

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

CORRELACIÓN ESTRATIGRÁFICA Y CUANTIFICACIÓN DE FRACTURAS
A PARTIR DE IMÁGENES DE UAV EN LOS ESCARPES DE LA MESA DE LOS
SANTOS (SANTANDER)

Yeison Mauricio Carrillo Hernández

Johel Fabian Silva Gómez

Director

Francisco A. Velandia P.

Geólogo PhD

Codirectora

María A. Cetina T.

Geóloga, Mag. Ing. Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico Químicas

Escuela de Geología

Geología

Bucaramanga

2024

Dedicatorias

Dedicado a mis abuelos, papás y demás familiares. También al campo, las montañas y sus habitantes. Pues ellos sembraron la curiosidad por los espacios que me rodean.

Johel Silva

Dedico este trabajo a la memoria de mi madre que con su amor eterno me inspira a perseguir mis sueños. A mis hermanos, a mi padre y a la memoria y sabiduría de mis abuelos.

Mauricio Carrillo

Agradecimientos

En primer lugar, quisiera agradecer a Dios por darme la vida y la capacidad de entenderla. Este proyecto de investigación no se hubiese podido desarrollar sin el apoyo de muchas personas.

Extiendo mi más profundo agradecimiento a mis abuelos. A mi abuelo materno, quien siempre me inculcó la importancia del estudio como herramienta fundamental para la evolución personal y profesional. A mi abuelo paterno, le agradezco por enseñarme el valor del trabajo duro y la importancia de aprender de mis errores. Su tenacidad y persistencia han moldeado mi carácter. A mi abuela, le estoy especialmente agradecido por su sacrificio y correcciones propias de una docente, siendo un pilar académico en mi vida.

Agradezco a mi padre, quien, a través de su ausencia, me enseñó a apreciar los diversos aprendizajes que cada miembro de mi familia. Esto ha sido fundamental en mi crecimiento personal. A mi madre, le dedico mi profundo reconocimiento por su amor incondicional, paciencia infinita y sacrificio continuo durante las diferentes etapas de mi formación profesional. Su apoyo constante y su fe en mí han sido el sustento que me ha acompañado en este camino.

También agradezco a mis tías, tanto maternas como paternas, por permitirme observar y analizar con discernimiento cada una de sus realidades y decisiones. Su confianza al compartir sus experiencias de vida me ha proporcionado valiosas lecciones que atesoro profundamente.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi amada Yeimi. Su presencia en mi vida ha sido una fuente de inspiración y motivación, impulsándome aún más en los mares de la

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

investigación e inculcando el sentido de pertenencia. Sus experiencias y guía han sido fundamentales en la culminación de este proyecto.

Finalmente, agradezco profundamente al director de esta investigación por su acompañamiento y correcciones, guiándonos en el desarrollo de un proyecto muy ambicioso. También estoy en deuda con nuestra codirectora, quien nos acompañó durante múltiples noches con dedicación y entusiasmo, motivándonos a cumplir con los objetivos propuestos. Su apoyo ha sido crucial para la finalización de este proyecto.

Este libro es el resultado de un esfuerzo colectivo. Sin su apoyo, comprensión y amor, este logro no habría sido posible. Por último pero no menos importante agradezco especialmente a la Universidad Industrial de Santander por todo lo adquirido en este camino.

Johel Silva

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

Agradezco a mi padre por el apoyo, fundamental en el desarrollo de mi proyecto de vida.

Agradezco a mis hermanos fuente de inspiración en el proceso.

Expreso mi gratitud a mis directores por la confianza depositada y brindarme su guía y a todos mis maestros por sus valiosas enseñanzas y orientación en cada uno de los saberes de las geociencias.

A mis amigos del camino, gracias por su compañía y apoyo en este recorrido.

A la Universidad Industrial de Santander, mi alma mater, por brindarme un hogar académico durante estos años y ofrecerme oportunidades de crecimiento profesional y personal.

Gracias al universo entero por despertar mi curiosidad de entender los fenómenos naturales.

Mauricio Carrillo

Tabla de Contenido

Introducción	17
2. Objetivos	21
3. Antecedentes	22
4. Marco Teórico	30
5. Metodología	34
5.1 Revisión Bibliográfica y planificación	34
5.2 Selección de Escarpes	37
5.3 Levantamiento de Información Fotogramétrica	39
5.4 Generación de MDA	39
5.5 Obtención de Datos	42
5.5.1 Medidas Estratigráficas	43
5.5.2 Mediciones de Planos de Diaclasas	45
5.6 Caracterización de los patrones de fracturas	46
5.7 Validación de los Datos	51
6. Resultados	52
6.1 Modelos	53
6.2 Resultados de la Validación	58
6.2.1 Validación de datos estratigráficos	58
6.2.2 Validación de datos estructurales	59
6.3 Resultados Estratigráficos	62
6.4 Familias de Diaclasas	78
6.5 Intensidad y densidad de patrones de fractura	79
6.6 Conectividad y Permeabilidad	83
7. Discusión	87
7.1 Dispositivos UAV Utilizados	87

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

7.2 Estratigrafía	89
7.3 Geología Estructural.....	93
7.3.1 Familias de diaclasas con base en información estructural previa	93
7.3.2 Intensidad y densidad de los patrones de fractura.....	94
8. Conclusiones	95
9. Recomendaciones y Posibles usos Geológicos de los MDA	97
8.1 Análisis estructurales de los MDA a través de scripts de programación	97
8.2 Análisis de los patrones de fractura en los miembros de la Fm. Los Santos y Fm. Rosablanca.....	98
8.3 Uso de los MDA para el Análisis, preservación y divulgación del patrimonio Geológico	99
Referencias Bibliográficas	101

Lista de Tablas

Tabla 1 Comparación de algunas especificaciones técnicas de los UAV utilizados.....	37
Tabla 2 Escarpes seleccionados del área de estudio (Puntos de control).	38
Tabla 3 Valores de altitud en metros sobre el nivel del mar para cada contacto litológico para cada MDA.....	62
Tabla 4 Espesores de las unidades obtenido en cada MDA, se resalta en amarillo la información recolectada de otros autores.	63

Lista de Figuras

Figura 1 Localización del área de Estudio y ubicación de los principales escarpes (PC#_JM).....	18
Figura 2 Mapa geológico de unidades presentes en la Mesa de Los Santos. Tomado y modificado de Pinto et al., (2007) en García et al., (2024).	22
Figura 3 Bloque estructurales de LMS.....	30
Figura 4 Flujo de trabajo para la construcción de un modelo 3D basado en fotografías. ...	31
Figura 5 Procesos para la generación de modelos 3D.....	34
Figura 6 Metodología de la investigación llevada a cabo para identificar y medir los escarpes seleccionados mediante la construcción de MDA.	36
Figura 7 Ejemplo de la generación del MDA de PC_4JM Macaguato, municipio de Los Santos. Fuente Autores.	41
Figura 8 Ortomosaico corresponde a PC_4JM Macaguato.....	42
Figura 9 Ubicación de marcadores sobre los MDA y sus referencias espaciales en la interfaz de Agisoft Metashape.....	43
Figura 10 Interfaz del software Strater5 muestra el esquema del PC4_JM (Macaguato) ..	44
Figura 11 Ecosistema de trabajo de la aplicación GeoVis 3D y Stereonet	45
Figura 12 Patrones de intensidad y densidad. Medidos y establecidos en FracPaQ ejemplo PC8_JM El Toro, PC11_JM El Balcón.....	49
Figura 13 Modelo estocástico y clasificación de topología y nodos tipo I, Y, X.....	50
Figura 14 Descripción de los resultados de los patrones de fractura.	51

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

Figura 15 Modelos Digitales de Afloramientos (MDA) de los puntos PC_1J, PC_2JM, PC_3JM, PC_4JM.	54
Figura 16 Modelos Digitales de Afloramientos (MDA) PC_5JM, PC_6JM, PC_7JM y PC_8 JM. El Azimut mostrado en cada MDA representa la dirección de captura de cada afloramiento.....	55
Figura 17 Modelos Digitales de Afloramiento (MDA) de los puntos PC_9JM, PC_10JM, PC_11JM, PC_12JM.	56
Figura 18 Modelos Digitales de Afloramiento (MDA) de los puntos, PC_13JM, PC_14JM y PC_15JM.	57
Figura 19 Izquierda y superior derecha, marcas de referencia empleadas para la validación de la medición de espesores. Derecha, regresión lineal de las distancias obtenidas en campo y en el MDA entre cada marca de referencia.	59
Figura 20 Rumbos medidos en campo VS Medidos sobre el MDA	60
Figura 21 Diagramas rosas de los datos de campo y datos tomados sobre el MDA.....	61
Figura 22 Esquemas de las columnas estratigráficas de cada punto de control y trazo en planta de los cortes geológicos esquemáticos.....	64
Figura 23 Panorámica del escarpe PC2_JM (La Pradera).....	65
Figura 24 Panorámica del escarpe PC3_JM (Teleférico) y PC4_JM (Macaguato).	66
Figura 25 Vereda la Mojarra, el levantamiento PC5_JM (La Mojarra).....	67
Figura 26 Panorámica al sur de la MLS	68
Figura 27 Panorámica del Cañón del río Chicamocha a la altura de la mina “El Toro”	69
Figura 28 Panoramica PC10_JM (Halconera).....	70
Figura 29 PC13_JM (Pila Honda).	71

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

Figura 30 Panorámica PC14_JM (El Duende).....	72
Figura 31 Panorámica PC15_JM (Santa Rita).....	72
Figura 32 Cortes geológicos esquemáticos de la MLS.. Corte 1, Corte 2, Corte 3.....	76
Figura 33 Cortes geológicos esquemáticos de lá MLS. Corte 4, Corte 5, Corte 6.....	77
Figura 34 Diagrama de rosas y proyección respectiva de sus azimuth y polos en cada MDA analizado.....	79
Figura 35 Intensidad y Densidad de las ventanas de nuestro ubicadas al Este de LMS ...	80
Figura 36 Intensidad y densidad de ventanas de muestreo ubicadas al Oeste de LMS.....	72
Figura 37 Conectividad y Permeabilidad de ventanas de muestreo ubicadas al Este de LMS	84
Figura 38 Conectividad y Permeabilidad de ventanas de muestreo ubicadas al Oeste de LMS	86
Figura 39 Comparación de la nomenclatura usada por diferentes autores.....	90
Figura 40 Contactos en diferentes flancos de la MLS.....	91

Lista de Apéndice

Apéndice 1. Mapa de Introducción

Apéndice 2. Mapa de Geología

Apéndice 3. Modelos Digitales de Afloramiento (PC1_JM - PC4_JM)

Apéndice 4. Modelos Digitales de Afloramiento (PC5_JM - PC8_JM)

Apéndice 5. Modelos Digitales de Afloramiento (PC9_JM - PC12_JM)

Apéndice 6. Modelos Digitales de Afloramiento (PC13_JM - PC15_JM)

Apéndice 7. Cortes Estratigráficos C1-C1', C2-C2', C3-C3'

Apéndice 8. Cortes Estratigráficos C4-C4', C5-C5', C6-C6'

Apéndice 9. Columna Estratigráfica PC1_JM

Apéndice 10. Columna Estratigráfica PC2_JM

Apéndice 11. Columna Estratigráfica PC3_JM

Apéndice 12. Columna Estratigráfica PC4_JM

Apéndice 13. Columna Estratigráfica PC5_JM

Apéndice 14. Columna Estratigráfica PC6_JM

Apéndice 15. Columna Estratigráfica PC7_JM

Apéndice 16. Columna Estratigráfica PC8_JM

Apéndice 17. Columna Estratigráfica PC9_JM

Apéndice 18. Columna Estratigráfica PC10_JM

Apéndice 19. Columna Estratigráfica PC11_JM

Apéndice 20. Columna Estratigráfica PC12_JM

Apéndice 21. Planos de Diaclasas

Apéndice 22. Panorámicas Ilustradas en La Mesa de los Santos

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

Apéndice 23. Intensidad y Densidad I

Apéndice 24. Intensidad y Densidad II

Apéndice 25. Conectividad y Permeabilidad I

Apéndice 26. Conectividad y Permeabilidad II

Apéndice 27. Conectividad y Permeabilidad III

Apéndice 28. Bloques Estructurales

Apéndice 29. Altitudes De Los Puntos Medidos

Apéndice 30. Comparativa De Los Espesores Medidos

Glosario

Fm. Los Santos: Formación Los Santos

Fm. Rosablanca: Formación Rosablanca

MDA: Modelo Digital de Afloramiento

MLS: Mesa de los Santos

UAV: Vehículo aéreo No Tripulado

Resumen

Título: Correlación estratigráfica y cuantificación de fracturas a partir de Imágenes de UAV en los Escarpes de la Mesa de los Santos (Santander).

Autor: Johel Fabian Silva Gómez, Yeison Mauricio Carrillo Hernández.

Palabras Clave: Vehículo Aéreo No Tripulado (UAV), Modelos Digitales de Afloramiento (MDA), Formación Los Santos, Cretácico, Cordillera Oriental. Mesa de los Santos (MLS)

Descripción: La Mesa de los Santos (MLS), situada en la Cordillera Oriental de Colombia, enfrenta escasez de agua debido a factores geológicos y climáticos, exacerbados por el crecimiento poblacional y el desarrollo económico. Para estudiar este tipo de zonas y problemas, esta investigación valida el uso de Vehículos Aéreos no Tripulados, UAV (por sus siglas en inglés) para el análisis de escarpes y zonas de difícil acceso mediante la creación de Modelos Digitales de Afloramiento (MDA) elaborados mediante procesamiento de alta precisión para realizar correlaciones estratigráficas y cuantificación de patrones de fracturas. Se midieron espesores y se observaron las litologías aflorantes en 15 puntos de control ubicados sobre el perímetro de la mesa. Además de las columnas estratigráficas, se logró su correlación a través de la construcción de seis cortes de la zona de estudio y el análisis de diferentes panorámicas de los escarpes. También se identificaron las direcciones de las principales familias de diaclasas (NE-SO, NO-SE y N-S) en toda la MLS, y se confirmaron los tensores de permeabilidad que están fuertemente influenciados por los planos de estratificación, sugiriendo que parte de la migración de los fluidos ocurre en forma sub horizontal. La integración de los UAV mejora la comprensión geológica de la MLS, validando su uso desde la exploración hasta el análisis detallado, destacando su importancia para la obtención de datos y descripción de estructuras primarias y secundarias en los distintos afloramientos.

Correlación estratigráfica y cuantificación de fracturas a partir de Imágenes de UAV en los Escarpes de la Mesa de los Santos (Santander). Facultad de Ingenierías Físico Químicas. Geología. Director: Francisco Alberto Velandia Patiño. Geólogo Doctor en Geociencias. Codirectora: María Alejandra Cetina Tarazona. Geóloga Magister en Ingeniería Civil.

Abstract

Title: Stratigraphic Correlation and Fracture Quantification Using UAV Images in the Escarpments of the Mesa de los Santos (Santander).

Authors: Johel Fabian Silva Gómez, Yeison Mauricio Carrillo Hernández.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Digital Outcrop Models (DOM), Los Santos Formation, Cretaceous, Eastern Cordillera, Mesa de los Santos (MLS).

