen los principales patrones de fracturamiento, así como las fracturas más pequeñas presentes en cada afloramiento visitado.

Tabla 8.*Medidas de intensidad, densidad y longitud promedio*

<i>Estación</i>	<i>Intensidad (m^{-1})</i>	<i>Densidad (m^{-2})</i>	<i>Longitud promedio (cm)</i>
YC001	38.19	2535.40	3
YC002	34.38	1216.55	9
YC003	32.59	1237.11	7
YC004	18.18	510.48	12
YC005	27.46	1405.54	5
YC006	49.67	6064.11	3
YC007	11.95	289.81	14
YC008	24.34	570.64	10
YC009	21.66	1299.92	7
YC010	52.95	2389.00	5
YC011	43.63	2336.52	6
YC012	25.05	922.00	12
YC013	33.31	2131.55	6
YC014	18.36	353.08	13
YC015	18.59	790.68	7
YC016	27.23	536.87	13
YC017	34.45	3548.95	5
YC018	15.85	262.46	14
YC019	13.66	631.72	7
YC020	11.07	129.51	19
YC021	20.71	842.25	7
YC022	20.95	356.28	13

- **Intensidad y densidad.** Los valores de intensidad y densidad de fracturamiento obtenidos a partir de FracPaQ son estimaciones de la abundancia de fracturas en los afloramientos

visitados. Los valores se correlacionan con las características geológicas y geomecánicas para obtener resultados más acertados.

Figura 46.

Mapa de intensidad de la zona de estudio

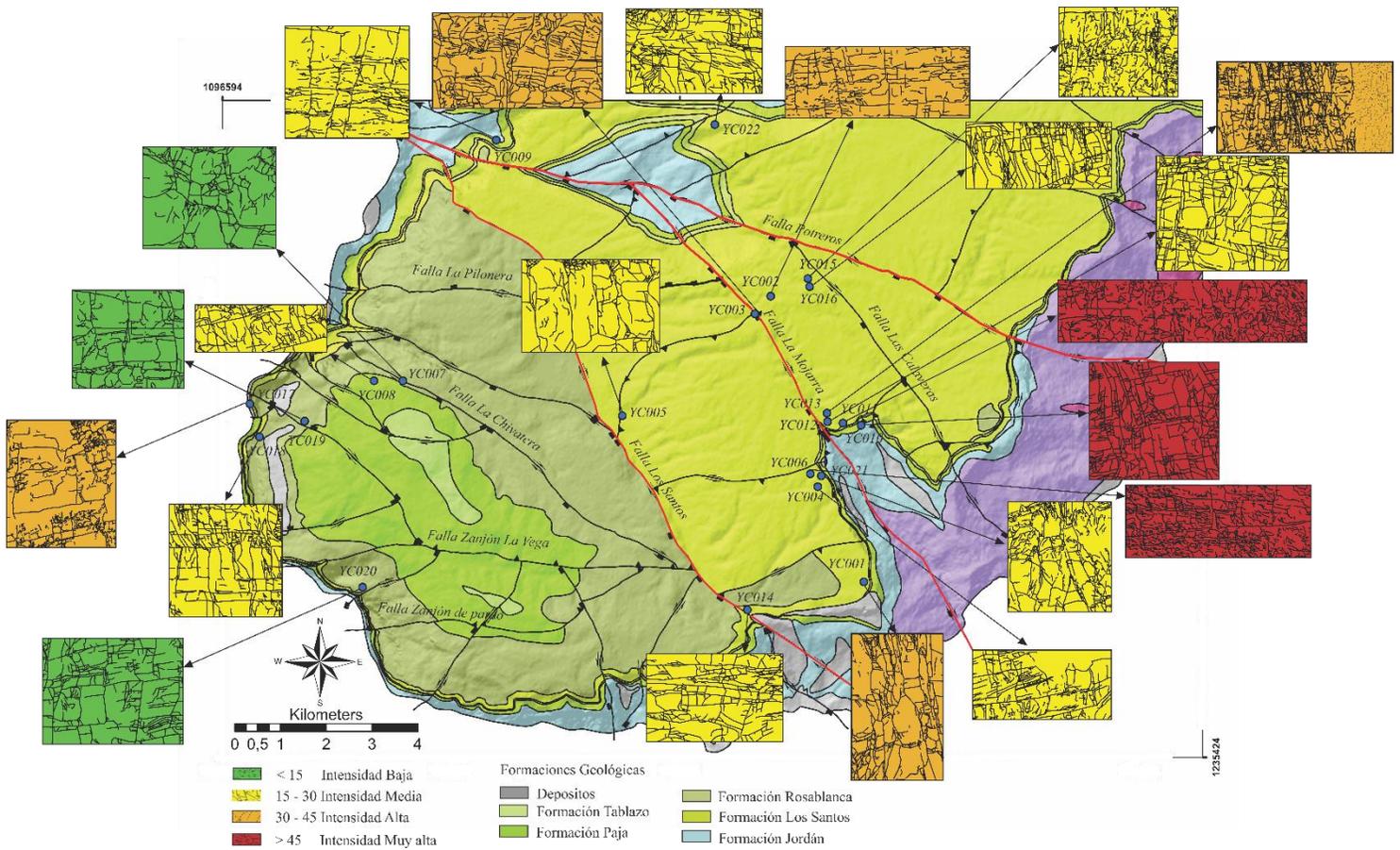
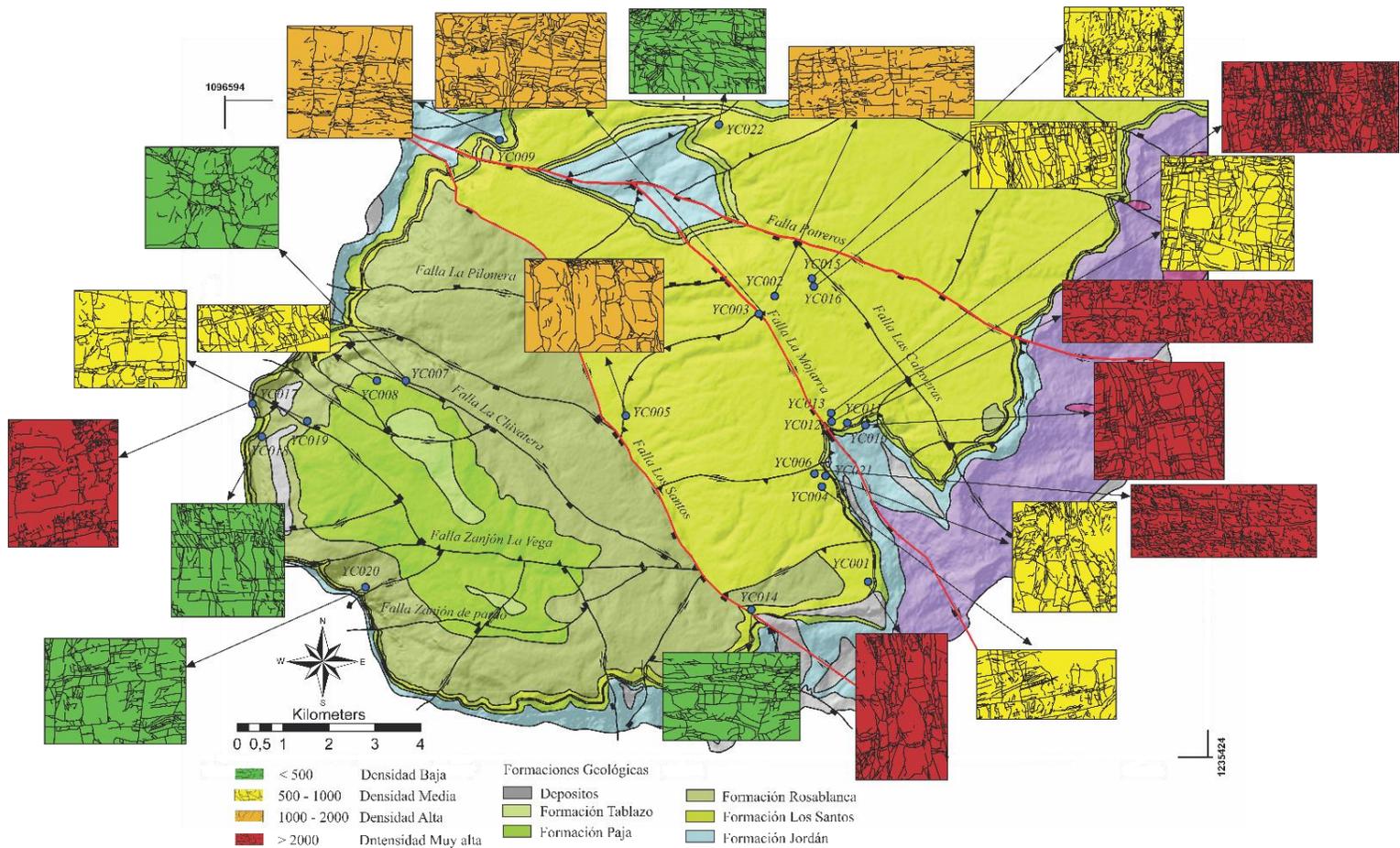


Figura 47.

Mapa de densidad de la zona de estudio



Al sur de la Mesa de los Santos las zonas que presentan mayor fracturamiento están asociadas a las fallas longitudinales NW del área de estudio, especialmente la zona de influencia de la Falla La Mojarrá la cual se evidencia en el miembro superior de la Formación Los Santos donde se registran los valores más altos de intensidad y densidad (Tabla 8); Al NE de esta falla se encuentra también la estación YC006 con el mayor valor de densidad encontrado de 6064 m^{-2} y la estación YC001 de densidad 2535 m^{-2} . Por otro lado, el menor valor se registra al suroeste, en la estación YC020 asociada a la Formación Rosablanca de densidad 129.51 m^{-2} . De igual manera las estaciones asociadas a esta unidad, ubicadas al

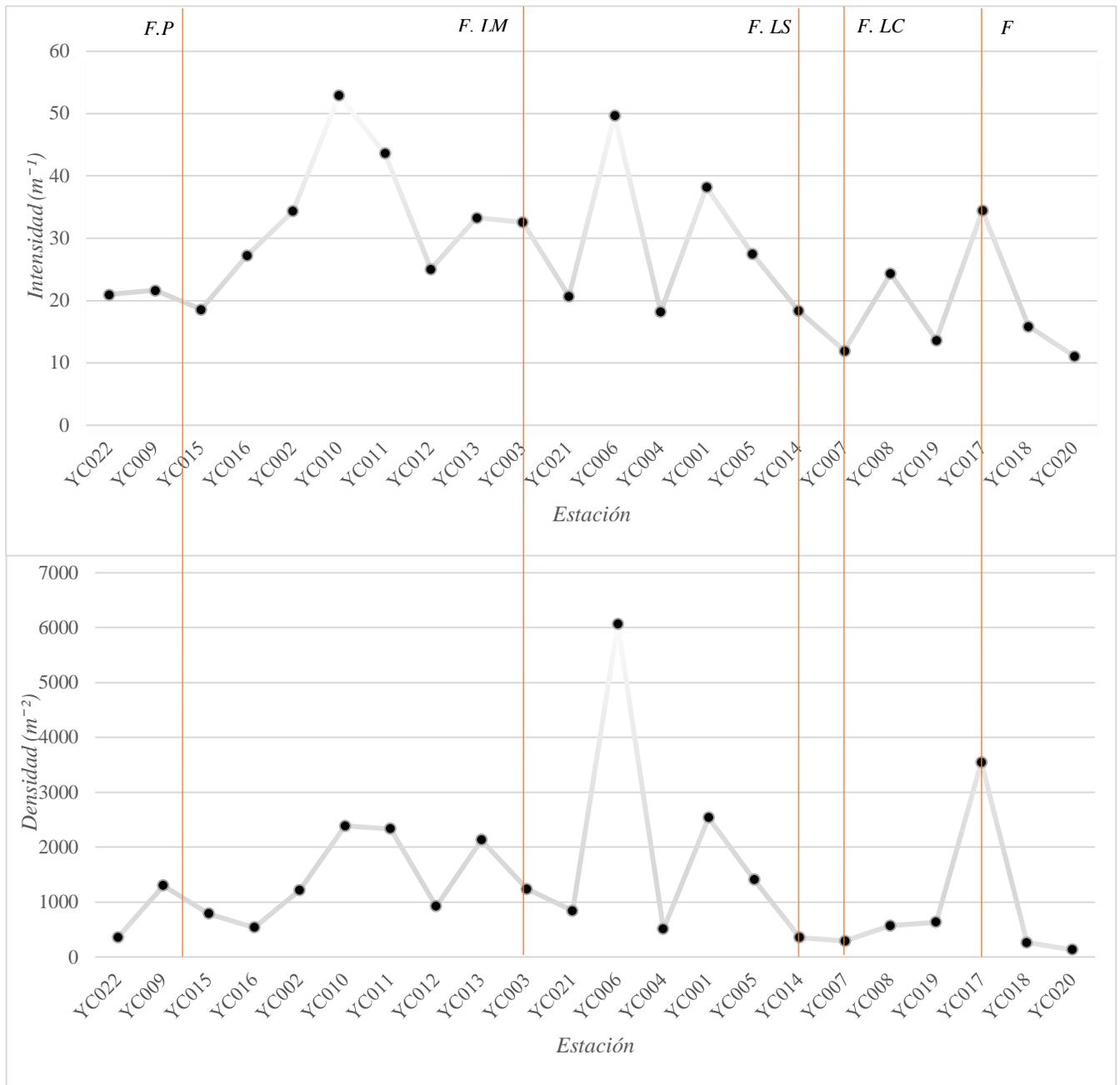
suroeste de la zona de estudio presentan las estimaciones más bajas tanto de intensidad como de densidad. Otra característica importante está presente en los cruces de fallas donde se encuentran las estaciones YC003, YC006 y YC005 que presentan densidad significativa.

En conclusión, la zona de influencia de La Falla La Mojarra se asocia con los valores de intensidad y densidad más altos, así como al evidente control en el grosor de la apertura de las fracturas que permiten catalogar este corredor como la zona más favorable para la posible infiltración y almacenamiento de fluidos. Esta predicción podría aplicarse a todo el trazo regional donde no se pudo tener registro por la disposición del terreno.

Litológicamente, los valores más altos se presentan en el miembro superior de la Formación Los Santos constituido por areniscas cuarzosas con variaciones granulométricas de grano medio a muy fino y diferentes grados de compactación. Por otro lado, los valores más bajos se presentan en el nivel II y III de la Formación Rosablanca constituidos por litologías calcáreas y evaporíticas en capas de espesor variable, principalmente secuencias de capas de caliza intercaladas con yeso, margas y en ocasiones lodolitas calcáreas.

Figura 48.

Diagramas de dispersión de intensidad y densidad



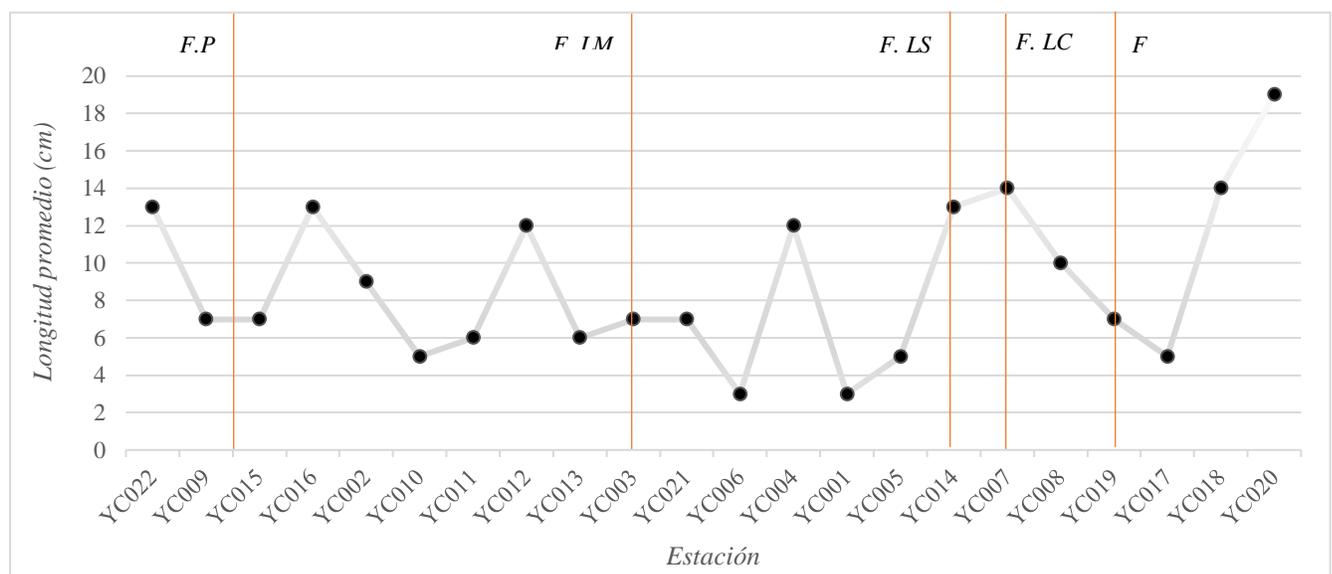
Nota. F: Falla, F. P: Falla Potreros, F. LM: Falla La Mojarra, F. LS: Falla Los Santos, F. LC: Falla La Chivatera.

- Longitud promedio.** Se observa que en general la longitud promedio de las fracturas es menor a 20 cm. Las medidas más largas se atribuyen a las diaclasas con trazos verticales y las más cortas son asociadas a fracturas subparalelas a la estratificación. La relación de la longitud con la densidad es inversamente proporcional. Las estaciones con mayor densidad (por ejemplo, YC006, YC010, YC017) presentan las longitudes de traza promedio más cortas en comparación con las estaciones de más baja densidad (por ejemplo, YC007, YC020, YC018) que tiene longitudes promedio de 14 cm y 19 cm. Es importante señalar que las medidas de longitud promedio están confinadas a una capa o estrato individual del afloramiento que a la vez se restringen a las líneas de fractura trazadas en el cuadro delimitador con un nivel de zoom significativo, es decir se tomaron longitudes de milímetros y centímetros.

El espesor de los estratos en la zona visitada no presenta diferencias significativas, abarcando un rango de 0.4 m – 4 m y un promedio de 1.8 m. La comparación de estos dos parámetros (espesor y longitud) no indica una relación apreciable para realizar conclusiones significativas.

Figura 49.

Gráfico de dispersión de la longitud de traza promedio



Nota. F: Falla, F. P: Falla Potreros, F. LM: Falla La Mojarra, F. LS: Falla Los Santos, F. LC: Falla La Chivatera.

6.3.2.2 Análisis preliminar del flujo de fluidos. Las siguientes interpretaciones son significativas en el caso de que se garantice la presencia de un fluido transportado a través de las diferentes estructuras.

El análisis preliminar del flujo de fluidos se realizó mediante el gráfico ternario de conectividad y la elipse tensor de permeabilidad en dirección del flujo. Los resultados obtenidos (Figura 50) y su relación con las orientaciones preferenciales de los bloques estructurales y las fallas regionales son un primer paso al entendimiento del transporte de fluidos a través de porosidad secundaria en la zona sur de la Mesa de los Santos.