Description: The Mesa de los Santos (MLS), located in the Eastern Cordillera of Colombia, faces water scarcity due to geological and climatic factors, exacerbated by population growth and economic development. To study these areas and issues, this research validates the use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for the analysis of escarpments and hard-to-access areas through the creation of Digital Outcrop Models (DOMs) produced with high-precision processing for stratigraphic correlations and fracture pattern quantification. Thicknesses were measured, and the lithologies present in 15 control points around the mesa's perimeter were observed. In addition to stratigraphic columns, their correlation was achieved through the construction of six cross-sections of the study area and the analysis of different panoramic views of the escarpments. The main joint sets (NE-SW, NW-SE, and N-S) were also identified across the MLS, and permeability tensors, which are strongly influenced by bedding planes, were confirmed, suggesting that some fluid migration occurs in a sub-horizontal manner. The integration of UAVs enhances the geological understanding of the MLS, validating their use from exploration to detailed analysis, highlighting their importance for data acquisition and the description of primary and secondary structures in various outcrops.

Stratigraphic Correlation and Fracture Quantification Using UAV Images in the Escarpments of the Mesa de los Santos (Santander). Faculty of Physical and Chemical Engineering. Geology. Advisor: Francisco Alberto Velandia Patiño, Geologist, PhD in Geosciences. Co-advisor: María Alejandra Cetina Tarazona, Geologist, MSc in Civil Engineering.

Introducción

La Mesa de los Santos (MLS) se encuentra ubicada en la Cordillera Oriental de Colombia, en parte de los municipios de Piedecuesta, Girón y Los Santos, y corresponde a una de las geoformas de la zona de Mesas y Cuestas del departamento de Santander (Julivert, 1958). La MLS (Figura 1) configura una plataforma excavada en sus vertientes por los límites naturales correspondientes al río Chicamocha al sur oriente, río Sogamoso al sur occidente, quebrada los Montes al norte y río Manco al oriente (Julivert, 1958).

La MLS se caracteriza por presentar en la parte central una morfología plana y pendientes suaves con pequeñas colinas, y hacia los bordes laderas con pendientes moderadas a altas y escarpes (Díaz *et al.*, 2009). En las laderas orientales de la MLS aflora un basamento correspondiente a rocas del Paleozoico con metamorfismo de grado bajo a medio de la Fm. Silgará y cuerpos intrusivos del Jurásico de la unidad Granito de Pescadero (Díaz *et al.*, 2009). Sobre el basamento descansan rocas del Jurásico de origen continental de la Fm. Jordán y sobre estas, se encuentra la secuencia del Cretácico Temprano correspondiente a las formaciones, Los Santos, Rosa Blanca, Paja y Tablazo (Pinto *et al.*, 2007); (Díaz *et al.*, 2009).

Laverde (2023) hace un recuento histórico de la forma en que diversos investigadores han conceptualizado el marco geológico regional y la exposición local de las unidades litoestratigráficas que abarcan desde el Jurásico Tardío hasta el Cretácico Temprano. En esta investigación se revisan los aportes de los investigadores sobre este tema

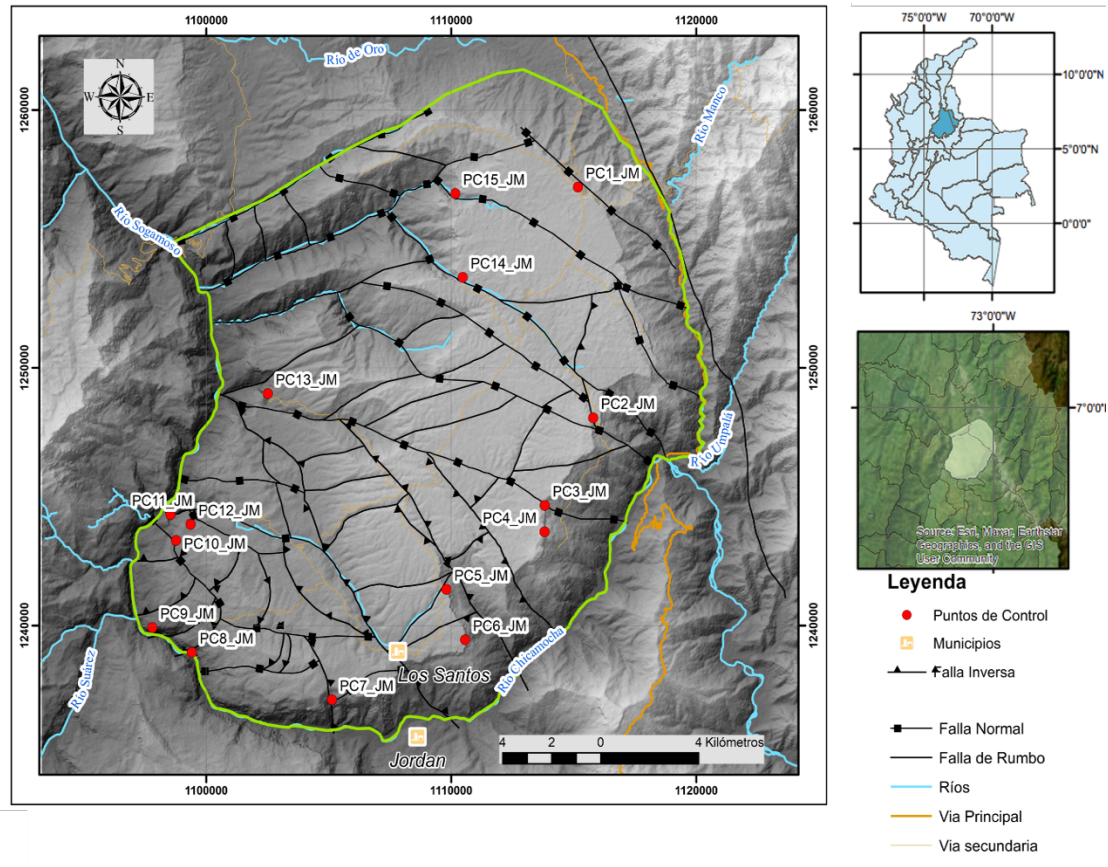
CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

para comprender la nomenclatura usada actualmente y la distribución de la Fm. Los Santos en el área de Mesas y Cuestas.

Figura 1

Localización del área de Estudio y ubicación de los principales escarpes

(PC#_JM).



La región de la MLS ha sufrido de escasez de agua potable debido a sus condiciones climáticas, geomorfológicas y geológicas, que limitan la disponibilidad del recurso hídrico superficial, situación que se agrava por el crecimiento de su población (tanto permanente como visitante), el aumento de granjas, y parcelaciones, y el número de actividades económicas que se desarrollan (sector agrícola, avícola, minero y turístico) generando

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

conflictos y presiones alrededor de la disponibilidad de agua (Alcaldía Los Santos, 2003; FUNDEMESA, 2009).

Debido a lo anterior el agua subterránea toma importancia como fuente de abastecimiento. (Díaz et al., 2009) establece que, en la MLS, el miembro superior de la Fm. Santos, presenta el mayor potencial hidrogeológico por tener una porosidad primaria media y porosidad secundaria alta, aumentando su permeabilidad. El miembro inferior de esta formación presenta baja porosidad primaria, pero un aumento de su permeabilidad debido al fracturamiento de la roca, estableciéndose un buen potencial hidrogeológico. Por otro lado, definen localmente como de menor potencial hidrogeológico a la Fm. Jordán, así como el Granito de Pescadero y la mayor parte de las Fm. Silgará sin interés hidrogeológico, por su baja porosidad y permeabilidad.

Los escarpes que bordean la MLS presentan un acceso limitado para realizar descripciones, mediciones directas y adquisición de datos estructurales, pero estos afloramientos poseen un alto interés por exponer rocas con alto potencial hidrogeológico por lo que se propone el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV por sus siglas en inglés) con fines fotogramétricos. Según Colomina y Molina (2014) existe un aumento progresivo en la producción e investigación de aplicaciones civiles/comerciales que se desarrollan apoyadas en los UAV.

El presente estudio se planteó para validar la metodología empleada para realizar análisis de fracturas en puntos de control mediante Modelos Digitales de Afloramiento

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

(MDA). Además, se efectuaron mediciones de los espesores de los estratos para establecer una correlación estratigráfica entre las rocas expuestas en los escarpes de la MLS. Todo ello se llevó a cabo con la intención de enriquecer el modelo geológico de la zona de estudio y así aportar al modelo hidrogeológico conceptual del área de estudio.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Contribuir al análisis estructural y estratigráfico de las unidades con potencial hidrogeológico de la Mesa de Los Santos (Santander) a partir del análisis de Modelos Digitales de Afloramiento (MDA) generados con el uso de imágenes capturadas con vehículos aéreos no tripulados (UAV).

2.2 Objetivos Específicos

Validar el uso de imágenes capturadas con Vehículos Aéreos no Tripulados (UAV) como herramienta de trabajo para la adquisición de datos en escarpes y zonas de difícil acceso.

Correlacionar texturalmente las unidades sedimentarias que afloran en los escarpes de la Mesa de los Santos.

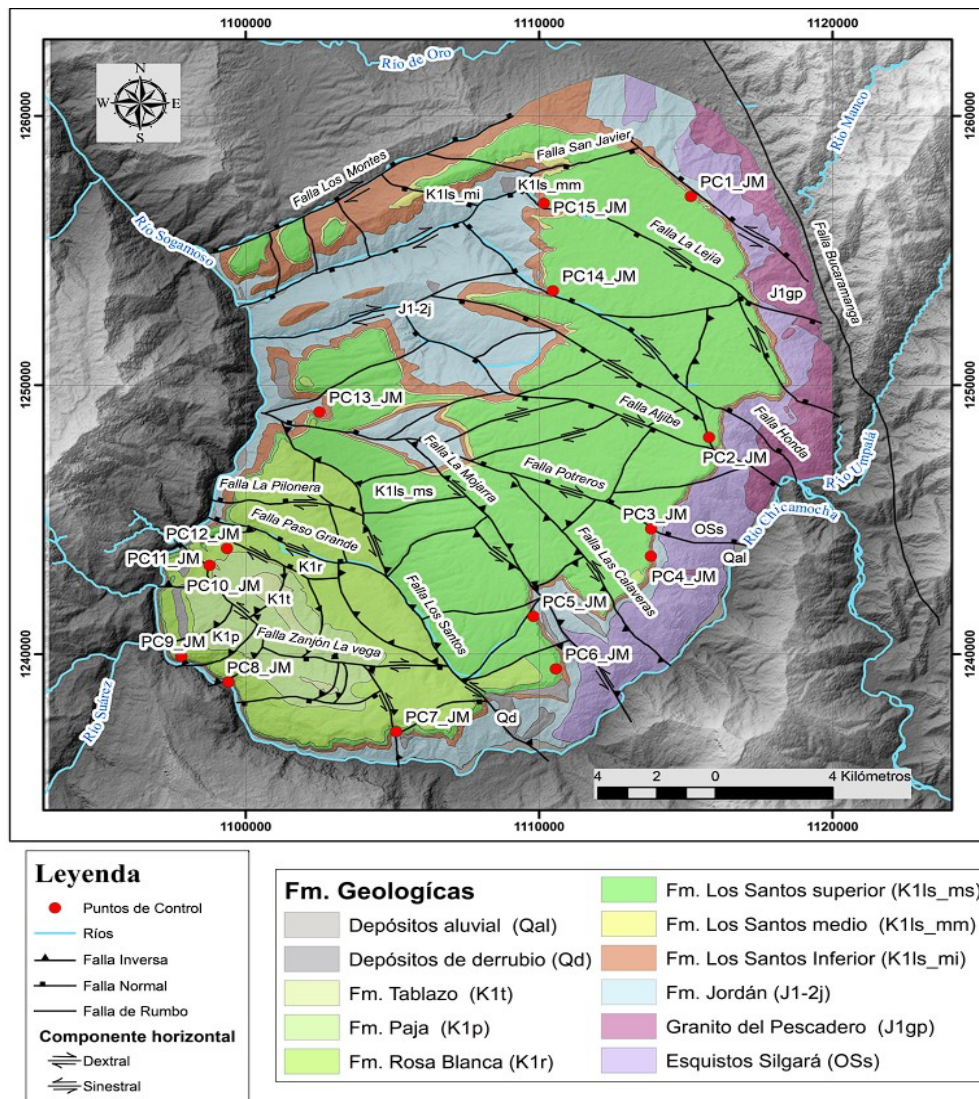
Cuantificar patrones de fractura estableciendo orientaciones preferenciales sobre ventanas de muestreo en escarpes expuestos en la Mesa de los Santos mediante el uso de FracPaQ.

3. Antecedentes

A continuación, se recopilan antecedentes relevantes para el presente trabajo teniendo en cuenta la estratigrafía y la geología estructural del área de estudio. La Figura 2 muestra el mapa geológico del área de estudio.

Figura 2

Mapa geológico de unidades presentes en la Mesa de Los Santos. Tomado y modificado de Pinto et al., (2007) en García et al., (2024).



3.1 Estratigrafía

La región de Mesas y Cuestas está compuesta principalmente por una secuencia estratigráfica del Cretácico que se superpone a rocas del Triásico-Jurásico, las cuales reposan sobre un basamento ígneo-metamórfico Julivert (1958). La secuencia que se presenta en los escarpes de la MLS corresponde de base a techo a: lodolitas de la Fm. Jordán con edades obtenidas en tobas cerca del límite del Triásico-Jurásico; y sobre estas la secuencia del Cretácico Temprano correspondiente a areniscas, limolitas y conglomerados de la Fm. Los Santos; lodolitas y areniscas de la Fm. Cumbre y calizas de la Fm. Rosa Blanca (Etayo et al., 2019).

A continuación, se describe brevemente cada una de las formaciones sedimentarias que afloran en los escarpes de la zona de estudio:

Formación Jordán: la unidad aflora hacia la vertiente del río Chicamocha y la vertiente del río Sogamoso. La formación fue nombrada y descrita por Cediell (1968) y se compone de intercalaciones de limolitas y areniscas lodosas de grano fino, en capas medias y gruesas con estratificación plana paralela. En menor proporción contiene capas de conglomerados líticos rojizos. Los resultados obtenidos en las dataciones radiométricas U-Pb en rocas volcanoclásticas interestratificadas en la Formación Jordán, arrojan edades medias ponderadas de 199 y 198 Ma, lo que indican una edad de Jurásico Temprano para la unidad (Alarcón y Rodríguez. 2019). En el trabajo de Pinto et al., (2007) nombran que

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

presenta baja porosidad primaria debido a la alta cementación de las rocas y baja porosidad secundaria ya que las diaclasas se encuentran cerradas o algunas rellenas de calcita.

Formación Los Santos: Es nombrada por Cediel (1968) y redefinida por Laverde (1985). Los tres miembros de esta formación están referenciados en el proyecto de Investigación geológica e hidrogeológica en la Mesa de Los Santos, sector noreste de Curití y borde oeste del macizo de Santander, departamento de Santander” realizado por INGEOMINAS-UIS en Pinto et al. (2007), donde se divide la Formación Los Santos en tres miembros: miembro inferior, miembro medio y miembro superior.

El miembro inferior (Pinto et al., 2007) corresponde a capas muy gruesas de conforman 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, las rocas se clasifican composicionalmente como sublitoconglomerática y sublitoarenita y a medida que asciende estratigráficamente aumenta el contenido de cuarzo y fragmentos líticos de cuarcitas. En Pinto et al., (2007) se menciona un cambio de fase, al suroeste del área pasando a areniscas cuarzosas ligeramente conglomeráticas de grano medio a muy grueso y algunas capas de conglomerados arenosos y guijarros cuarzosos. Este miembro presenta características de un acuífero mostrando alta porosidad primaria y permeabilidad y en algunas zonas presenta niveles arcillosos que pueden confinar el acuífero.