- ***Conectividad y Permeabilidad.*** De manera general, las redes más conectadas se trazarán hacia la línea Y-X del gráfico ternario ubicada en la parte inferior, mientras que las redes menos conectadas se trazarán hacia el vértice I. Para evaluar la conexión por línea (CL) se tomaron de referencia las líneas de conectividad de contorno para $CL = 2$ y 3.57 , donde los resultados mayores a 2 contarán con mejores conectividades. Por otra parte, la estimación de la permeabilidad se realizó a través del tensor de fractura con la elipse de permeabilidad en dirección del flujo, donde el eje principal del elipsoide (orientación en la cual se alarga) está en la dirección de máxima permeabilidad (k_1), es decir, indica el camino más probable que favorecería el flujo de un potencial fluido a través de la red de fracturas.

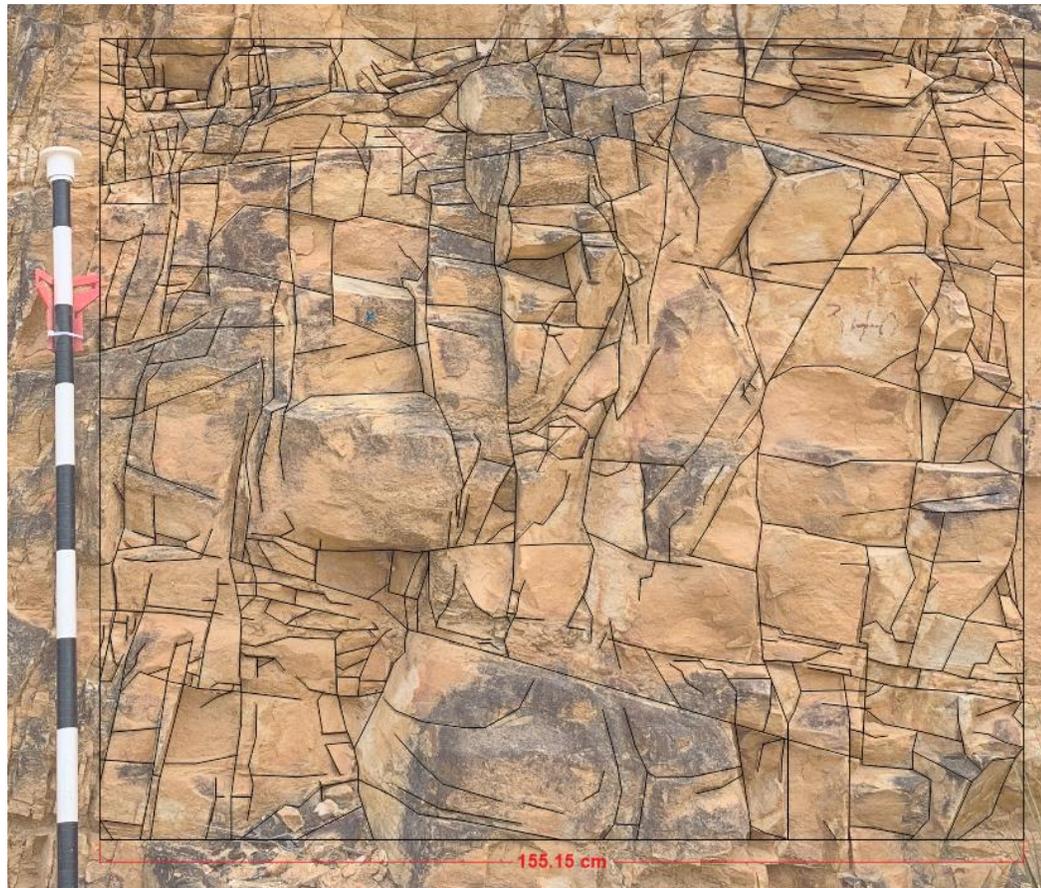
Para el bloque 1, la mayoría de los gráficos ternarios muestran una conexión por línea mayor a 2 donde la elipse de permeabilidad en dirección del flujo se orienta hacia el NW-

SE concordando con la orientación preferencial de las diaclasas obtenidas para este bloque y relacionadas en el registro fotográfico con las fracturas más extensas y de mayor buzamiento (80° - 90°) expuestas en el afloramiento (Figura 50). Para ejemplificar estas conclusiones se presentan los gráficos previamente descritos para la estación YC012 ubicada espacialmente en el bloque 1 y asociada estratigráficamente al miembro superior de la Formación Los Santos (Figura 51). En el bloque 2, la dirección de permeabilidad cambia a NE-SW mostrando una relación más cercana con las fracturas subparalelas a la estratificación y de conexión por línea variable, cercana y en algunos casos superiores a 2 (Figura 52). En este bloque se observan fallas en sentido E-W que pueden influir en el comportamiento de la permeabilidad.

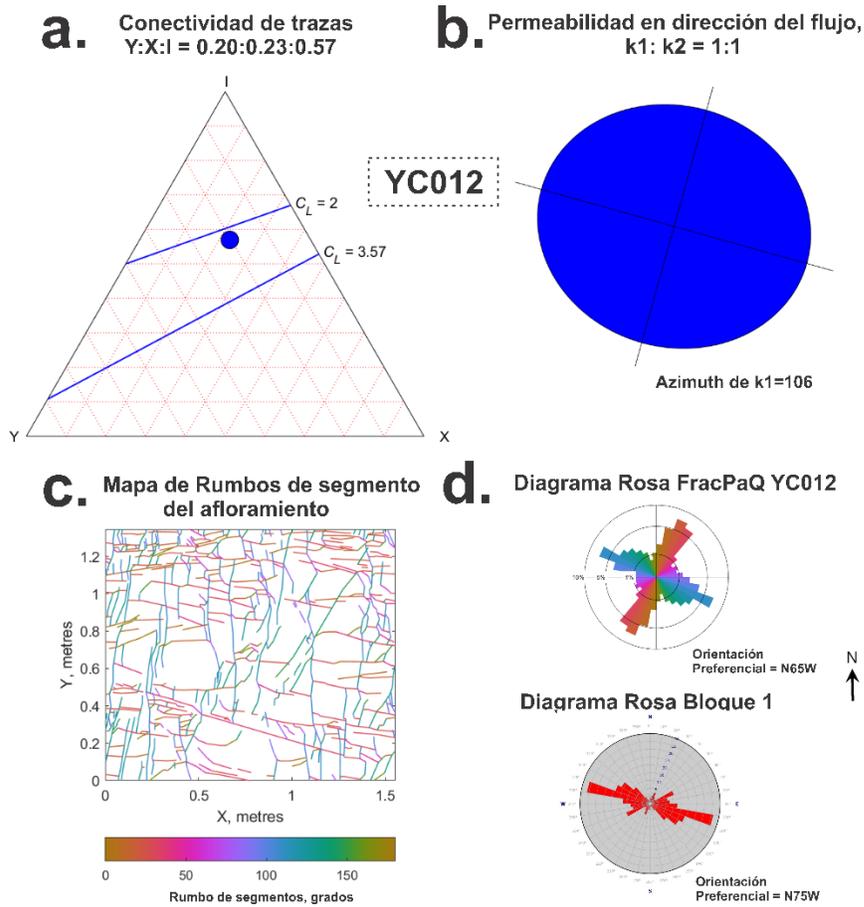
Dada estas características es posible señalar la Falla La Mojarra como la causante del cambio en la dirección, la cual se comportaría como corredor para los acuíferos adyacentes, favoreciendo más localmente el flujo.

Figura 50.

Registro fotográfico digitalizado de la estación YC012.

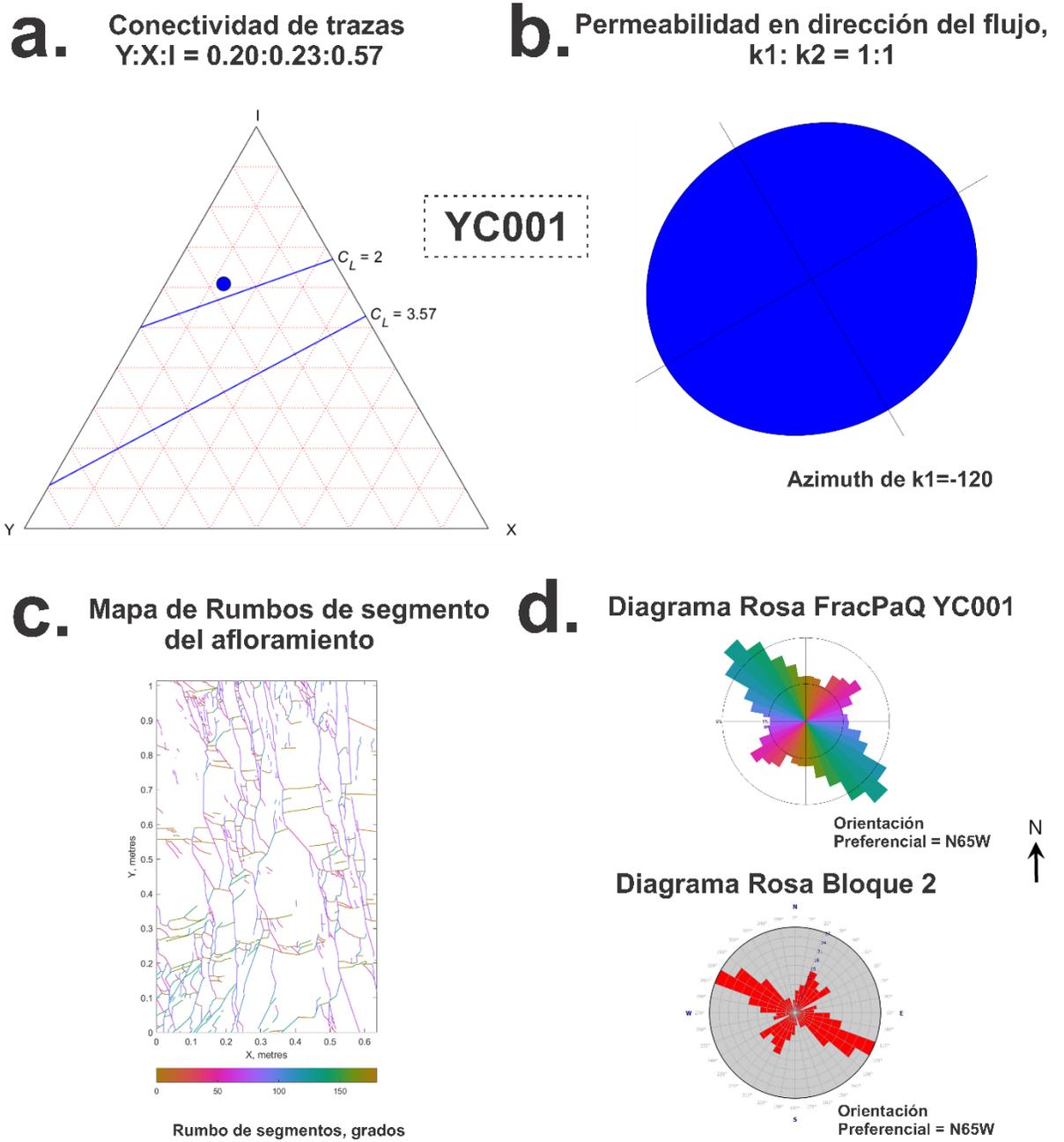


Nota. Foto orientada a 70°N

Figura 51.*Relación entre gráficos estación YC012*

Nota. a. Gráfico ternario de conectividad para la estación YC012. b. Permeabilidad en dirección del flujo de la estación YC012, k_{ij} describe un tensor de permeabilidad de segundo orden para el flujo de fluido a través de la red de fracturas. c. Mapa de rumbos de segmento a partir de la digitalización del registro fotográfico de la estación YC012. d. Diagrama rosa de la estación YC012 y diagrama rosa del bloque 1. Estas características son comparables con las demás estaciones para el bloque 1, donde se presentan las mejores condiciones de conectividad y permeabilidad asociada a mayores buzamientos que permitirían la infiltración a mayores profundidades.

Figura 52.
Relación entre gráficos estación YC001



Nota. a. Gráfico ternario de conectividad para la estación YC001. b. Permeabilidad en dirección del flujo de la estación YC001. c. Mapa de rumbos de segmento a partir de la digitalización del registro fotográfico de la estación YC001. d. Diagrama rosa de la estación

YC001 y diagrama rosa del bloque 2. Estas características son comparables con la mayoría de estaciones para el bloque 2.

Las elipses de permeabilidad en dirección del flujo de las estaciones pertenecientes al bloque 3 y 4 comparten una dirección de permeabilidad máxima orientada al NW-SE, concordante con la orientación preferencial de las diaclasas para el bloque 3 (N20-30W). Sin embargo, las estaciones cercanas a la Falla La Chivatera (YC007 y YC008) cambian a una dirección NE-SW. En general, la parte oeste del área de estudio asociada la Formación Rosablanca presenta la menor conexión por línea con un promedio menor a 2, que indica las condiciones menos favorables de conectividad al tener la mayor proporción de nodos aislados.

Según la mayoría de inclinaciones observadas en diagramas de polo (80° - 90°) pueden presentarse condiciones favorables para mantener tal conectividad en profundidad y por lo tanto posibilidades de acuíferos fracturados si hay suficiente recarga.

Figura 53.

Mapa de conectividad y permeabilidad de la zona

diagramas de flechas y balones de playa (diedros rectos); 2) orientación de los ejes de esfuerzo principales (σ_1 , σ_2 y σ_3) en diagramas de planos proyectados en el hemisferio inferior (diagramas Angelier); y 3) la relación de los mismos en el círculo de Mohr. Así mismo, se cuantifican los índices R y R'. Adicionalmente, los planos resultantes del procesamiento de inversión de esfuerzos se relacionan con los trazos de fallas de la zona.

6.4.1 Estimación de tensor por estación.

En la campaña de campo se recolectaron 54 datos de estrías distribuidos en cuatro estaciones (YC001, YC009, YC012 y YC021) localizadas en el bloque 2, cercanas a las fallas de La Mojarra y Potrereros (Figura 40).

Los resultados del análisis cinemático de cada una de las estaciones fueron obtenidos a través del software WinTensor siguiendo la metodología explicada en la sección 5.4. Estos resultados son sintetizados en la figura 54 y tabla 9, y descritos a continuación:

- El tensor resultante YC001 se obtuvo con 22 datos de 24 iniciales, reconociendo un máximo de compresión horizontal con orientación E-W (flechas azules), y un máximo de extensión horizontal con orientación aproximada N-S (flechas rojas). Las orientaciones de los esfuerzos principales obtenidos son: σ_1 : 272/01, σ_2 : 0174/83 y σ_3 : 002/07. El gráfico del círculo de Mohr junto con el índice $R' = 1.50$ se compara con la tabla 1 y la figura 9 (En sección 3.3.2.2) indicando que el régimen de esfuerzos que actuó para formar las fallas relacionadas, es de tipo **Transcurrencia pura**.
- El tensor resultante YC009 se obtuvo con 15 datos de 18 iniciales, reconociendo un máximo de compresión subhorizontal con orientación NW-SE (flechas azules), y un

máximo de extensión subhorizontal con orientación aproximada NE-SW (flechas rojas). Las orientaciones de los esfuerzos principales obtenidos son: σ_1 : 136/12, σ_2 : 008/71 y σ_3 : 229/14. El gráfico del círculo de Mohr junto con el índice $R' = 1.50$ se compara con la tabla 1 y la figura 9 (En sección 3.3.2.2) indicando que el régimen de esfuerzos que actuó para formar las fallas relacionadas, es de tipo **Transcurrencia pura**.

- El tensor resultante YC012 se obtuvo con cinco datos de seis iniciales, reconociendo un máximo de compresión horizontal con orientación NE-SW (flechas azules), y un máximo de extensión subhorizontal con orientación aproximada NW-SE (flechas rojas). Las orientaciones de los esfuerzos principales obtenidos son: σ_1 : 043/01, σ_2 : 135/75 y σ_3 : 312/15. El gráfico del círculo de Mohr junto con el índice $R' = 1.50$ se compara con la tabla 1 y la figura 9 (En sección 3.3.2.2) indicando que el régimen de esfuerzos que actuó para formar las fallas relacionadas, es de tipo **Transcurrencia pura**.
- El tensor resultante YC021 se obtuvo con cuatro datos de seis iniciales, reconociendo un máximo de compresión horizontal con orientación E-W (flechas azules), y un máximo de extensión subhorizontal con orientación aproximada N-S (flechas rojas). Las orientaciones de los esfuerzos principales obtenidos son: σ_1 : 089/03, σ_2 : 194/78 y σ_3 : 358/11. El gráfico del círculo de Mohr junto con el índice $R' = 1.50$ se compara con la tabla 1 y la figura 9 (En sección 3.3.2.2) indicando que el régimen de esfuerzos que actuó para formar las fallas relacionadas, es de tipo **Transcurrencia pura**.

Tabla 9

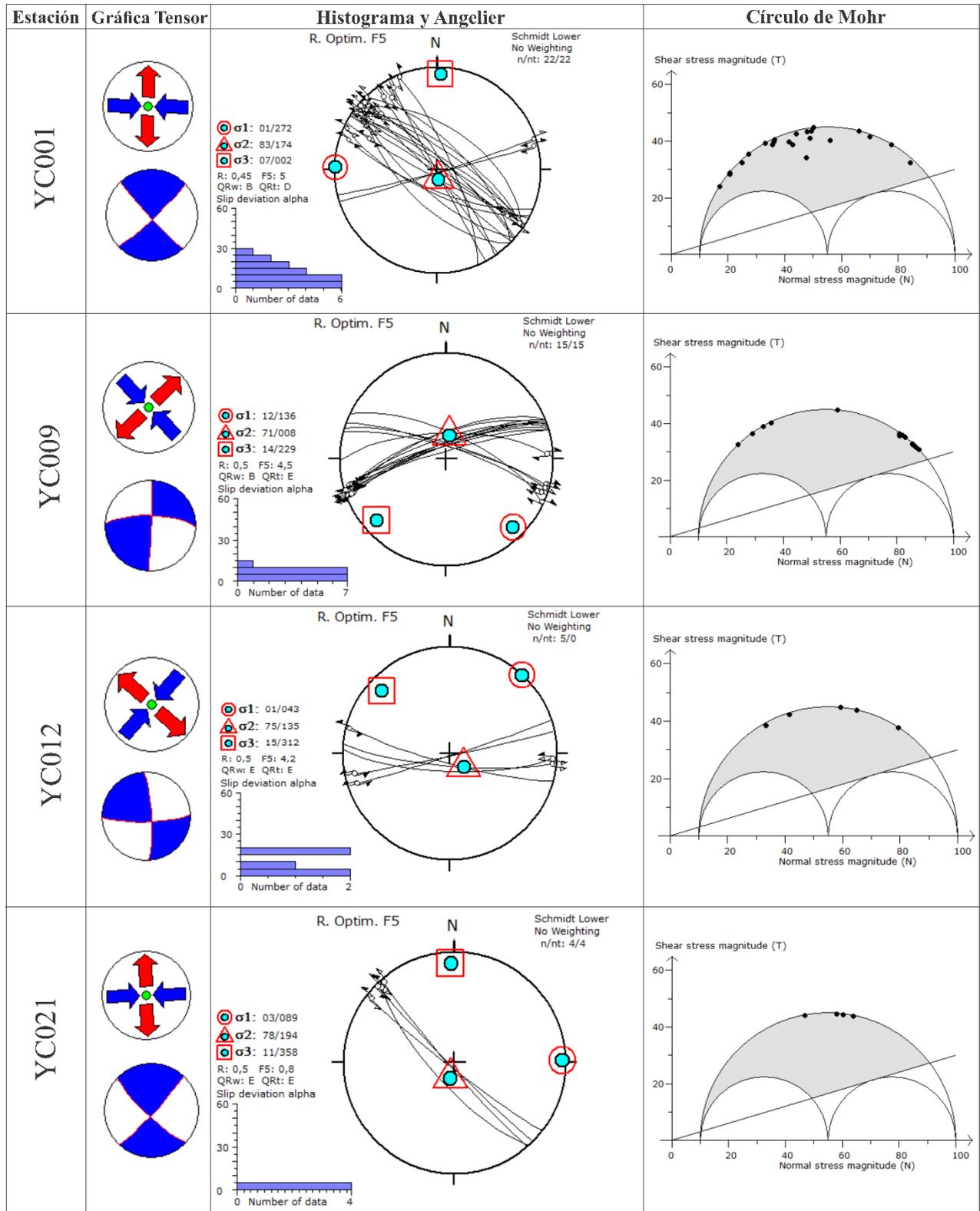
Datos y algunos resultados de los tensores de esfuerzos obtenidos con el análisis de planos estriados de falla en cada estación.