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

El miembro medio se encuentra constituido por limolitas y arcillolitas intercaladas con areniscas de grano muy fino a medio, con presencia de estructuras sedimentarias tipo laminación plano paralelas y laminación cruzada. Este miembro presenta bajo grado de porosidad y bajo fracturamiento comportándose como acuicludo limitando hidráulicamente al miembro superior (Pinto et al., 2007).

El miembro superior se encuentra constituido por cuarzoarenitas y sublitarenitas en capas medianas a gruesas que presentan una geometría cuneiforme y presenta estructuras sedimentarias tales como laminación cruzada plana paralela en artesa, este miembro presentó una porosidad media alta y el alto grado fracturamiento dándole características de acuíferos libre en MLS y acuífero fracturado en algunas zonas cerca del sistema de fallas. (Pinto et al., 2007).

Formación Cumbre: Renzoni (1985) identifica la unidad en la serranía de los Yariguies entre Chima y Contratación. Representa el primer registro del ingreso marino neto del mar cretácico documentado con fósiles en volumen (bivalvos, gasterópodos, etc.), consta de lodolitas fosilíferas de color negro en capas medianas con laminación plana-paralela, intercaladas con arenitas de cuarzo de grano entre fino y mediano de color gris claro.

Formación Rosa Blanca: Está compuesta por calizas micríticas y dolomíticas fosilíferas de color gris oscuro con niveles de bioesparita en estratificación plano-paralela, además con niveles yesíferos con intercalaciones de lutitas calcáreas (Pacheco 2012). Según el esquema estratigráfico propuesto por Etayo et al., (2019) para el sector de Zapatoca, se

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

identificaron y diferenciaron cartográficamente en la Formación Rosa Blanca, cinco miembros, descritos a continuación. Miembro Lagunetas que consta de biomicritas tipo mudstone y wackestone dolomíticas de color gris oscuro y negro en capas medianas y gruesas con niveles de yeso hacia la parte inferior. Miembro Carrizal que consiste en biomicritas tipo wackestone de color gris oscuro en capas gruesas, algunas de las cuales constituyen biostromas de bivalvos, en alternancia con biomicritas tipo mudstone en capas medianas y lodolitas terrígenas de color negro con laminación plana-paralela mediana. El Miembro Zo compuesto por biomicritas tipo packstone y wackestone de color gris oscuro en capas gruesas y medianas en alternancia con lodolitas terrígenas de color negro en capas medianas; este intervalo se caracteriza por la presencia de bancos calcáreos-cuarzosos con laminación plana-paralela e inclinada tangencial a la base, las capas son medianas y gruesas de bioclastos fragmentados. El Miembro El Sapo contiene wackestone de color gris oscuro en capas medianas y gruesas en alternancia con lodolitas terrígeno-calcáreas de color negro, en capas gruesas con laminación plana paralela mediana. Miembro Zapatoa abarca arenitas de cuarzo lodosas ferruginosas en capas tabulares gruesas que se interdigitan con calizas tipo wackestone y packstone con presencia del bivalvo *Ceratostreon boussingaultii*, de color negro en capas medianas (Etayo et al., 2019)

En la MLS se han registrado columnas estratigráficas en trabajos como el de Laverde (1985) donde se reconoce la sección tipo de la Fm. Los Santos en el sector conocido como "el camino de El Roto" al sur de la MLS, en el que levanta la estratigrafía desde los últimos metros de la Fm. Jordán, toda la Fm. Los Santos y Fm Cumbre y los primeros metros de la Fm. Rosa Blanca. El autor divide el registro estratigráfico en seis macro secuencias faciales.

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

La Fm. Los Santos (con un espesor de 218 m), 78,7 m para el “Segmento A” (Miembro inferior), 36,6 m para el “Segmento B” (Miembro medio), y la suma respectiva entre los 59.8 m y 43.4 m del “Segmento C y D” (Miembro superior). En esta misma sección para el “Segmento E” (Fm. Cumbre) el autor mide 5 m y tan solo registra 2,9 m para el “Segmento F” (Fm. Rosa Blanca). Se consideran también las secciones estratigráficas de Rincón (2008), “La Punta” en la que describe 42 m de la Formación Jordán y 127 m de la Fm. Los Santos (56,5 m, 22,65 m y 48,7 m para los miembros inferior, medio y superior, respectivamente), y “Carrizal”, donde se describen tres miembros de la Fm. Los Santos (56 m, 41 m y 33 m para los miembros Inferior, Medio y Superior, respectivamente).

También se cuenta con las secciones descritas por Aldana (2008) en “La Navarra” donde se midieron 245 m de espesor correspondientes a la Fm. Los Santos (152 m Miembro Inferior, 40 m Miembro Medio y 54 m para el Miembro Superior) sin encontrar contactos con otras formaciones, y “El Calicho”, donde aflora Fm. Los Santos en contacto concordante con la suprayacente Fm. Cumbre, de la cual afloran 8,6 m y en contacto discordante angular con la infrayacente Fm. Jordán. En esta sección la Fm. Los Santos mide 253 m siendo la sección más espesa reportada de la unidad, donde se registran 102 m para el Miembro Inferior, 21,8 m para el Miembro Medio y 95,3 m para el Miembro Superior (Aldana, 2008).

3.2 Geología Estructural

La MLS presenta un conjunto de fallas normales y transcurrentes que afectan las diferentes unidades geológicas de la zona, según Pinto et al., (2007), con una orientación

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

predominante en dirección NE-SO. El estudio de Pinto et al., (2007) destaca la importancia de la geología estructural de la región para comprender la dinámica hidrogeológica de la MLS. Según los autores, la presencia de fallas en la zona afecta directamente la circulación de agua subterránea, la cual está controlada por la permeabilidad y la porosidad de las diferentes unidades geológicas, así como por la geometría de las estructuras.

En el estudio de Tarazona et al., (2021), se evidenció que la zona sur de la MLS cuenta con un sistema de fracturas distribuidos en dos conjuntos principales. El análisis de planos de diaclasa determinó una orientación predominante de las fracturas en dirección N60-70O como la orientación preferencial de la deformación frágil. Las direcciones secundarias N70-80E, N20-30O y N0-10E, se usaron para definir cinco bloques estructurales en esta zona sur.

Para obtener resultados cuantitativos que caracterizan el sistema de fracturas de LMS en, Tarazona et al. (2021) destacan la importancia de atributos geológicos como la litología, la orientación, la apertura, la intensidad y la densidad influyen en el grado del fracturamiento e infiltración, controlados por las fallas principales de la región. Por ejemplo, Tarazona et al. (2021) observó que sus estaciones asociadas a la Falla la Mojarra registran los valores más altos de densidad e intensidad de fracturamiento, lo que sugiere una mayor porosidad secundaria asociada al miembro superior de la Formación Los Santos. Esto evidencia que, con una caracterización de los sistemas de fracturas, se comprende mejor la hidrogeología de la región, especialmente la forma como estos sistemas influyen en el flujo y almacenamiento de agua subterránea. En particular, se encontró que las fracturas tienen un papel clave en la

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

permeabilidad y en la conexión entre las diferentes zonas de recarga y descarga de agua subterránea en la región.

Por su parte García et al., (2024) divide la zona de estudio en un sistema de 3 bloques: Norte, Central y Sur (Figura 3). El Bloque Norte limita al norte por la falla Los Montes con dirección aproximada de 60° y al noreste por la Falla Bucaramanga, y al sur con la falla Potreros de. El Bloque central tiene forma de cuña y está limitado al norte por las Fallas Potreros y al sur por la Falla Los Santos con un azimut de rumbo cercano a los 150° . El Bloque Sur ubicado al sur de la Falla Los Santos se compone principalmente por unidades carbonatadas y presenta tres direcciones preferenciales en los planos de fracturas. García et al., (2024) confirmó las direcciones NO-SE y SO-NE planteadas por Pinto et al., (2007), reproduciendo las orientaciones de las fallas desarrolladas en la mesa. Se destacan los valores de intensidad y densidad de lineamientos de la Falla Potreros que evidencian una mayor influencia en la zona sur en los bloques Central y Sur que en la zona norte, un bloque homónimo; el autor sugiere que la porosidad secundaria también puede ser influenciada por la estratificación, ya que el fracturamiento es casi vertical.

Finalmente, cabe nombrar un ejemplo de aplicación de datos obtenidos mediante UAV orientados a la geología estructural de la MLS, expuesto en el artículo de Villareal et al., (2020), donde adquirieron datos de dos afloramientos de areniscas de la Fm. Los Santos. Los datos fueron procesados en un software de fotogrametría para analizar la nube de puntos densa y obtener las principales familias de diaclasas y sus grupos asociados. En sus resultados se indican patrones de diaclasas de $N48^\circ W$; $N80^\circ W$; $N2^\circ E$ para el afloramiento La Mojarra,

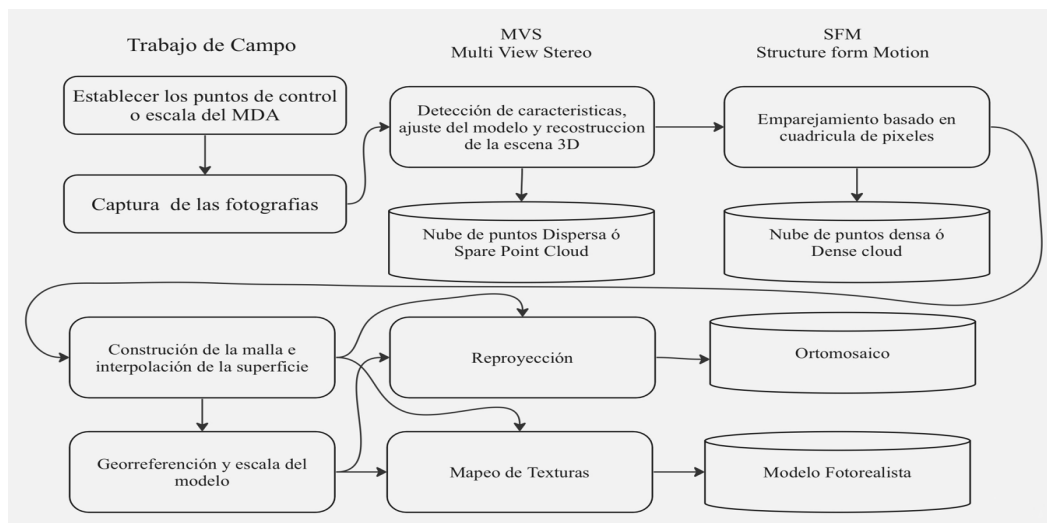
CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

fotogrametría láser, pero a un costo menor, lo que lo convierte en una herramienta moderna de campo para diversas aplicaciones en geología y demás disciplinas relacionadas.

Como lo expresa Herrero (2022), las fotografías capturadas y apoyadas en sus metadatos son operadas con los algoritmos SFM (Structure-From-Motion) y MVS (Multi View Stereo). La (Figura 4) muestra el flujo de trabajo para la construcción de un modelo 3D basado en fotografías. A partir de la operación con estos algoritmos se analiza y se ubica geográficamente los MDA beneficiando a las investigaciones en estratigrafía y geología estructural al permitir la identificación y análisis de contactos litológicos, fracturas y otros rasgos visibles expuestos sobre los afloramientos.

Figura 4

Flujo de trabajo para la construcción de un modelo 3D basado en fotografías.



Nota. En la figura se presentan los cilindros son posibles productos a partir de cada etapa durante la reconstrucción. Tomado y editado de Sean P. Bemis et al., (2014).

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

Para llevar a cabo un levantamiento de fotogrametría a través de vuelos con UAV, es importante establecer ciertas características previas al vuelo, como el formato de imagen, la frecuencia de captura, la resolución de la imagen, el porcentaje de solapamiento entre las fotografías, la altura y orientación de vuelo. Estos valores determinan la ruta, el tiempo de vuelo, el número de imágenes que se capturaron y la cantidad de baterías necesarias para cubrir la zona de interés y sus alrededores.

Según Cambell y Wynne (2011), los valores de solapamiento establecidos para la captura entre cada imagen deben estar entre un 80% y el 85% para minimizar la posibilidad de vacíos durante la composición de las imágenes o modelos. Para los escarpes, se deben tomar capturas equidistantes y paralelas a la pared o superficie en registro, teniendo en cuenta las variaciones de su relieve, como las direcciones y el buzamiento de los estratos o las superficies de rocas capturadas durante el vuelo, para mantener constante un porcentaje de solapamiento.

De acuerdo con Tziavou et al., (2018), una resolución espacial inferior a 10 cm es adecuada para los estudios de cartografía geológica o de ingeniería. Esto significa que la distancia de muestreo del suelo Ground sample distance (GSD) por sus siglas en inglés debe ser de 10 cm/píxel o inferior. La distancia de vuelo dependerá de la distancia focal, ancho del sensor y el número de píxeles por ancho de foto. Es importante tener en cuenta que el área por píxel aumenta proporcionalmente a la distancia de la superficie de captura del UAV. Como los escarpes son el objeto de análisis en esta investigación, el GSD es una variable que se debe establecer antes de los planes de vuelo, pues es la unidad base sobre la que se reconstruye el modelo 3D a partir de los algoritmos MVS.

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

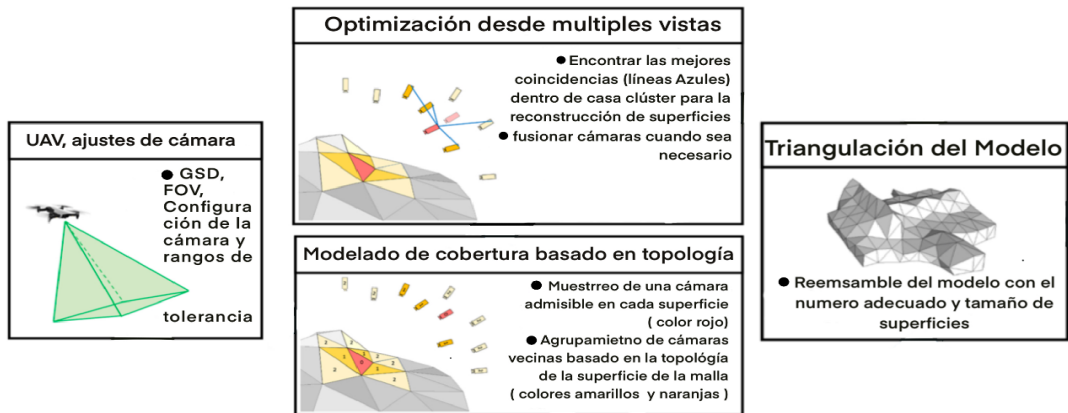
Para Shang y Shen (2022), se requiere satisfacer unos criterios de calidad en las fotografías capturadas, algunos de estos atributos son generales como la cobertura, visibilidad, resolución, ángulo de incidencia, línea base y una ruta de vuelo paralelo de las capturas. Según la complejidad de la superficie a modelar recomienda una captura supervisada o manual para garantizar un resultado óptimo, donde la reconstrucción del modelo 3D sea completa, es decir que no se presenten agujeros en su malla o se reduzca la calidad y confiabilidad del modelo por ausencia de fotografías adecuadas.