Estación	Coordenadas		Unidad Geológica	Edad	Método	n Subconjunto	n Total Tensor	n Total Estación	α	R	R'	Sh max	Régimen de Esfuerzo
	X (m)	Y (m)											
YC001	11106 16	12392 54	Los Santos Miembro Superior	Berriano	R. Optim	24	22	24	11	0,45	1,5	91	Transcurrencia pura
YC009	11025 80	12489 00	Los Santos Miembro Medio	Berriano	R. Optim	18	15	18	5,1	0,5	1,5	136	Transcurrencia pura
YC012	11098 21	12427 51	Los Santos Miembro Superior	Berriano	R. Optim	6	5	6	8,9	0,5	1,5	42	Transcurrencia pura
YC021	11096 86	12415 68	Los Santos Miembro Superior	Berriano	R. Optim	6	4	6	1,4	0,5	1,5	88	Transcurrencia pura

Nota. Entre los parámetros tabulados, n: número de datos usados para el tensor; nSubco: número de datos del subconjunto; n Total Estación: número de datos de la estación; n total tensor: número de datos usados para el cálculo del tensor; α : desviación media del deslizamiento; R: relación de esfuerzos $(\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)$; R': índice del tipo de tensor; Shmax: Dirección del esfuerzo principal horizontal máxim.

Figura 54

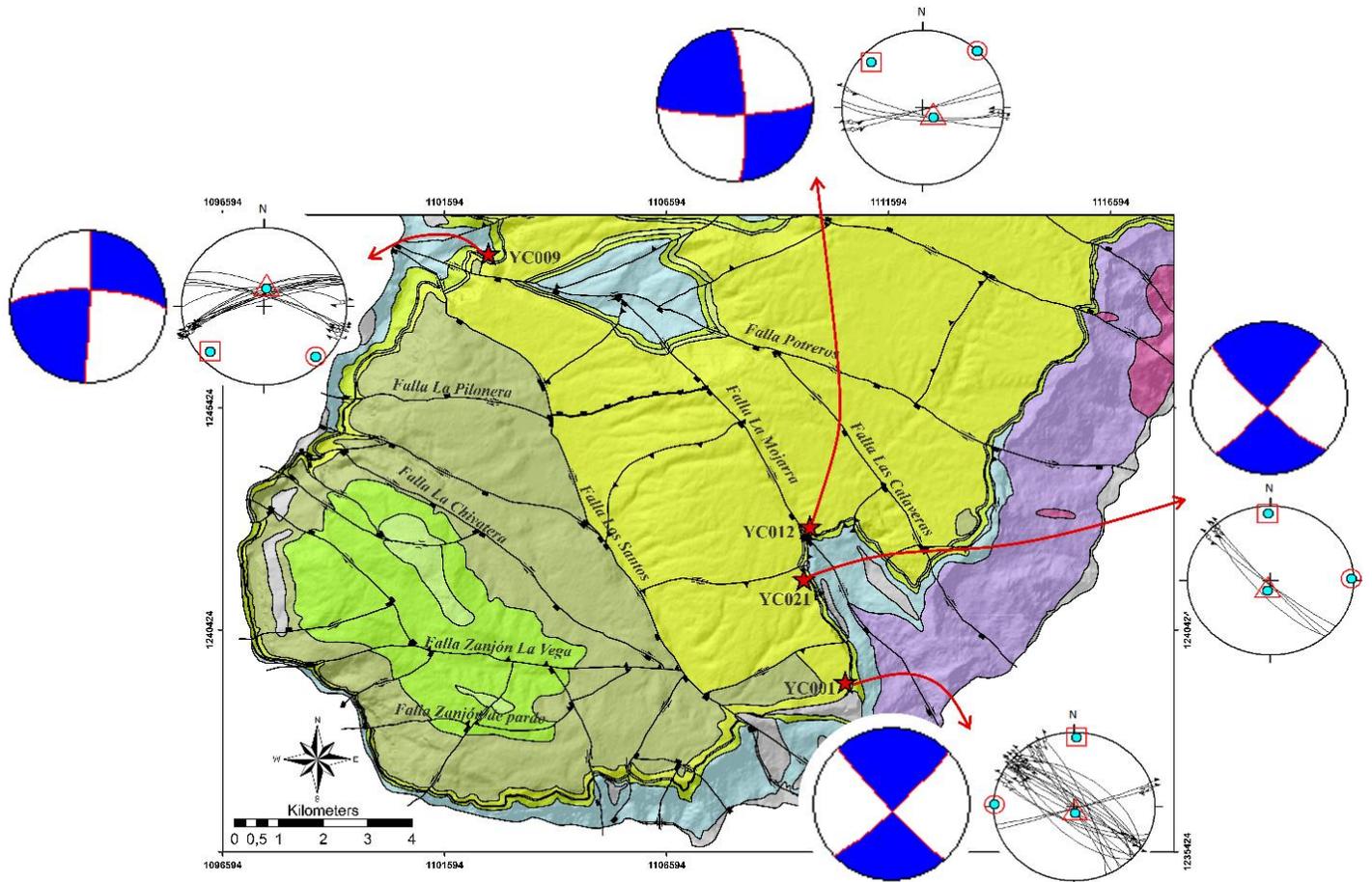
Gráficos de tensores obtenidos en cada una de las estaciones.



Para una mejor visualización espacial de la información descrita anteriormente, se muestran los tensores y la distribución de los esfuerzos principales de cada una de las estaciones sobre el mapa del área de estudio en la siguiente figura:

Figura 55.

Distribución espacial de los tensores y esfuerzos principales de cada estación.



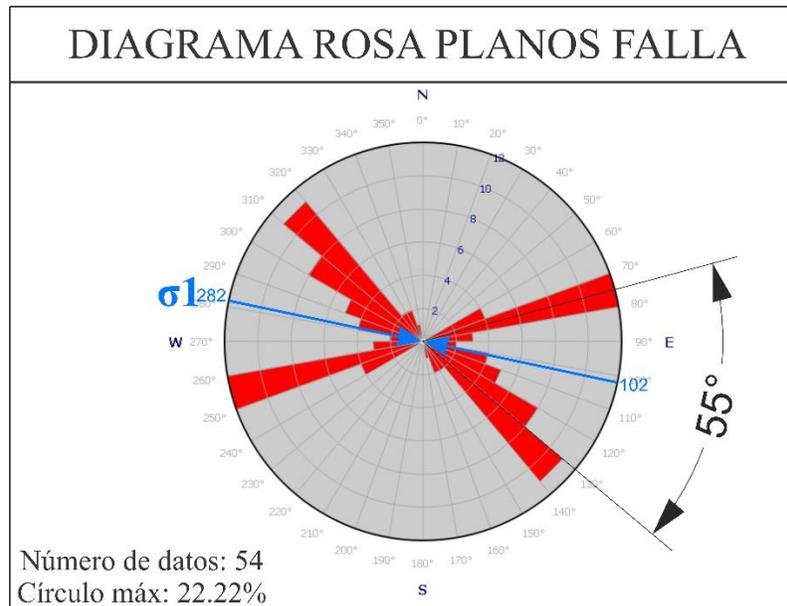
6.4.2 Tensor para el sur de la Mesa de Los Santos.

Inicialmente se analizó el diagrama de orientaciones preferenciales de los planos de falla medidos en el área, los cuales brindan una idea general del tensor estimando la ubicación aproximada del esfuerzo máximo de compresión (σ_1) perteneciente al régimen de esfuerzos que

los generaron. Los resultados muestran una relación de cizalla, en donde se identifican dos tendencias principales separadas por un ángulo de 55° , logrando estimar un máximo de compresión horizontal (σ_1) ubicado a 28° de cada tendencia, aproximadamente en $N80^\circ W$ (Figura 56).

Figura 56.

Orientación estimada del esfuerzo principal σ_1



Nota. σ_1 aproximadamente a 28° de las dos orientaciones preferenciales en el diagrama rosa de planos de falla.