Chesley et al., (2017) destaca como la fotogrametría solo con operadores MVS muchas veces debe ser acompañada con datos de orientación de las cámaras y conocer algunos puntos de referencia dentro de la escena. Es allí donde los operadores SFM logran resolver estos parámetros de orientación exterior e interior sin necesidad de especificar una red de puntos con posiciones tridimensionales conocida. Este proceso es resultado de una iteración de puntos claves identificados dentro de las áreas de solapamiento de las imágenes el cual se apoya en los parámetros de la cámara y UAV durante cada captura. Esta propiedad se fundamenta en la orientación y escalado de los MDA debido a las condiciones y características propias de cada escarpe.

Un ejemplo ilustrativo del proceso de capturas de superficies complejas lo propone Shang y Shen (2022), como se observa en la (Figura 5). El proceso puede ejecutarse desde un plan de vuelo automatizado con insumos satelitales usando un modelo 3D global no muy preciso, recomendable para grandes edificaciones con superficies constantes y bajos factores de riesgos durante el vuelo. También se puede realizar un vuelo supervisado manualmente, donde las configuraciones del UAV y rutas del vuelo se establecen según las caras irregulares o superficies ocultas según la topología y condiciones del cuerpo a capturar y modelar.

Figura 5

Procesos para la generación de modelos 3D



Nota. Procesos para la generación de modelos 3D a partir de modelos crudos y la ejecución de vuelos supervisados. Tomado y traducido de Shang y Shen (2022).

5. Metodología

Para la validación del análisis de datos estructurales y estratigráficos a partir del desarrollo de MDA se llevaron a cabo actividades que se resumen en la (Figura 6).

5.1 Revisión Bibliográfica y planificación

La primera fase del trabajo consistió en realizar una revisión bibliográfica del área de estudio para encontrar las localidades con mayor potencial hidrogeológico en la MLS y así establecer los antecedentes estratigráficos y estructurales necesarios para la discusión de los resultados.

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

Para planificar las salidas de campo se tuvieron en cuenta los dispositivos disponibles, tales como dos dispositivos: 1) UAV de referencia Mavic 2 Pro, suministrados por la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander (UIS); 2) UAV Mavic Air 2, aportado por los tesistas

Figura 6

Metodología de la investigación llevada a cabo para identificar y medir los escarpes seleccionados mediante la construcción de MDA.

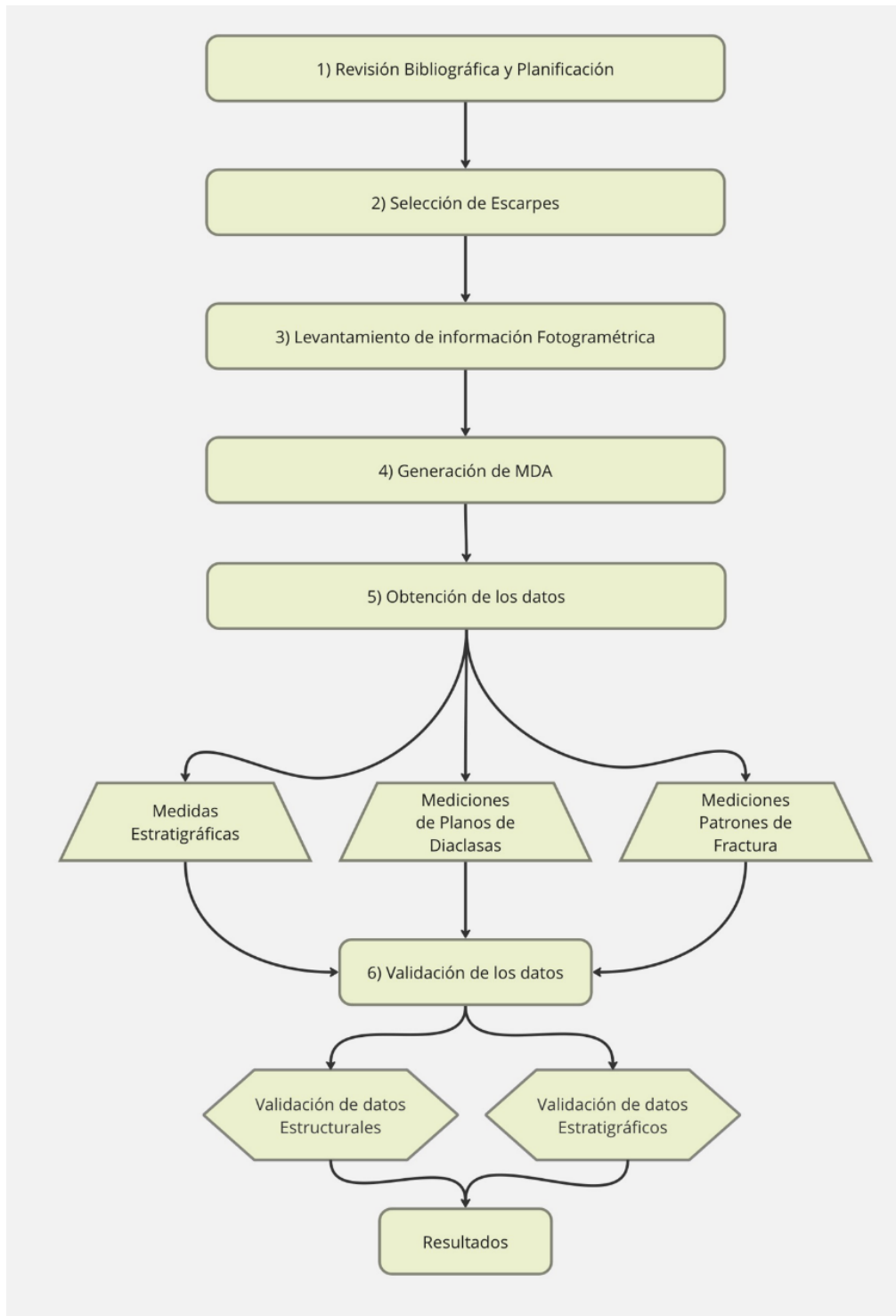


Tabla 1*Comparación de algunas especificaciones técnicas de los UAV utilizados*

	Mavic Air 2	Mavic 2 Pro
	Características del UAV	
Sistema satelital de navegación global	GPS + GLONASS	GPS + GLONASS
Rango de precisión de estacionamiento	Vertical 0,1m (Con posicionamiento de Visión) 0,5m (Con GPS de Precisión)	Vertical 0,1m (Con posicionamiento de Visión) 0,5m (Con GPS de Precisión)
	Horizontal 0,1m (Con posicionamiento de Visión) 1,5m (Con GPS de Precisión)	Horizontal 0,3m (Con posicionamiento de Visión) 1,5m (Con GPS de Precisión)
Captura individual	12MP/48MP	20MP
Tamaño de imagen	8000 x 6000 px	5427 x 3648 px
Captura Rápida	12 MP	20MP
Formato de imagen	JPEG / DNG (RAW)	JPEG/ DNG (RAW)

Nota. Fuente Información obtenida de www.dji.com/global/products/comparison-consumer-drones

5.2 Selección de Escarpes

Una vez recolectada la información, se identificaron los escarpes de mayor exposición que cumplieron con los criterios necesarios para levantar la información fotogramétrica. Para esto se llevó a cabo una exploración de campo junto con los directores del proyecto donde se reconocieron los puntos de interés de la zona de estudio. Considerando riesgos particulares de estos paisajes abruptos se prestó atención a características como el relieve, distancia entre las zonas de interés, el comportamiento de las corrientes de viento, los obstáculos que interfieren en la señal de los dispositivos, el ángulo del sol frente a la superficie terrestre a lo largo de cada hora del día garantizando una iluminación correcta en

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

las fotografías y particularidades de cada punto. Los escarpes más atractivos se caracterizan por ser paredes despejadas de vegetación en donde pueden presentarse áreas húmedas resultado de la migración de agua a través de las fracturas. Esta inspección permitió seleccionar 15 puntos de control Tabla 2. La localización de los 15 puntos de control se puede observar en las figuras 1 y 2.

Tabla 2

Escarpes seleccionados del área de estudio (Puntos de control).

No.	Nombre	Código	Coordenadas O	Coordenadas N	UAV utilizado
1	La Punta**	PC1_JM	73° 2'6.85"O	6°55'7.06"N	Mavic 2 Pro
2	La Pradera*	PC2_JM	73° 1'48.52"O	6°50'1.42"N	Mavic 2 Pro
3	Teleférico	PC3_JM	73° 2'52.35"O	6°48'18.20"N	Mavic 2 Pro
4	Macaguato*	PC4_JM	73° 2'54.18"O	6°48'10.85"N	Mavic 2 Pro
5	La Mojarra*	PC5_JM	73° 5'3.47"O	6°46'41.53"N	Mavic 2 Pro
6	Las Pavas*	PC6_JM	73° 4'38.58"O	6°45'37.96"N	Mavic 2 Pro
7	El Pozo	PC7_JM	73° 7'35.74"O	6°44'22.20"N	Mavic Air 2
8	El Toro*	PC8_JM	73°10'41.81"O	6°45'23.07"N	Mavic Air 2
9	Las Juntas	PC9_JM	73°11'34.07"O	6°45'53.26"N	Mavic Air 2
10	Halconera	PC10_JM	73°11'10.12"O	6°48'15.99"N	Mavic 2 Pro
11	El Balcón*	PC11_JM	73°11'2.83"O	6°47'43.35"N	Mavic Air 2
12	El Pedregal	PC12_JM	73°10'43.47"O	6°48'3.67"N	Mavic 2 Pro
13	Pila Honda*	PC13_JM	73° 9'0.81"O	6°50'48.81"N	Mavic 2 Pro
14	El Duende*	PC14_JM	73° 4'41.77"O	6°53'15.45"N	Mavic 2 Pro
15	Santa Rita*	PC15_JM	73° 4'51.79"O	6°55'1.25"N	Mavic 2 Pro

Nota. *MDA's utilizados para el análisis estructural, **MDA utilizado solo para cálculo de intensidad y densidad en el análisis estructural.

5.3 Levantamiento de Información Fotogramétrica

La diferencia de altitud de los afloramientos y la irregularidad de los escarpes no hace confiable trazar un plan de vuelo automatizado porque hay alta probabilidad de colisión por lo que se capturó con vuelos manuales. Se tiene especial cuidado en la distancia de la cámara a la superficie cumpliendo los porcentajes de solapamiento recomendados optimizando desde múltiples vistas los espacios capturados en cada imagen como lo recomienda Cambell y Wynne (2011) y Shang y Shen (2022). En aras de realizar un procesamiento óptimo y más económico en recursos computacionales se recomienda filtrar y eliminar las capturas sin un orden definido e imágenes que no se solapan con un porcentaje requerido pues genera demoras en las etapas de procesamiento reduciendo su calidad e incluso puede ocasionar distorsiones en los MDA.

5.4 Generación de MDA

La metodología de análisis remoto de los afloramientos mediante enfoques tridimensionales utilizó vehículos aéreos no tripulados UAV para capturar imágenes de alta resolución, las cuales luego se procesaron bajo el uso de licencias estudiantiles en el *software Agisoft Metashape*. Este software realiza un procesamiento fotogramétrico de imágenes digitales y genera datos espaciales en tres dimensiones para múltiples aplicaciones. Esto

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

ofrece una visualización detallada de la estructura, identificación y mapeo de los rasgos geológicos permitiendo la medición indirecta de distancias, áreas y orientación de planos que se pueden generar sobre las superficies del modelado, entre otras.

El número de fotos que se pueden procesar en *Agisoft Metashape* depende del *Hardware* de la estación de trabajo o el equipo de cómputo, parámetros como la memoria RAM, memoria gráfica y el procesador de este. Según el manual de *Agisoft Metashape* y *Meshlab de Panacea Cooperative* es importante seguir una serie de pasos para el escalado del modelo 3D, a partir de las necesidades y objetivos de cada usuario. Los estándares que garantizan un procesamiento de calidad dependen de los insumos que ya se habían registrado en la etapa de captura y adquisición de información.

Una vez se filtradas las imágenes capturadas con los diferentes parámetros que ofrece *Agisoft Metashape* el procesamiento consistió en generar: i) nube de puntos dispersa, ii) nube de puntos densa, iii) MDA (Figura 7). Para la construcción del primer espacio tridimensional que es la nube de puntos dispersa se proyectan algunos puntos de empalme de las fotografías y se generan los primeros volúmenes tridimensionales, posterior a esta etapa se obtiene la construcción de nubes de puntos densa donde se proyecta en dirección normal cada píxel en cada fotografía alineada anteriormente según su posición de captura.

Figura 7

Ejemplo de la generación del MDA de PC_4JM Macaguato, municipio de Los Santos.



Luego de limpiar la escena eliminando manualmente los puntos fuera del volumen de trabajo o superficies que puedan generar ruido en la construcción del MDA, se procedió a desarrollar la malla del modelo tridimensional. Basándose en la información de la nube de puntos densa, *Agisoft Metashape* puede reconstruir un modelo poligonal. Una vez obtenida la malla, la cual corresponde con vértices que unen la nube de puntos densa formada con anterioridad, se crea el MDA compuesto por caras que rellenan con polígonos triangulares en la malla. Por ejemplo, en el modelo del PC_4JM Macaguato se generó un número de caras de 115.142.610 (Figura 7). Los MDA generados se exportan en formatos .KMZ y .OBJ, necesarios para operar el volumen tridimensional en *software* de procesamiento geológico como *GeoVis 3D*.

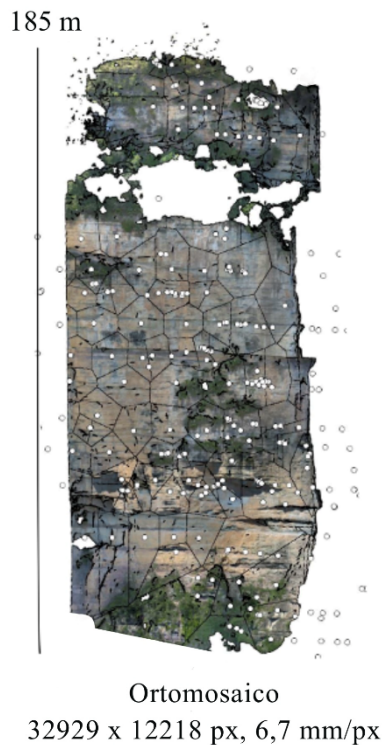
Por otro lado, a partir de los MDA, el *Software Agisoft Metashape* permite generar ortomosaicos que consisten en una imagen ortorectificada a partir del mosaico de las diferentes imágenes usadas en la construcción del MDA. De cada uno de los MDA se generaron ortomosaicos teniendo en cuenta el azimut de las caras con mejor exposición del escarpe para poder realizar mediciones de los espesores de las capas y mediciones de las

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

fracturas. La Figura 8 muestra un ejemplo del ortomosaico generado del afloramiento PC_4JM Macaguato donde se observan 185 m de pared con resoluciones cercanas 7 mm por píxel.

Figura 8

Ortomosaico corresponde a PC_4JM Macaguato.

**5.5 Obtención de Datos**

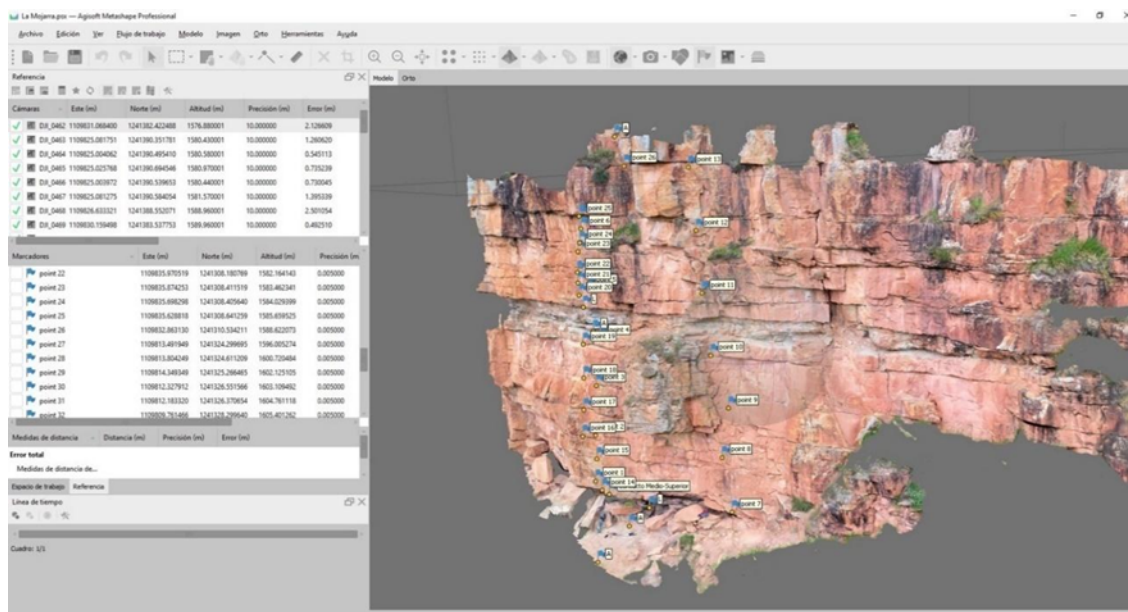
Después de la recolección, organización y digitalización de la información, fue necesario realizar un tratamiento de los datos. Esto implicó utilizar herramientas y software especializado para visualizar y analizar los MDA, descritos a continuación.

5.5.1 Medidas Estratigráficas

Los esquemas estratigráficos digitales se crearon obteniendo medidas de manera indirecta usando herramientas provistas por Agisoft Metashape. Al identificar contactos entre capas se utilizan marcadores que el software reconoce en el espacio, determinando alturas y espesores de los estratos. Para el reconocimiento remoto de la litología se realizó una minuciosa interpretación textural presente en cada una de las capas teniendo como guía la columna estratigráfica levantada directamente en PC_4JM Macaguato y usada para clasificar de forma general las texturas en areniscas, lodolitas, conglomerados y calizas.

Figura 9

Ubicación de marcadores sobre los MDA y sus referencias espaciales en la interfaz de Agisoft Metashape.



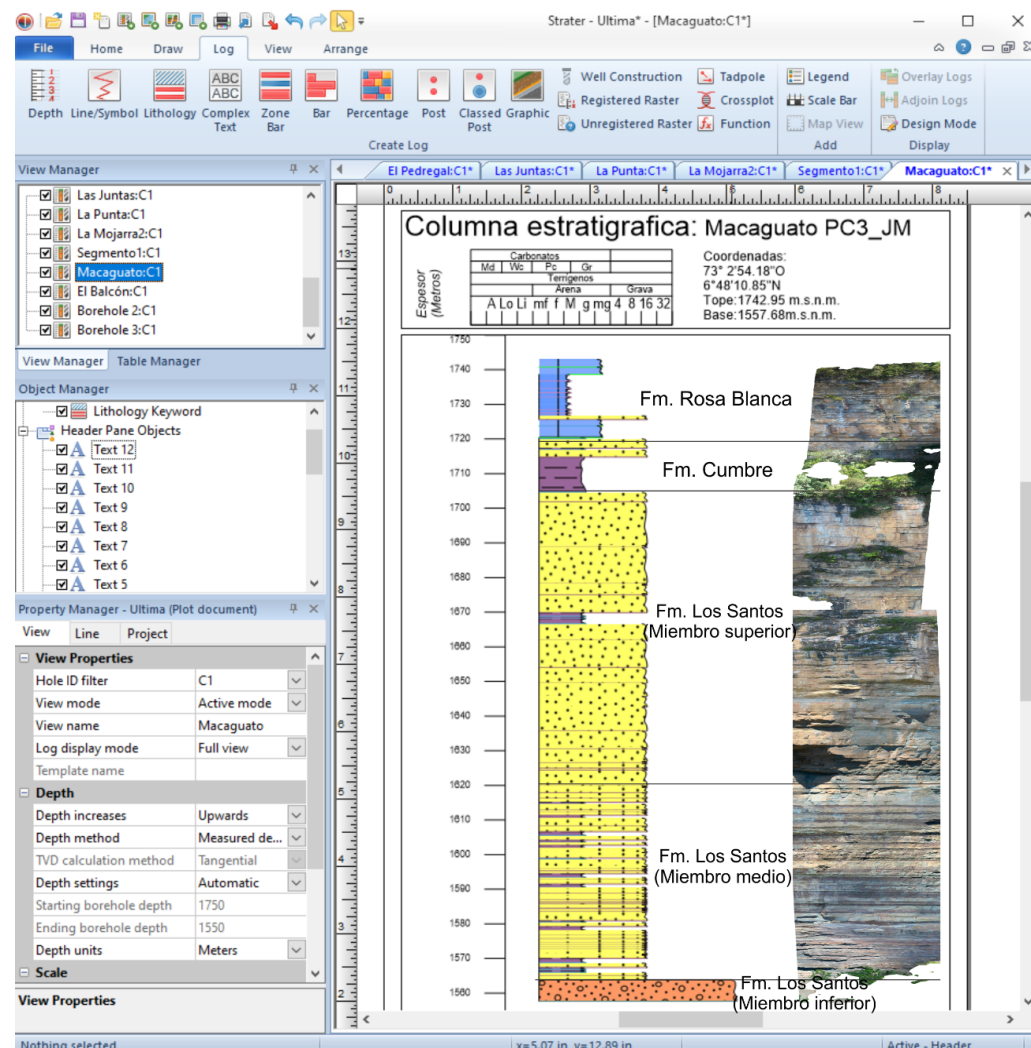
Para garantizar la uniformidad y la precisión en el proceso de correlación estratigráfica, se utilizó el software Strater5 para la representación visual de los esquemas

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

(Figura 10). Las ortoimágenes que acompañan a los esquemas de las columnas fueron creadas y extraídas de Agisoft Metashape, resultandos útiles para el reconocimiento de la litología, porque proporcionan una imagen plana de toda la sección, es decir, que esta imagen plana mantiene las proporciones, a diferencia de usar el foco de una sola cámara que distorsiona las distancias en la imagen.

Figura 10

Interfaz del software Strater5 muestra el esquema del PC4_JM (Macaguato)



Nota. En este Software se construyeron los esquemas de las columnas estratigráficas de cada punto de control a partir de los espesores calculados en los

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

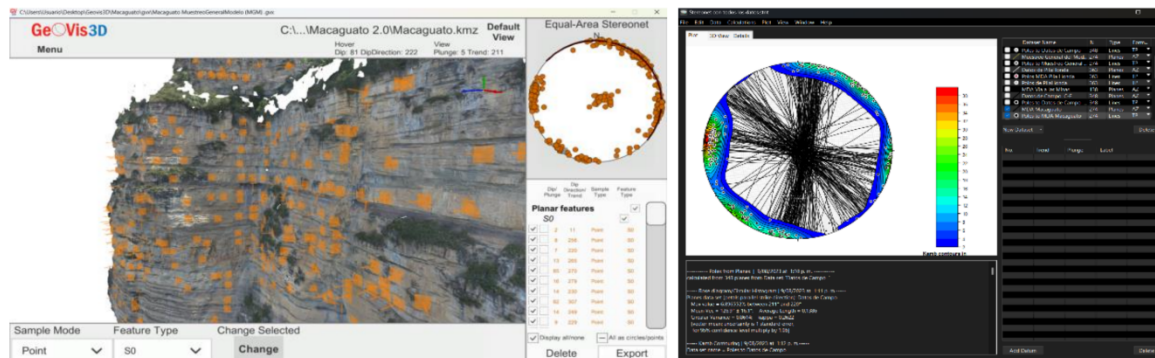
MDA y la clasificación textural de la roca con su respectiva ortoimagen construida de los MDA.

5.5.2 Mediciones de Planos de Diaclasas

Una vez se ha construido cada MDA en Agisoft Metashape, se usó el Software GeoVis 3D 2.0, el cual permite la medición y registro de elementos geométricos, planos y lineales sobre MDA pues proporciona herramientas para la anotación y etiquetado, adaptando las configuraciones de exportación en cada MDA ajustadas al formato .KMZ, (el mismo usado por Google Earth). En el proceso de exportación, se reduce la resolución por el proceso de suavizado y homogeneización que sufren algunas caras y vértices. En la Figura 11 se observa el entorno de la aplicación y se registran los planos medidos sobre estos.

Figura 11

Ecosistema de trabajo de la aplicación GeoVis 3D y Stereonet



Nota. Estos son Softwares libres utilizados para la captura de datos sobre el MDA y una aplicación usada para el procesamiento y ajuste de los datos.

Dentro de la aplicación de GeoVis 3D se tomaron las direcciones de diaclasas usando la herramienta múltiple, la cual selecciona nueve puntos sobre la superficie de interés y

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

promedia el rumbo y buzamiento de la cara a medir. Esta herramienta arroja un dato muy certero siempre y cuando no haya un polígono del modelo con un rumbo o buzamiento fuera de la media dentro de las nueve superficies medidas, pues este cambio de dirección promediaría un plano inexistente. Para estos casos cercanos de los vértices o donde la extensión de las caras es menor se midió con la herramienta Point, con la cual se mide sólo las propiedades de la cara o superficie seleccionada.

Tras realizar la toma de datos en cada MDA se procedió con las correcciones de la desviación magnética de la zona de estudio, en este caso -6° con ayuda del software Stereonet (Figura 11), pues esta propiedad está ausente en los MDA y es necesaria para garantizar la validación de los datos tomados en campo sobre los datos digitales. También se realizó el cálculo de polos y densidad de estos con la intención de facilitar la interpretación visual de los resultados. Finalmente, los datos de orientación fueron proyectados en la aplicación GeoRose 0.5.1. Este software permite la comparación y posterior validación de los datos de diaclasas permitiendo considerar las principales familias en los puntos de control modelados, generando diagramas Rosa para hacer un análisis cuantitativo a partir de los porcentajes de orientaciones y medidas como de la distribución y tendencia de la orientación preferencial de las diaclasas.

5.6 Caracterización de los patrones de fracturas

Para la medición de fracturas se llevó a cabo una selección de las ventanas de muestreo en cada MDA donde se tuvieron en cuenta parámetros registrados en la

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

reconstrucción y modelamiento. Se priorizaron las zonas de alta confiabilidad, las cuales indicaron las áreas de menor error durante el procesamiento, siendo zonas que garantizan propiedades como resoluciones similares en el ortomosaico, al contener bajos niveles de deformación de la superficie 3D y ser proyectados en la dirección seleccionada, es decir, paralelo a un plano de diaclasa o cara del escarpe.

Para el análisis cuantitativo del sistema de fracturas se utilizó el software FracPaQ (Healy y Rizzo 2019), de código abierto y escrito en MATLAB. Este permite la caracterización de la distribución espacial de las fracturas en una muestra en dos dimensiones, generando estadísticas de propiedades y modelos, así como, la caracterización de la permeabilidad (Nibourel 2016). Para generar el archivo de entrada en FracPaQ, se utilizó el *software* de diseño vectorial *CorelDRAW*. En ventanas de muestreo se marcaron cada traza de fractura a partir de imágenes extraídas de los MDA, utilizando la herramienta polilínea y siguiendo el trayecto de las fracturas visibles. El archivo de entrada fue una imagen binaria (.jpg/jpeg o .tif/.tiff) de coordenadas (x, y) donde se identifican los nodos de cada traza de fractura. Healy y Rizzo (2019) indican que FracPaQ puede cuantificar las longitudes y orientaciones de las fracturas, la intensidad, densidad, conectividad y permeabilidad de los patrones de fractura que constituyen el sistema. Estas herramientas permiten un análisis completo y detallado de los datos estructurales y de fracturas, lo que resulta útil en la exploración y producción de recursos geológicos.

Para estimar la intensidad y densidad de los patrones de fractura se priorizo registrar en cada MDA ventanas de muestreo rectangulares con lados de 10m x 10m, sin embargo,

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

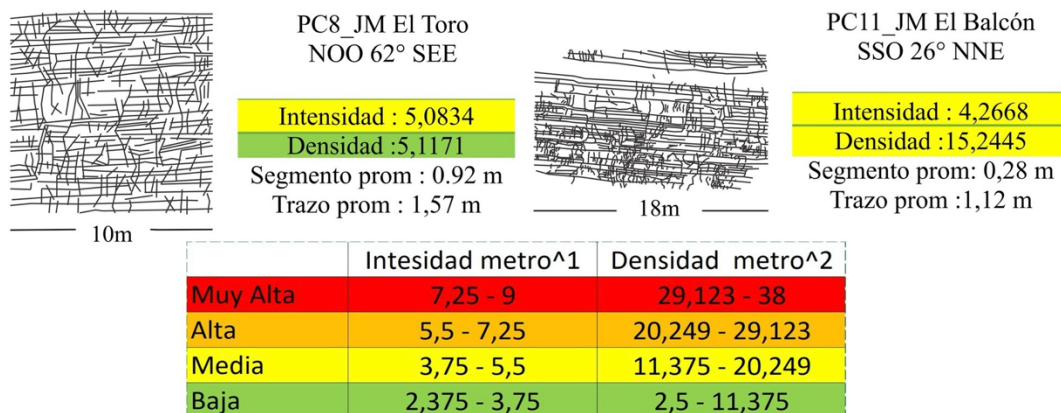
algunas ventanas fueron construidas con lados de 18m x 10m. Sobre las ventanas de muestreo se trazaron manualmente los segmentos de fracturas como vectores en el software CorelDraw.

La continuidad de los segmentos configura un trazo, por lo tanto, los trazos se componen de un conjunto de segmentos y finalizan cuando se presenta una desconexión entre ellos. Una vez vectorizada esta información, se procesa en el *Software* FracPaQ, el cual calcula la intensidad y densidad dentro de los diferentes círculos de muestreo que se analizan en una ventana de muestra. La intensidad corresponde al número de segmentos ($m/1$) en cada uno de estos círculos y la densidad ($m/2$) al número de segmentos que finalizan dentro de los círculos, utilizando las ecuaciones propuestas por Mauldon et al., (2001).

Los parámetros de intensidad y densidad se calcularon para 10 MDA. Una vez cuantificadas las propiedades se tomaron los valores mínimos y máximos, con los cuales se generaron cuatro márgenes numéricos para establecer una clasificación relativa de Baja, Medio, Alta y Muy Alta. La Figura 12 presenta dos ejemplos, una ventana de 10m x 10m y una de 18m x 10m, mostrando los resultados de la intensidad, densidad, segmentos y trazos promedios.

Figura 12

Patrones de intensidad y densidad. Medidos y establecidos en FracPaQ ejemplo PC8_JM El Toro, PC11_JM El Balcón.



Dentro de las herramientas de análisis que posee FracpaQ ofrece la cuantificación de las orientaciones de fractura y un tensor de permeabilidad, el cual permitió establecer orientaciones en cada ventana de muestreo y por ende comprender las direcciones predominantes de la porosidad secundaria como canal principal en la migración de los fluidos en el miembro superior de la Fm. Los Santos.