Posteriormente se analizan en un solo conjunto los 54 datos de estrías en el programa WinTensor, obteniendo dos tensores descritos a continuación:

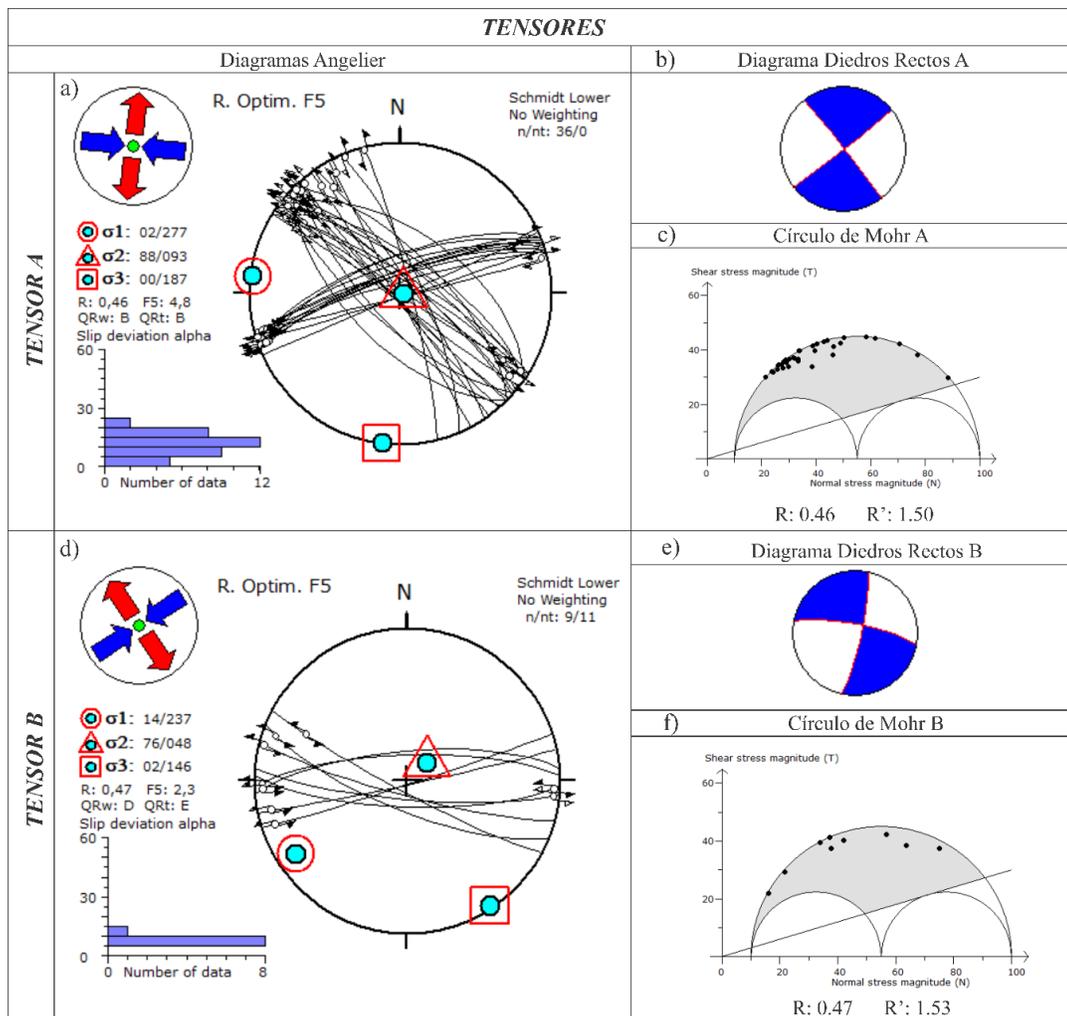
El tensor resultante **A** (Figura 57a.) se obtuvo con 36 datos de 54 iniciales, reconociendo un máximo de compresión horizontal con orientación E-W (flechas azules), y un máximo de extensión horizontal con orientación aproximada N-S (flechas rojas). Las orientaciones de los esfuerzos principales obtenidos son: σ_1 : 277/02, σ_2 : 093/88 y σ_3 : 187/00; llama la atención la

distribución geométrica ideal de los ejes de esfuerzos con dos horizontales (σ_1 y σ_3) y uno vertical (σ_2). Este resultado confirma la ubicación del esfuerzo principal sigma 1 (σ_1) obtenido anteriormente mediante las orientaciones preferenciales de los planos de falla (Figura 56). El gráfico del círculo de Mohr (Figura 57c.) junto con el índice $R' = 1.50$ se compara con la tabla 1 y la figura 9 (En sección 3.3.2.2) indicando que el régimen de esfuerzos que actuó es de tipo **Transcurrencia pura** relacionado especialmente con las fallas NW-SE.

El tensor resultante **B** (Figura 57d.) se obtuvo con nueve datos de los 18 descartados en el tensor **A**, reconociendo un máximo de compresión subhorizontal con orientación NE-SW (flechas azules), y un máximo de extensión horizontal con orientación aproximada NW-SE (flechas rojas). Las orientaciones de los esfuerzos principales obtenidos son: σ_1 : 237/14, σ_2 : 048/76 y σ_3 : 146/02. El gráfico del círculo de Mohr (Figura 57f.) junto con el índice $R' = 1.53$ se compara con la tabla 1 y la figura 9 (En sección 3.3.2.2) indicando que hubo otro régimen de esfuerzos de tipo **Transcurrencia pura** relacionado especialmente con las fallas W-E.

Figura 57.

Análisis poblacional de fallas al sur de la Mesa de los Santos. Bloque 2.



Nota. Número de estrías de falla analizadas: 54. a) Diagrama Angelier del tensor A. b) Diagrama de diedros rectos del tensor A. c) Círculo de Mohr e índices R y R' del tensor A. d) Diagrama Angelier del tensor B. e) Diagrama de diedros rectos del tensor B. f) Círculo de Mohr e índices R y R' del tensor B.

7. Discusiones

Como aporte al conocimiento estructural del sistema hidrogeológico de la zona sur de la Mesa de Los Santos se presenta la relación de la cuantificación de los patrones de fractura con el tensor local obtenido con el fin de determinar la abundancia y comportamiento del fracturamiento en el área de estudio.

Basados en la relación del tensor general de la zona con los trazos de las fallas, en la que las fallas subparalelas al tensor son fallas transtensivas a normales y las fallas subortogonales al tensor son transpresivas, se establece:

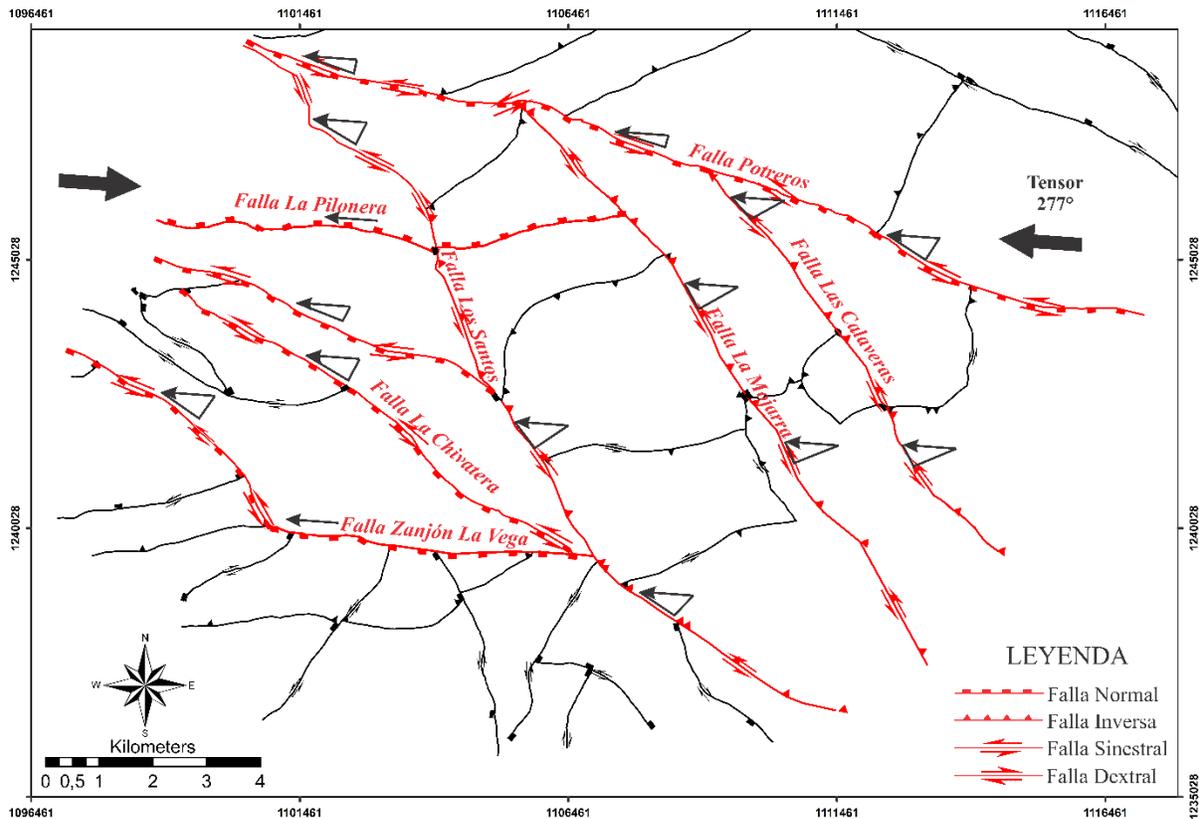
- Las fallas de La Mojarra y Las Calaveras presentan la misma dirección NW-SE de la Falla Los Santos, es decir, que posiblemente se formaron bajo el mismo régimen de esfuerzos y podrían presentar la misma cinemática, redefiniendo así el estilo estructural de este grupo de fallas (definidas inicialmente como fallas de rumbo dextrales con componente normal (Figura 27)) a fallas de rumbo sinistral con un componente inverso en el buzamiento (transpresivas) debido a que la Falla Los Santos buzará hacia el NE de la zona (mayoría de planos de falla en la figura 57a.). Esto implica levantamiento de la Formación Los Santos en el bloque colgante, dejando a la Formación Rosablanca en el bloque yacente. El último tramo occidental de La Falla Los Santos presenta únicamente cinemática sinistral.
- Cinemática sinistral con componente normal en el buzamiento (transtensivas) para las fallas Potreros, La Chivatera y el tramo izquierdo de Zanjón La Vega, anteriormente catalogadas como fallas de rumbo dextrales con componente normal (Figura 27).