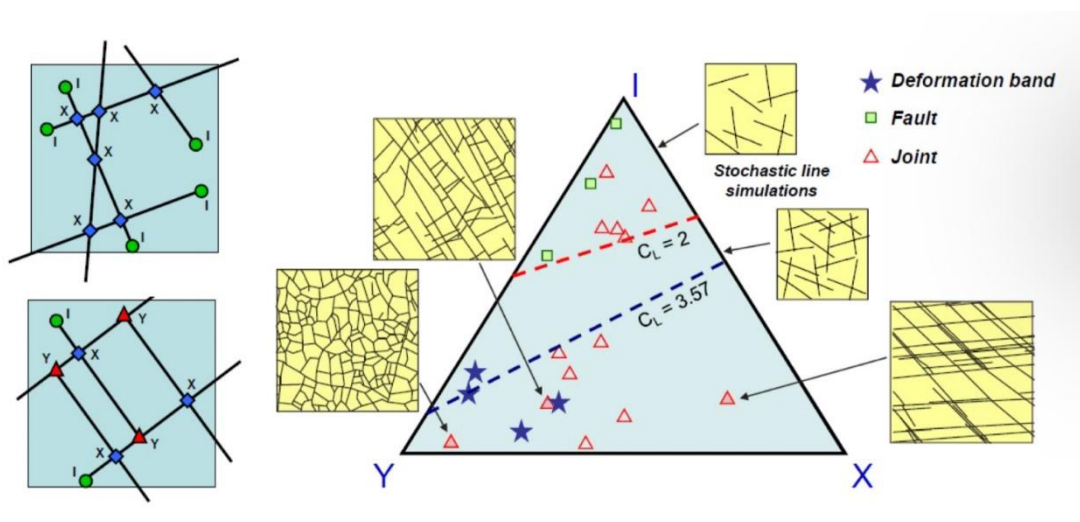
Para establecer el nivel y tipo de conectividad en las ventanas de muestreo, FracPaQ acude a la calificación de nodos generados al finalizar cada trazo o la forma de intersección entre estos, tal como se observa en la Figura 13, donde se clasifican segmentos sin conexiones como “I” que al poseer solo dos nodos de inicio representa su inicio y final y estos son ubicados en la pirámide de conectividad hacia la parte superior. Las conexiones tipo ‘Y’ corresponden a la intersección de dos nodos sobre un segmento y son representados con triángulos (margen izquierdo de la (Figura 13). Éstos en el triángulo de conexiones de líneas

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

de la misma figura ubican su 100% a la parte inferior izquierda. Por último, las conexiones tipo 'X' que corresponden al cruce de dos fracturas y configuran la mayor conectividad; se indican con rombos azules en la figura y su vértice principal está ubicado en la parte inferior derecha.

Figura 13

Modelo estocástico y clasificación de topología y nodos tipo I, Y, X



Nota. A la izquierda de la figura se indican líneas y nodos 'I', 'Y' y 'X'. La aparición de este modelo estocástico y sistemas fracturados al margen derecho. La línea discontinua roja es un valor promedio de la Conexión de línea. (CL) el cual no permite definir un grupo de expansión y (CL) =3.35, que es un valor simulado para predecir un sistema de líneas aleatorias de longitud fija. Tomado y modificado de Sanderson y Nixon (2015) en García et al., (2024).

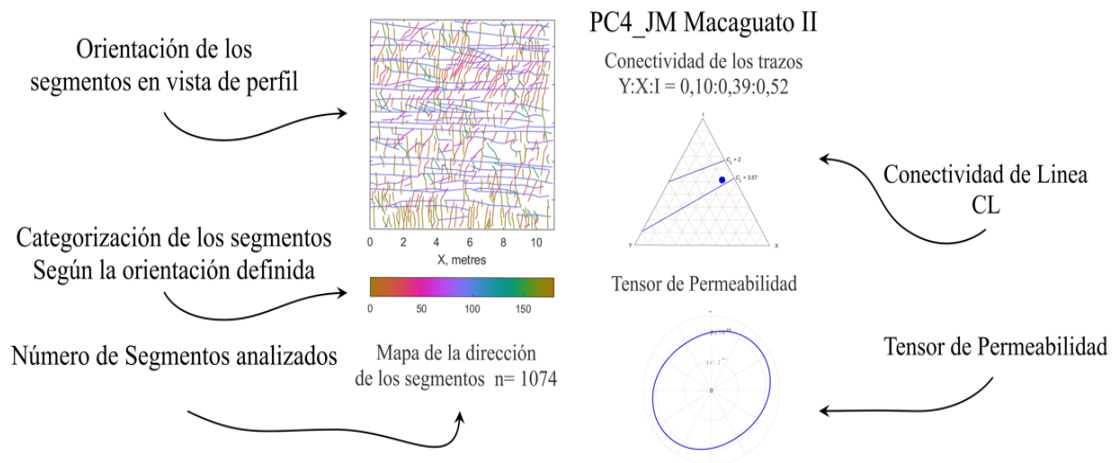
Según Heley y Rizzo (2019) los patrones de fractura con mejor conexión se observan hacia la base del triángulo, donde aumenta la proporción de nodos (X + Y). Dado que se representan nodos de conexión y no fracturas aisladas como las I. Para la medición de los tensores de permeabilidad (Figura 14) se usa información medida en vista de perfil, expuestas

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

en los escarpes del área de estudio, aplicando la herramienta de FracPaQ que ofrece la representación de las elipses siguiendo el método de Long et al., (1982).

Figura 14

Descripción de los resultados de los patrones de fractura.



Nota. Indica el Azimut de las imágenes tomadas en los escarpes, gráfico de las fracturas clasificadas de 0 a 180 grados de buzamiento, grafico ternario de la conectividad de los trazos el cual establece valores de Y:X:I normalizados a 1 y hacia la parte inferior derecha se indica el tensor de permeabilidad.

5.7 Validación de los Datos

Para validar los datos medidos mediante el uso de dispositivos UAV en afloramientos de difícil acceso, fue necesario revisar los resultados de investigaciones previas realizadas en la zona de estudio y realizar un análisis estadístico (Li et al., 2021)

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

con los datos adquiridos directamente en campo del escarpe de roca con mejor acceso, correspondiente al PC4_JM Macaguato. Este afloramiento cuenta con acceso a través de la vía ferrata del parque de escalada “La Pared”, el cual se recorrió empleando técnicas de escalada y uso de equipo certificado para esta actividad, incluyendo cuerdas, arnés, mosquetones, entre otros. Durante este recorrido, se registraron datos familias de diaclasas para el análisis estructural y se realizó una medición y muestreo de las unidades aflorantes. El registro estratigráfico hecho en el recorrido permitió reconocer y establecer los espesores y contactos de las formaciones. Para la validación de los espesores en campo se recorrió el PC5 JM La Mojarra, donde se midieron directamente en el afloramiento las distancias entre los contactos, para ser comparados posteriormente de manera indirecta en el MDA.

Las familias de diaclasas y los espesores medidos directamente en campo se compararon con los datos obtenidos de manera indirecta en los MDA, mediante la regresión lineal de los datos y el cálculo del coeficiente de determinación (R^2), usando el *software Excel* y el *p-value* con paquetes estadísticos de código abierto en *el Software R studio*. El *p-value* permite determinar si una correlación es estadísticamente significativa ($p\text{-value} < 0.005$) o no ($p\text{-value} > 0.005$).

6. Resultados

A partir de la información obtenida de los MDA y los procesos realizados durante su elaboración se generaron los siguientes resultados

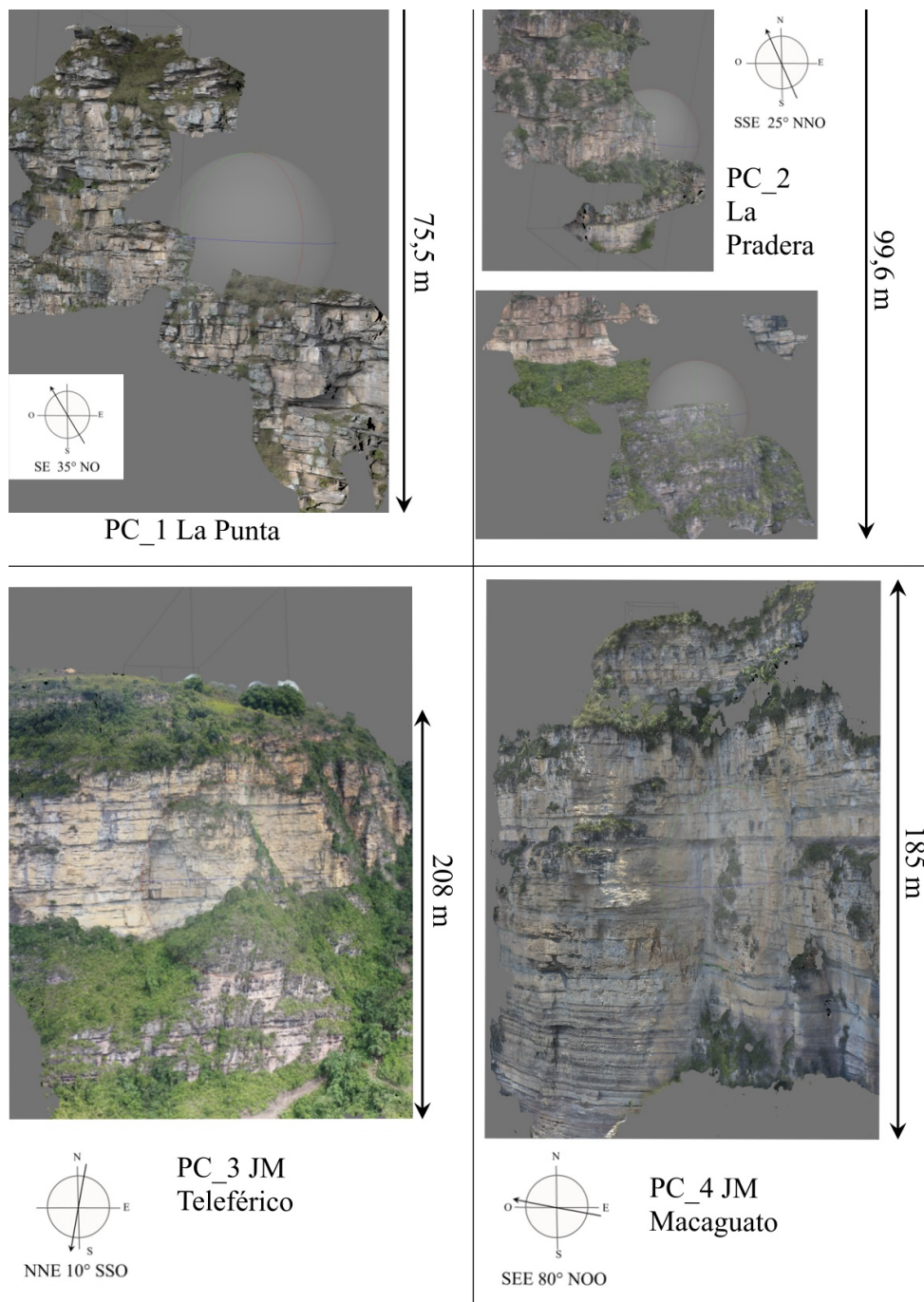
6.1 Modelos

A continuación, se presenta un collage de los MDA generados en los 15 puntos seleccionados. Para mejor visualización se muestran separados de PC_1JM a PC_4JM en la Figura 15, PC_5JM hasta PC_8JM en la Figura 16, PC_9JM a PC12_JM en la Figura 17 y por último en la Figura 18 se incluye desde el PC_12JM al PC_15JM, identificando los nombres de cada punto de control y el azimut de la captura de cada afloramiento de los sitios de levantamiento,

Figura 15

Modelos Digitales de Afloramientos (MDA) de los puntos PC_1J, PC_2JM, PC_3JM,

PC_4JM

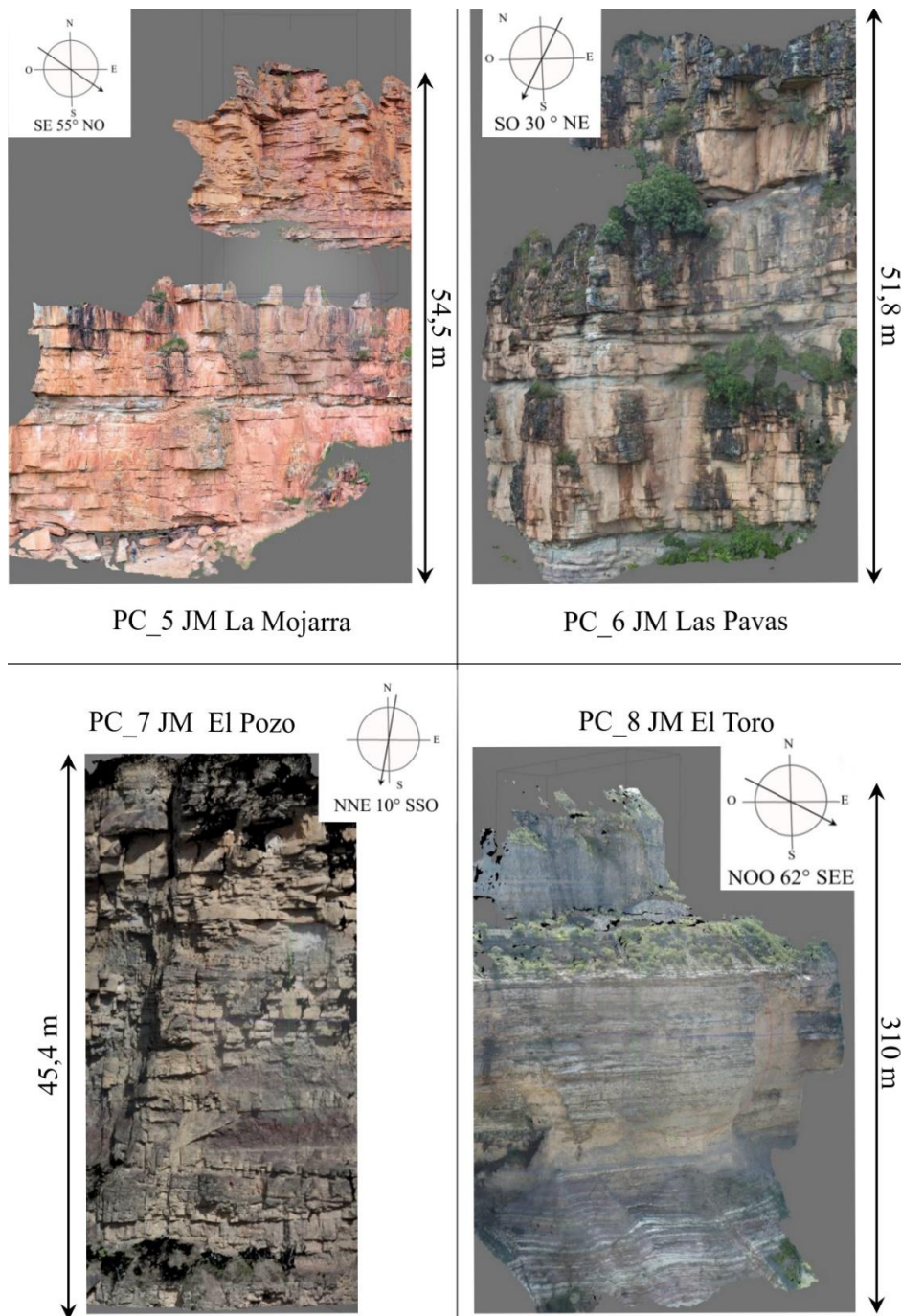


CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

Figura 16

Modelos Digitales de Afloramientos (MDA) PC_5JM, PC_6JM, PC_7JM y PC_8 JM. El

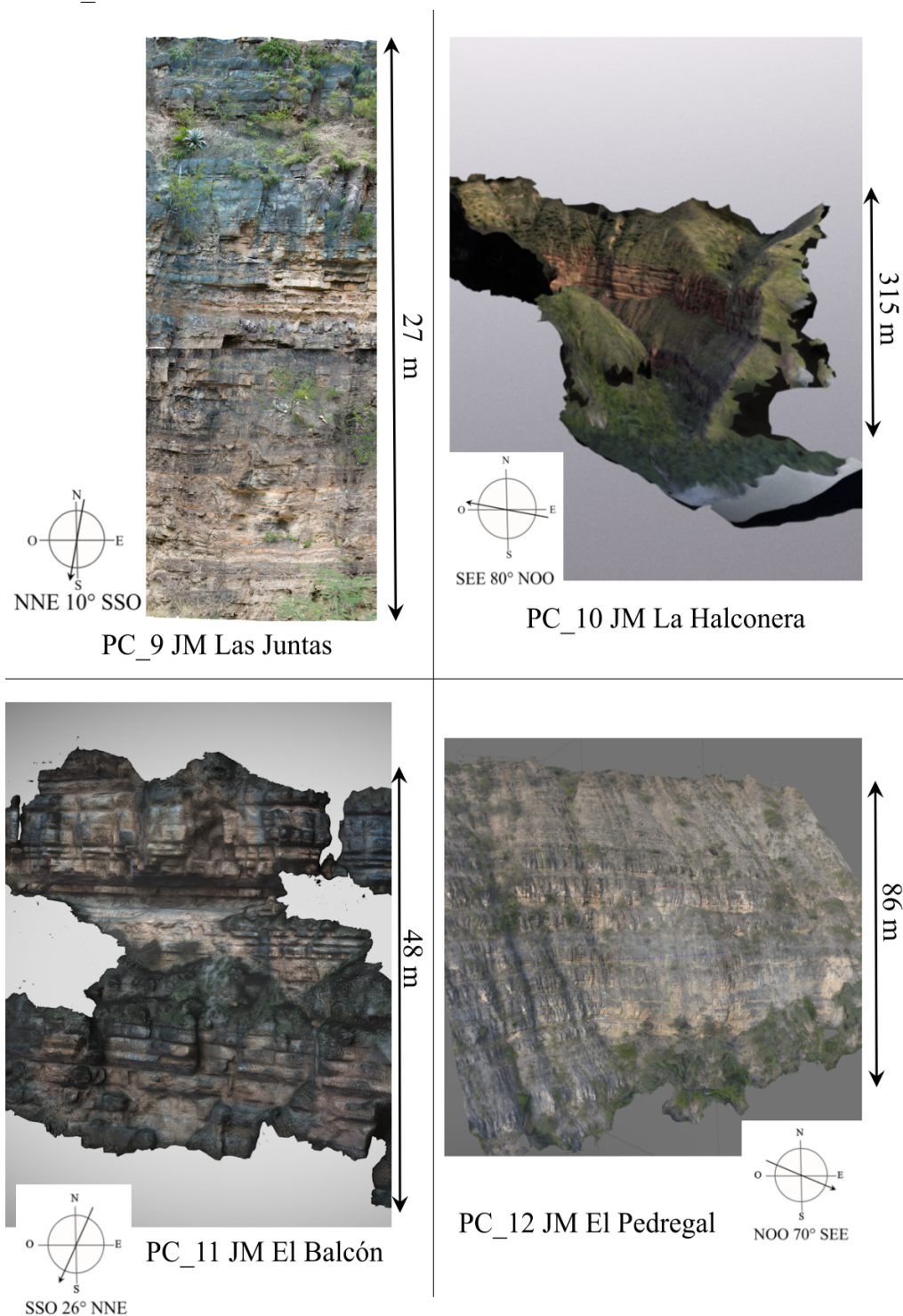
Azimut mostrado en cada MDA representa la dirección de captura de cada afloramiento



CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

Figura 17

Modelos Digitales de Afloramiento (MDA) de los puntos PC_9JM, PC_10JM, PC_11JM, PC_12JM

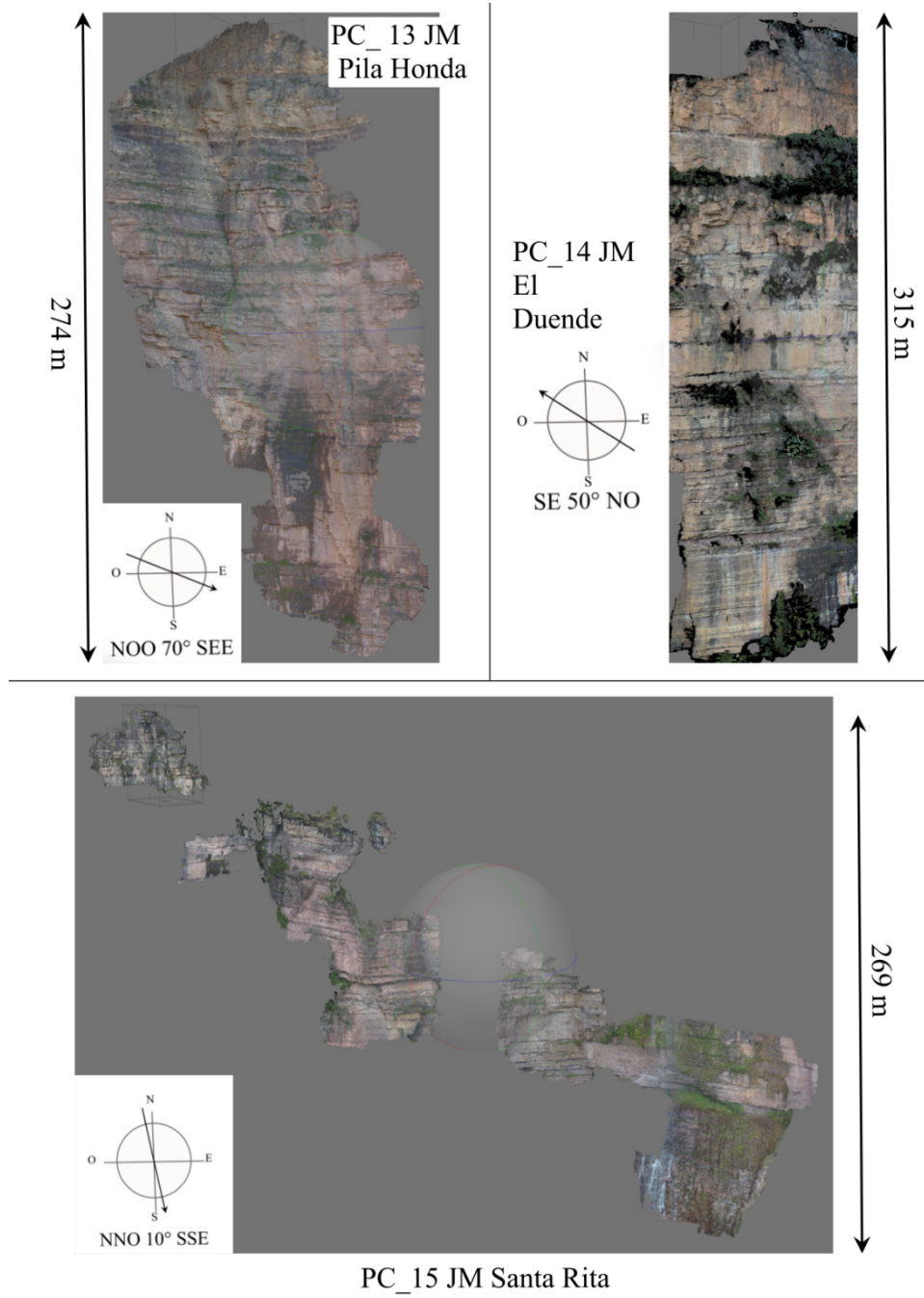


CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

Figura 18

Modelos Digitales de Afloramiento (MDA) de los puntos, PC_13JM, PC_14JM y

PC_15JM.



Una vez generados los modelos digitales de afloramiento, debido a sus características, fueron seleccionados unos para análisis estructural y otros para análisis estratigráfico. Nueve modelos digitales se pudieron utilizar para análisis estructural debido a que no presentaron problemas en el *Software* de análisis estructural y 10 de Modelos fueron seleccionados para el análisis de permeabilidad y conductividad. Los 15 modelos generados se usaron para realizar los esquemas estratigráficos y su posterior correlación (Tabla 2).

6.2 Resultados de la Validación

A continuación, se explicarán la validación de los resultados estructurales y estratigráficos de los MDA elaborados con las mediciones realizadas directamente en el escarpe PC_4JM Macaguato, afloramiento con el cual se hace la correlación de la información.

6.2.1 Validación de datos estratigráficos

Para obtener medidas confiables de los espesores aparentes de los estratos para elaborar los esquemas de las columnas estratigráficas, se empleó una regresión lineal que compara la distancia entre puntos medidos con cinta métrica directamente en campo, siguiendo marcas de referencia ubicadas estratégicamente a lo largo del escarpe (Figura 19) y la distancia de estos mismos puntos medidos sobre el MDA del PC5. La correlación entre la distancia de altura en MDA y las distancias medidas directamente tuvo un $R^2 = 0.9998$ con

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

un $p\text{-value} < 0,000$ (estadísticamente significativo). Teniendo en cuenta estas correlaciones, se valida a través de una medida clara la confiabilidad de las mediciones indirectas realizadas en los MDA y así garantizar las medidas de los espesores.

Figura 19

Izquierda y superior derecha, marcas de referencia empleadas para la validación de la medición de espesores. Derecha, regresión lineal de las distancias obtenidas en campo y en el MDA entre cada marca de referencia.

**6.2.2 Validación de datos estructurales**

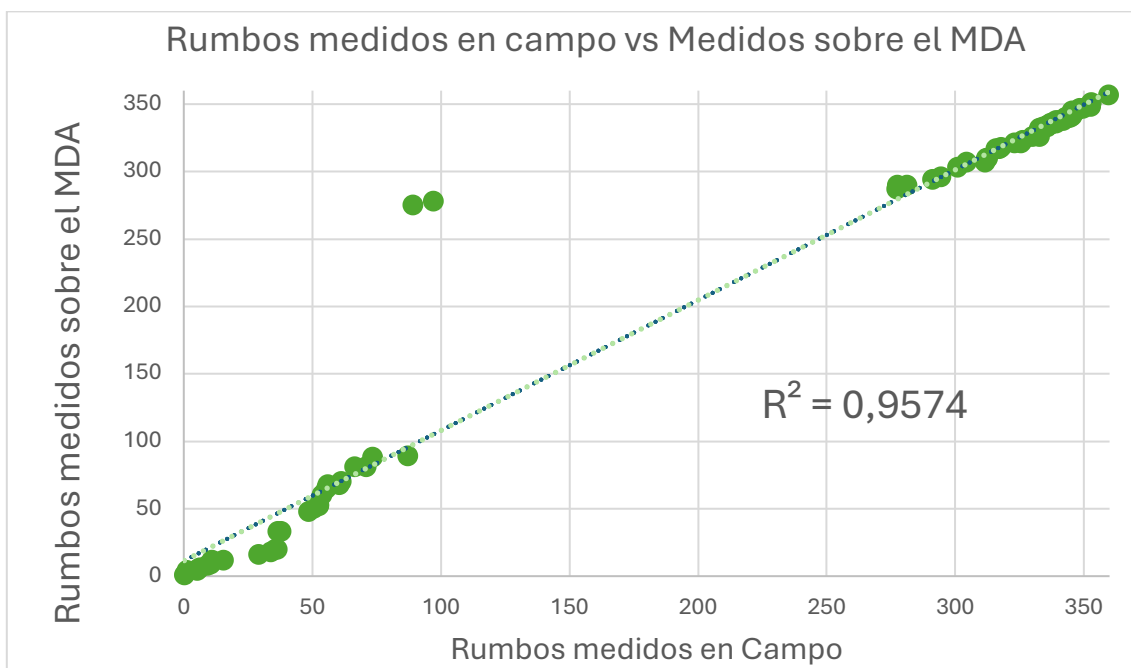
Para dar una validación orientaciones de diaclasas medidas sobre los MDA, se comparan los grupos de las diaclasas adquiridos directamente en campo siguiendo la ruta

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

ferrata del punto “PC4_JM Macaguato” con los datos obtenidos sobre el MDA, midiendo los planos de diaclasas sobre el mismo recorrido realizado en campo. Esta comparación consta de 80 datos en cada población estadística, registrando densidades de los rumbos similares en orientaciones de 0° a 60° y 260° a 360° (Figura 20).

Figura 20

Rumbos medidos en campo VS Medidos sobre el MDA



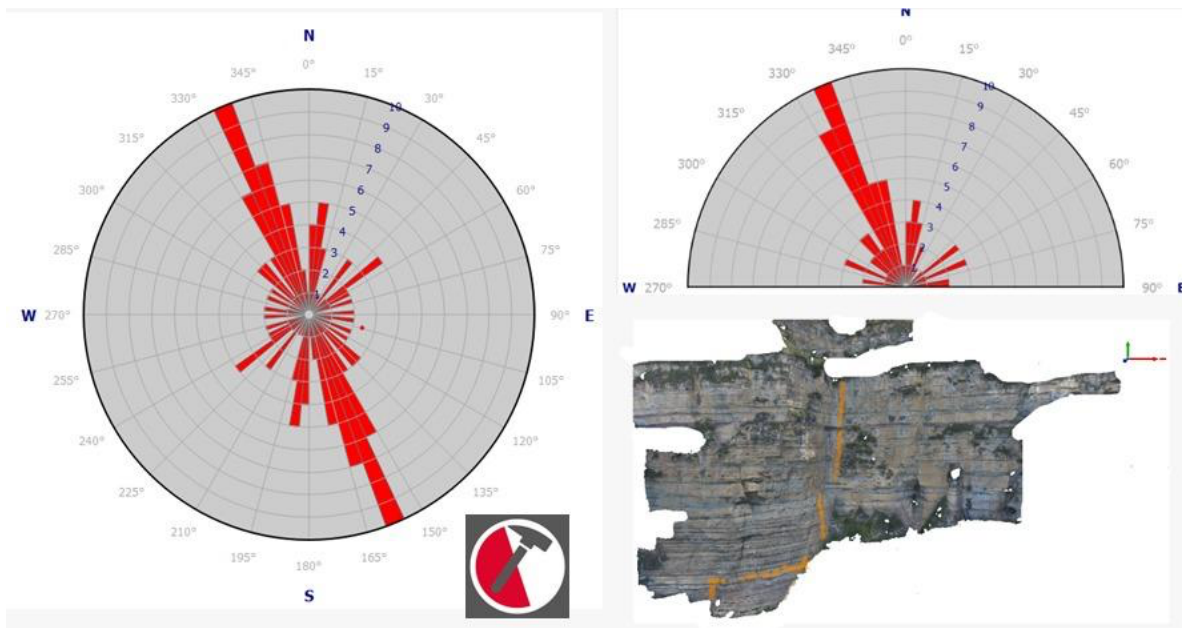
El resultado de comparar los datos medidos directamente sobre el recorrido del (PC4_JM Macaguato) con los datos medidos siguiendo el mismo trayecto sobre el MDA mostró una tendencia lineal con un valor de R^2 de 0,9574 y un p -value $< 0,000$ (estadísticamente significativo). Esto indica una baja variabilidad de los datos medidos sobre la misma ruta del MDA frente a los medidos sobre la misma ruta ferrata en campo, sugiriendo poca variación entre los datos medidos de manera directa e indirecta.