- Cinemática normal para las fallas La Pilonera y el tramo derecho de Zanjón La Vega, anteriormente catalogadas como falla de rumbo dextral normal y falla inversa, respectivamente (Figura 27).

Con base en este nuevo tensor de 277° se propone el siguiente mapa con el nuevo modelo de cinemática para las fallas mencionadas anteriormente (Figura 57a):

Figura 58

Esquema de las fallas: Potreros, Las Calaveras, La Mojarra, Los Santos, La Pilonera, La Chivatera y Zanjón La Vega. (En rojo).



Nota. Propuesta de la cinemática de las fallas en color rojo generada por un tensor de 277° . Se muestra la descomposición de vectores de los sigmas normal y tangencial. La longitud de los

vectores paralelos al segmento de falla indica el desplazamiento relativo transcurrente que se combina con el vertical, con lo cual se establecen fallas transpresivas (La Mojarra, Las Calaveras y Los Santos), fallas transtensivas (Potreros, La Chivatera y tramo izquierdo de Zanjón La Vega) y fallas normales (La Pilonera y tramo derecho de Zanjón La Vega).

Al relacionar los resultados obtenidos de dirección preferencial N60-80W de las diaclasas de toda el área de estudio (Figura 42) con la orientación 277/ 02 del esfuerzo principal sigma 1 (σ_1) obtenida a partir procesamiento de estrías en WinTensor (Figura 57a) y concordante con el resultado N78W del σ_1 a partir de las direcciones principales de los planos de falla (Figura 56), se puede afirmar que una población importante de fracturas se presenta subparalela a dicho esfuerzo principal, por lo cual se pueden clasificar como diaclasas de extensión, las cuales se asumen abiertas. Esto es verificado en campo, donde se observa que la mayoría de aperturas medidas en las rocas son abiertas y en algunos casos rellenas por fragmentos producto de la desintegración de la misma roca.

Las estaciones asociadas a la Falla la Mojarra registran los valores de densidad e intensidad de fracturamiento más altos, en consecuencia, se puede estimar una mayor porosidad secundaria asociada al miembro superior de la Formación Los Santos. En comparación con el mapa de distribución espacial de la densidad de fracturamiento obtenido por Contreras (2008) se observa una buena correlación espacial en los rangos obtenidos de alta, media y baja densidad. Dada esta compatibilidad se propone la zona de influencia de la Falla la Mojarra como el área más favorable para la infiltración y flujo subsuperficial.

Aunque el suroeste de la zona no muestra un fracturamiento significativo, si se observan las fallas Los Santos y La Chivatera, las cuales podrían afectar el miembro superior de la

Formación los Santos, al igual que la Falla la Mojarra. A lo largo de las zonas de daño de estas fallas se definen corredores. Es importante señalar que la estación YC017 ubicada al suroeste y relacionada a la falla NW antitética a la Falla Zanjón La Vega, presenta una densidad muy alta asociada al miembro superior de la Formación Los Santos.

Las gráficas de conectividad del área de estudio (Figura 53) son similares, sin embargo, las estaciones asociadas al miembro superior de la Formación Los Santos cuentan con una proporción ligeramente mayor de nodos "X" y una proporción menor de nodos "I" que las restantes estaciones, lo que sugiere una mayor conectividad en general. La permeabilidad estimada muestra que el azimut k1 para la mayoría de estaciones al norte de la Falla La Mojarra (Figura 51) es paralelo al conjunto de fracturas largas de alta densidad en los afloramientos (Figura 50), mientras que al sur de la misma (Figura 52), la mayoría de conjuntos de datos de azimut k1 de las estaciones está orientado en paralelo al conjunto más corto y menos denso de fracturas. Este cambio en el comportamiento de la permeabilidad podría ser debido a la Falla La Mojarra la cual se comportaría como corredor para los acuíferos adyacentes, favoreciendo más localmente el flujo, o también podría ser a causa de las fallas ubicadas en sentido E-W.

8. Conclusiones

La cuantificación de los patrones de fractura tales como intensidad, densidad y longitud de fractura permitió establecer la zona influenciada por la Falla La Mojarra (al este de la zona) como un sector de alta porosidad secundaria coincidiendo con las fracturas de tensión según la elipse de deformación, zona donde las aperturas están en función de la cercanía a la falla, alcanzando medidas de 13.5 mm.

Por medio del análisis de 551 planos de diaclasa se determinó N60-70W como la dirección de orientación preferencial de deformación frágil en la zona sur de la Mesa de Los Santos. Así mismo se establecen N70-80W, N20-30W y N0-10E como segundas direcciones preferenciales de tipo local, pertenecientes al análisis individual de los cinco bloques estructurales definidos, las cuales son evidenciadas en la secuencia sedimentaria aflorante.

El análisis de las estrías medidas muestra dos tensores en el área de estudio, A y B, con orientaciones de los esfuerzos principales: σ_1 : 277/02, σ_2 : 093/88, σ_3 : 187/00 y σ_1 : 237/14, σ_2 : 048/76, σ_3 : 146/02 e índice R' igual a 1.50 y 1.53 respectivamente, el tensor A se relaciona principalmente con las fallas NW-SE, mientras que el tensor B está más asociado a las fallas W-E. Tanto el gráfico del círculo de Mohr como el índice R' determinan un régimen de esfuerzos de tipo transcurrente para ambos tensores, sin embargo, al correlacionar el tensor A con los trazos de las cinco fallas relacionadas de orientación NW-SE (Potreros, Las Calaveras, La Mojarra, Los Santos y La Chivatera) se asigna una cinemática sinistral con un componente inverso en su rumbo establecido a partir de la influencia que tiene la Fallas los Santos en las formaciones adyacentes (Figura 57).

Las relaciones más influyentes para determinar la cantidad de fracturamiento y las posibles zonas de infiltración y flujo subsuperficial fueron los atributos geológicos como la litología, la orientación, la apertura y la intensidad y densidad, en los cuales las fallas de orientación NW de la zona tuvieron un control importante sobre estos atributos, principalmente la falla La Mojarra que afecta al miembro superior de la Formación Los Santos al NE del área de estudio caracterizándose de interés hidrogeológico, por su alta intensidad y densidad de fractura, aperturas y grados de permeabilidad encontrados, caracterizándola como una zona favorable para la infiltración y flujo subsuperficial.

Otro tipo de consideración observable para el análisis de estas zonas de fracturamiento destacables es interpretar las interconexiones entre fracturas a profundidad, que están dadas por las estaciones con ángulos bajos, en este caso el bloque 2 presenta un mayor número de fracturas con ángulo medio a bajo que los otros bloques. Las áreas donde hay cruces de fallas y estaciones en bordes de escarpe también son favorables para la interconexión.

La gran mayoría de las estaciones ubicadas en la zona de interés hidrogeológico (Zona influenciada por la Falla La Mojarra) favorecen la recarga del sistema acuífero, pues si bien, algunas presentan el azimut k_1 (dirección de permeabilidad) paralelo a la orientación del conjunto de fracturas subortogonales a la estratificación, es decir el flujo alcanzaría a penetrar a profundidad, mientras que otras presentan el azimut k_1 paralelo a la orientación del conjunto de fracturas subparalelas a la estratificación, sin embargo, la dirección de estratificación en la mayoría de estas estaciones es hacia el cuadrante occidental, es decir que el flujo correría hacia dentro de la Mesa de Los Santos y no se perdería en los escarpes.

Las zonas de alto interés hidrogeológico identificadas a partir de datos de apertura, cantidad de fracturamiento, conectividad y permeabilidad contribuyen al conocimiento de las estructuras geológicas, importantes para la construcción de un modelo hidrogeológico conceptual y el estudio de flujo de fluidos en la Mesa de Los Santos.

9. Recomendaciones

Ante la presencia de flujo en los periodos de lluvia, la zona con mayor densidad e intensidad de fracturamiento es la más favorable para la recarga del sistema acuífero, es por esto que se recomienda que el área de interés influenciada por la Falla La Mojarra sea preservada, es decir que se garantice una distancia considerable ante procesos que impliquen la impermeabilización del terreno, para que la infiltración y la recarga del agua lluvia hacia el acuífero se produzca y se garantice la recarga del sistema.

Con el fin de obtener resultados cuantitativos que caractericen el sistema de fracturas de toda la Mesa de Los Santos, se recomienda utilizar la misma metodología, recolectando información estructural mediante la plantilla suministrada junto con el registro fotográfico y el respectivo procesamiento con la herramienta informática FracPaQ, que permita complementar y correlacionar la información de este proyecto.

Para mejorar el modelo predictivo se recomienda realizar un análisis de MLE (Estimadores de máxima verosimilitud) para encontrar la mejor distribución estadística representativa para las longitudes de fracturas y las aberturas en el área de estudio. Al aplicar estimadores de máxima verosimilitud en los datos de fracturas de afloramientos, se generan modelos de redes de fracturas

con los mismos atributos estadísticos que los observados en afloramientos, a partir de los cuales podemos lograr predicciones más sólidas hacia escalas pequeñas y grandes (Healy et al., 2017).

Se recomiendan hacer estudios geofísicos en la zona oriental del sur de la Mesa de Los Santos que logren esclarecer el comportamiento de la dirección de flujo de permeabilidad asociada a las fallas longitudinales. Esto con el fin de realizar un análisis de flujo de fluidos a escala regional que identifique los posibles límites de los acuíferos y el transporte de las líneas de flujo en el mismo.

Se recomienda medir indicadores cinemáticos más cercanos a la Falla Los Santos para realizar el respectivo análisis poblacional de fallas, con el fin de corroborar la cinemática sinistral y verificar si esta se formó bajo el mismo régimen de esfuerzos que generó la Falla La Mojarra, Las Calaveras y Potreros.

Referencias bibliográficas

Arlegui, L. e., & Simon, J. L. (1993). El sistema de diaclasas N -S en el sector central de la cuenca del ebro. relación con el campo de esfuerzos neógeno. *Revista De La Sociedad Geológica De España*, 6(2), 115-122. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7444380>

Barton, N. (1978). Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 15(6), 319-368.

Castellanos, L. E., & Cetina, M. A. (2013). Determinación de patrones de fracturamiento y análisis cinemático en inmediaciones del municipio de Charta, macizo de Santander. *Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander*.

Cediel, F. (1968). El Grupo Girón, una molasa mesozoica de la cordillera oriental. *Boletín Geológico*, 16, 5-96.

Cipagauta, N. (2020). *Escasez de agua en los santos (santander) está enfermando a la población*. RCN Radio. <https://www.rcnradio.com/colombia/santanderes/escasez-de-agua-en-los-santos-santander-esta-enfermando-la-poblacion>.

Clavijo, J., & Royero, J. M. (2001). Mapa geológico generalizado departamento de Santander, Memoria explicativa. *Instituto Colombiano de Geología y Minería - INGEOMINAS*.

- Contreras, N. (2008). Análisis del fracturamiento presente en la Formación Los Santos al noreste y centro de la Mesa de Los Santos, departamento de Santander. *Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander.*
- Cooper, M. A., Addison, F. T., Alvarez, R., Coral, M., Graham, R. H., Hayward, A. B., Howe, S., Martinez, J., Naar, J., Penas, R., Pulham, A. J., & Taborda, A. (1995). Basin development and tectonic history of the Llanos basin, eastern cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia. *Boletín AAPG, 79*
- Davis, G. H., Reynolds, S. J., & Kluth, C. F. (2011). *Structural geology of rocks and regions*. John Wiley & Sons.
- Díaz, E., Contreras, N. M., Pinto, J. E., Velandia, F., Morales, C. J., & Hincapie, G. (2009). Evaluación hidrogeológica preliminar de las unidades geológicas de la Mesa de los Santos, Santander. *Boletín De Geología, 31(1)*
- Etayo, F., & Rodriguez, G. I. (1985). Edad de la Formación Los Santos. proyecto cretácico. *Publicaciones Geológicas Especiales Del INGEOMINAS, (16), Capítulo XXVI.*
- Fossen, H. (2010). *Structural geology*. Cambridge University Press.
- García, S., y Gómez, E. (2015). Modelo conceptual hidrogeofísico para evaluar el potencial hidrogeológico de la Formación los Santos en la Mesa de Los Santos – Santander, Colombia. *Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander.*

- Gómez, J., & Cuervo, R. (2012). Estudio geológico enfocado a la caracterización paisajística de la Mesa de Los Santos, Santander, Colombia. *Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander.*
- Healy, D., & Rizzo, R. (2019). FracPaQ: Fracture pattern quantification user guide version 2.6.
- Healy, D., Rizzo, R. E., Cornwell, D. G., Farrell, N. J. C., Watkins, H., Timms, N. E., Gomez-Rivas, E., & Smith, M. (2017). *FracPaQ: A MATLAB™ toolbox for the quantification of fracture patterns*<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jsg.2016.12.003>
- Huang, Q., & Angelier, J. (1989). Inversion of field data in fault tectonics to obtain the regional stress—II. using conjugate fault sets within heterogeneous families for computing palaeostress axes. *Geophysical Journal International*, 96(1), 139-149. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1989.tb05256.x>
- Julivert, M. (1958). La morfoestructura de la zona de las mesas al SW de Bucaramanga (Colombia S. A.). *Boletín De Geología*, (1), 30-36. <https://doi.org/10.18273/revbol>
- Julivert, M., Barrero, D., & Navas G, J. (1964). Geología de la Mesa de Los Santos. *Boletín De Geología*, (18). <https://10.18273/revbol>.
- Langenheim, & R.L. (1959). Preliminary report on the stratigraphy of the Giron Formation in Santander and Boyaca. *Boletín De Geología*, (3). <https://10.18273/revbol>.
- Laverde, F. (1985). La Formación Los Santos: Un depósito continental anterior al ingreso marino del cretácico. proyecto cretácico. *Publicaciones Geológicas Especiales Del INGEOMINAS*, (16), Capítulo XX.

Leyva, O. (2012). Informe mapa de unidades geomorfológicas de la plancha 120 escala 1:100.000 departamento de Santander. Bogotá. Instituto Colombiano de Geología y Minería - INGEOMINAS.

Long, J. C. S., Remer, J. S., Wilson, C. R., & Witherspoon, P. A. (1982). Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures. *Water Resources Research*, 18(3), 645-658. <https://doi.org/10.1029/WR018i003p00645>

Manzocchi, T. (2002). The connectivity of two-dimensional networks of spatially correlated fractures. *Water Resources Research*, 38(9), 1-20. <https://doi.org/10.1029/2000WR000180>

Martínez, J. (2002). Geología estructural y dinámica global. *Departamento De Geología, Universidad De Salamanca, Curso*,

Mauldon, M., Dunne, W. M., & Rohrbaugh, M. B. (2001). *Circular scanlines and circular windows: New tools for characterizing the geometry of fracture traces* [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(00\)00094-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0191-8141(00)00094-8)

Morales, C. J., Forero, H., Rojas, N., & Alvarado, S. (2010). Integración geológica e hidrogeológica del centro de Santander. Bogotá. Instituto Colombiano de Geología y Minería - INGEOMINAS.

Moreno, G., & García, O. J. (2006). Caracterización cuantitativa de patrones de fracturamiento mediante ventanas circulares y análisis fractal. *Geología Colombiana*, 31(0), 73-90. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/geocol/article/view/31931>

- Oda, M. (1983). A method for evaluating the effect of crack geometry on the mechanical behavior of cracked rock masses. *Mechanics of Materials*, 2(2), 163-171. [https://doi.org/10.1016/0167-6636\(83\)90035-2](https://doi.org/10.1016/0167-6636(83)90035-2)
- Ortega, O. J., Marrett, R. A., & Laubach, S. E. (2006). A scale-independent approach to fracture intensity and average spacing measurement. *AAPG Bulletin*, 90(2), 193-208. <https://doi.org/10.1306/08250505059>
- Pacheco, M. I. (2012). Estratigrafía de la zona yesífera de la Formación Rosablanca en el borde occidental de la Mesa de los Santos – Santander (Colombia). *Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander*.
- Pinto, J. E., Clavijo, J., Gomez, S., Gutiérrez, D., Mora, J. P., Rojas, N., Adarme, I., Aldana, S., Contreras, N., Díaz, E., Melo, L., Reátiga, G., Rincón, M., Vargas, C., Morales, C., Velandia, F., Hincapié, G., Forero, H., Duarte, R., . . . De Bermoudes, O. (2007). Proyecto de investigación geológica e hidrogeológica en la Mesa de Los Santos, sector noreste de Curití y borde occidental del macizo de Santander, departamento de Santander. Bucaramanga. *Instituto Colombiano de Geología y Minería - INGEOMINAS*.
- Priest, S. D., & Hudson, J. A. (1981). Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 18(3), 183-197. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(81\)90973-6](https://doi.org/10.1016/0148-9062(81)90973-6)
- Ramírez, P., & Alejano, L. R. (2004). *Mecánica de rocas: Fundamentos e ingeniería de taludes*. E.T.S.I. Minas (UPM).

- Rohrbaugh, M. B., Dunne, W. M., & Mauldon, M. (2002). Estimating fracture trace intensity, density, and mean length using circular scan lines and windows. *AAPG Bulletin*, 86(12), 2089-2104. <https://doi.org/10.1306/61EEDE0E-173E-11D7-8645000102C1865D>
- Rojas, S., & Rojas, J. (2006). Cartografía geológica y caracterización estratigráfica Y estructural orientada A proponer el modelamiento hidrogeológico del área comprendida entre los municipios de Barichara Y Cabrera. *Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander.*
- Sanderson, D. J., & Nixon, C. W. (2015). The use of topology in fracture network characterization. *Journal of Structural Geology*, 72, 55-66. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2015.01.005>
- Suzuki, K., Oda, M., Yamazaki, M., & Kuwahara, T. (1998). Permeability changes in granite with crack growth during immersion in hot water. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 35(7), 907-921. [https://doi.org/10.1016/S0148-9062\(98\)00016-3](https://doi.org/10.1016/S0148-9062(98)00016-3)
- Van Der Pluijm, B., & Marshak, S. (2004). *Earth structure: An introduction to structural geology and tectonics*. WW Norton.
- Vargas, C. Y. (2008). Cartografía geológica a escala 1:25.000 de la Mesa de Los Santos, departamento de Santander. *Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander.*
- Velandia, F. (2005). Interpretación de Transcurrencia de las Fallas Soapaga y Boyacá a partir de imágenes Landsat TM. *Boletín de Geología* (27).
- Velandia, F., Silva, G., Osorio, J., & Morales, C. (2007). Análisis cinemático de la región central del departamento de Santander. *Documento presentado en XI Congreso Colombiano De Geología.*

Velandia, F. A. (2010). Análisis de fracturas para exploración de aguas subterráneas en el centro de Santander. Bogotá. *Instituto Colombiano de Geología y Minería - INGEOMINAS*.

Velandia, F. A. (2017). Cinemática de las fallas mayores del macizo de Santander - énfasis en el modelo estructural y temporalidad al sur de la Falla de Bucaramanga. *Tesis de doctorado. Universidad Nacional de Colombia*.

Ward, D., Goldsmith, R., Cruz, J., Gomez, E., & Restrepo, H. (1973). Mapa geológico de Colombia. cuadrángulo h-12 Bucaramanga planchas 109 Rionegro - 120 Bucaramanga. *Servicio Geológico, memoria explicativa*.

Zeeb, C., Gomez-Rivas, E., Bons, P. D., & Blum, P. (2013). Evaluation of sampling methods for fracture network characterization using outcrops. *AAPG Bulletin*, 97(9), 1545-1566.
<https://doi.org/10.1306/02131312042>