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

También se realizó una comparación visual de estos rumbos proyectados en un diagrama Rosa para las mediciones directas (en campo) e indirectas (sobre los MDA) de los planos de diaclasas. En la Figura 21 se muestra un ejemplo de la orientación preferencial NE-SO donde se puede apreciar una leve desviación de las direcciones de diaclasas registradas en el MDA > de 5°. También se puede apreciar los 58 medidos directamente en campo con los 240 medidos sobre el MDA

Figura 21

Diagramas rosas de los datos de campo y datos tomados sobre el MDA.



Nota. Al margen izquierdo se encuentra un diagrama de rosas construido con los rumbos obtenidos sobre la vía ferrata de PC_04JM Macaguato usando la herramienta Clino y a margen derecho los datos medidos sobre el MDA y la línea naranja indica la ruta escalada en campo durante la etapa de muestreo.

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

6.3 Resultados Estratigráficos

Los MDA permitieron identificar el tipo de roca para los estratos, y además obtener las altitudes de los contactos entre las unidades (Tabla 3), lo cual facilitó la medición de los espesores de cada unidad geológica (Tabla 4). Con esta información y mediante el uso del software Strater5, se construyen 15 esquemas de columnas estratigráficas (Figura 22).

Tabla 3

Valores de altitud en metros sobre el nivel del mar para cada contacto litológico para cada MDA.

TABLA DE CONTACTOS ENTRE LAS UNIDADES DE LA MLS						
Punto de Control		Altitudes de los contactos en m.s.n.m.				
		Fm. Los Santos Miembro inferior	Fm. Los Santos Miembro medio	Fm. Los Santos Miembro superior	Fm. Cumbre	Fm. Rosa Blanca
		Fm. Jordan	Fm. Los Santos Miembro inferior	Fm. Los Santos Miembro medio	Fm. Los Santos Miembro superior	Fm. Cumbre
PC1_JM	La Punta	-	1616,21	1646,80	-	-
PC2_JM	La Pradera	-	1672,58	1729,71	-	-
PC3_JM	Teleférico	1562,18	1628,17	1641,94	1721,62	1728,36
PC4_JM	Macaguato	-	1563,83	1615,1	1704,58	1720,31
PC5_JM	La Mojarra	-	-	1566,65	-	-
PC6_JM	Las Pavas	-	-	1483,27	-	-
PC7_JM	El Pozo	-	-	1000,34	-	-
PC8_JM	El Toro	-	428,79	473,63	594,96	600,63
PC9_JM	Las Juntas	-	-	-	-	-
PC10_JM	Halconera	-	428,82	476,04	548,22	555,15
PC11_JM	El Balcón	-	-	-	-	-
PC12_JM	El Pedregal	-	-	-	-	-
PC13_JM	Pila Honda	-	817,65	851,32	976,40	978,81
PC14_JM	El Duende	-	1487,60	1516,12	-	-
PC15_JM	Santa Rita	1265,41	1391,81	1430,19	-	-

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

Tabla 4

Espesores de las unidades obtenido en cada MDA, se resalta en gris la información recolectada de otros autores.

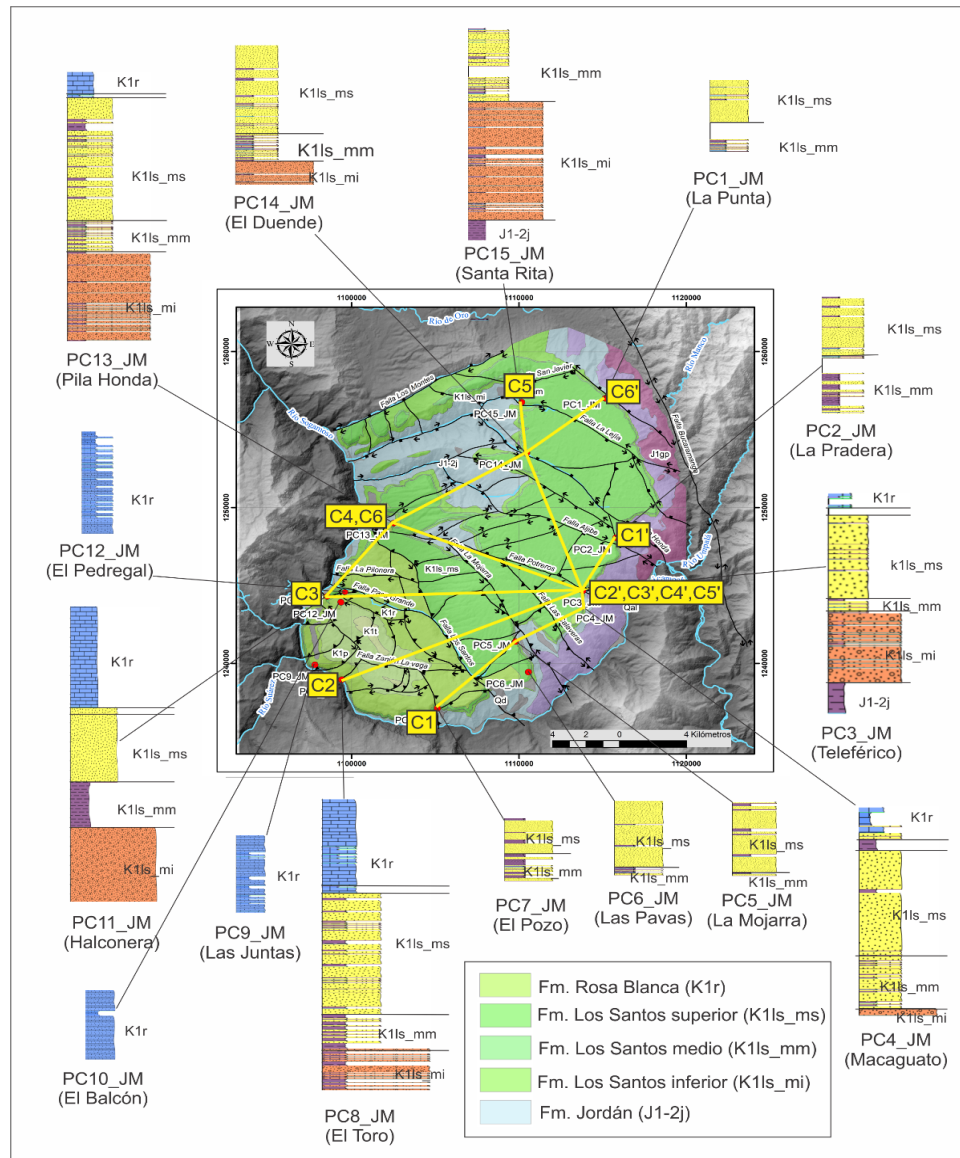
TABLA DE ESPESORES DE LAS UNIDADES DE LA MLS OBTENIDOS EN METROS								
Punto de Control	Unidad	Fm. Los Santos			Fm. Cumbre	Fm. Rosa Blanca	Total Columna	
		Fm. Jordan	Miembro Inferior	Miembro Medio				Miembro Superior
PC1 JM	La Punta	-	-	> 30,59	> 44,56	-	75,15	
RINCON (2008)	La Punta	> 42	56,50	22,65	> 48,7	-	169,85	
PC2 JM	La Pradera	-	-	57,13	> 42,559	-	99,69	
RINCON (2008)	Carrizal	-	> 56	41,00	> 33	-	130,00	
PC3 JM	Teleférico	> 28,69	65,99	13,78	79,68	6,75	> 14,03	208,92
PC4 JM	Macaguato	-	> 6,15	51,27	89,48	15,73	> 22,64	185,27
PC5 JM	La Mojarra	-	-	> 2,57	> 52,02	-	54,59	
PC6 JM	Las Pavas	-	-	> 5,67	> 46,16	-	51,83	
LAVERDE (1985)	El Roto	-	> 78,7	36,60	103,20	5,00	> 2,9	226,40
PC7 JM	El Pozo	-	-	> 19,67	> 25,74	-	45,41	
PC8 JM	El Toro	-	> 44,68	44,84	121,33	5,67	> 93,96	310,48
PC9 JM	Las Juntas	-	-	-	-	-	> 27,71	27,71
PC10 JM	El Balcón	-	-	-	-	-	> 48,65	48,65
PC11 JM	Halconera	-	> 80,07	47,22	72,17	6,93	> 109,26	315,65
PC12 JM	El Pedregal	-	-	-	-	-	> 86,14	86,14
PC13 JM	Pila Honda	-	> 89,63	33,67	125,08	2,41	> 23,67	274,46
ALDANA (2008)	El Calicho	> 1	102,00	21,80	95,30	≥ 8,6	-	228,70
PC14 JM	El Duende	-	> 24,22	28,52	> 89,79	-	-	142,53
PC15 JM	Santa Rita	> 63,88	126,40	38,38	> 40,52	-	-	269,18
ALDANA (2008)	La Navarra	-	≥ 152	40,00	> 54	-	-	246,00

Nota. Los valores numéricos corresponden a metros, El símbolo (>) indica que el levantamiento de la información no se realizó desde el contacto con la formación infrayacente o suprayacente.

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

Figura 22

Esquemas de las columnas estratigráficas de cada punto de control y trazo en planta de los cortes geológicos esquemáticos



Nota. Las medidas de cada columna se muestran en la Tabla 4.

Los sitios donde se elaboraron esquemas de columnas estratigráficas presentaron el mejor registro estratigráfico que se muestran en las panorámicas de las Figuras 23 a 31. En

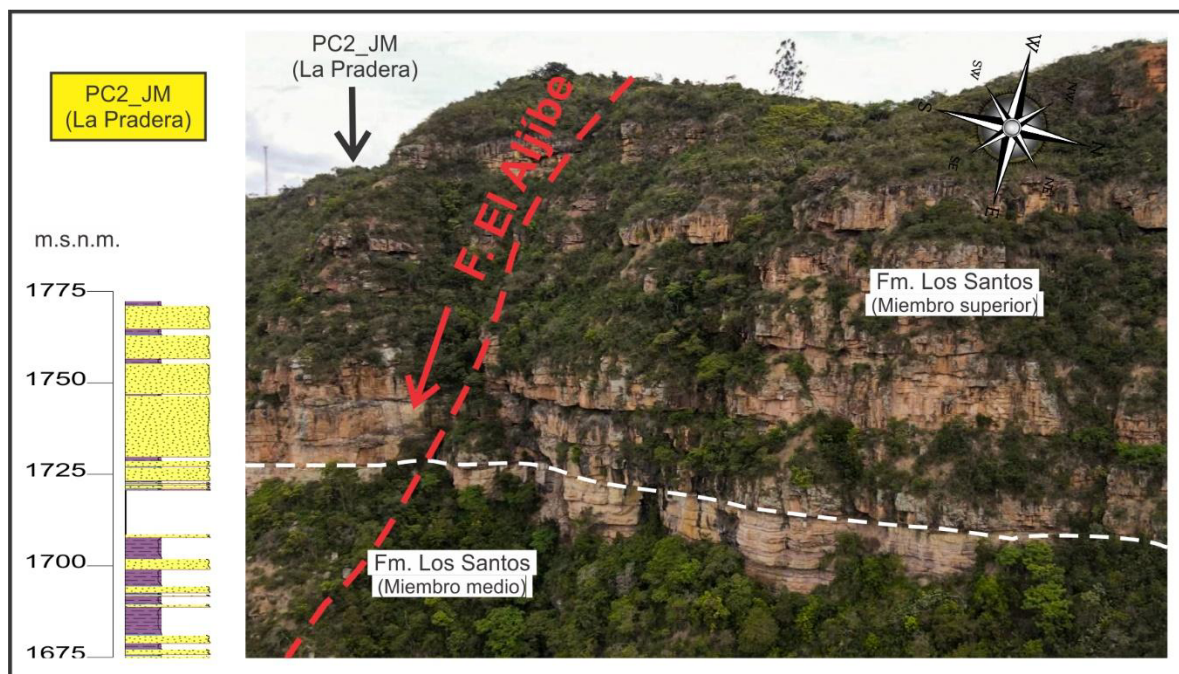
CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

éstas se resalta la litología de las unidades identificadas durante el análisis de los MDA, fallas reconocidas en el modelo estructural de García et al., (2024) y demás fracturas importantes.

En el escarpe PC2_JM, denominado La Pradera Figura 23 se observa el contacto entre el miembro superior de la Formación Los Santos y el miembro medio de esta misma unidad. Así mismo, en la panorámica se resalta el trazo de la falla normal El Aljibe, donde se registró en el MDA una diferencia de altitud de 15m con respecto al mismo estrato al otro lado de la falla, permitiendo definir el desplazamiento de la falla.

Figura 23

Panorámica del escarpe PC2_JM (La Pradera).



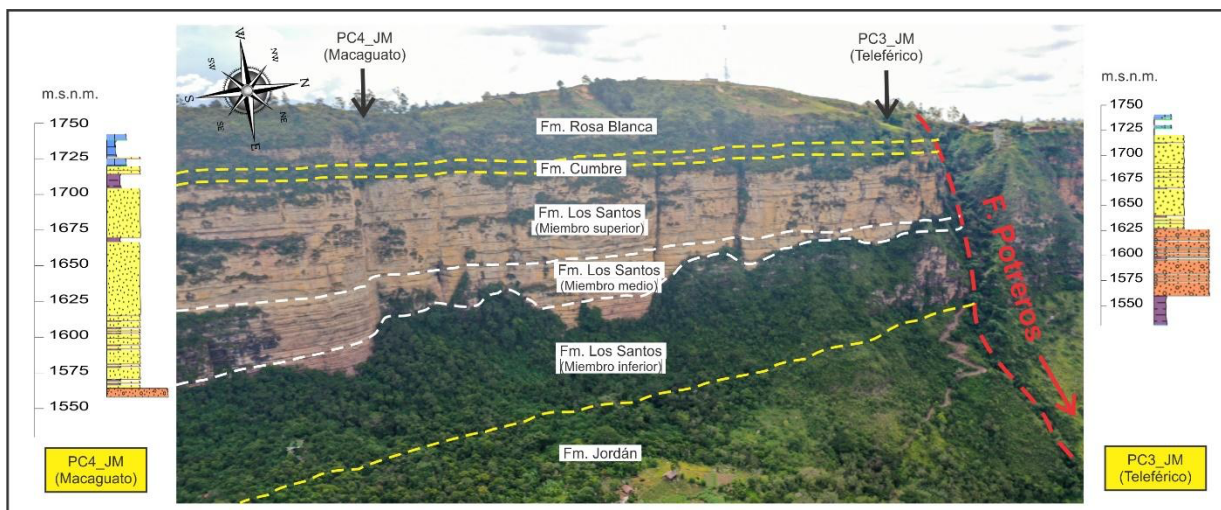
Nota. Se observa contacto entre el miembro superior y medio de la Fm. Los Santos y la Falla El Aljibe.

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

En la pared de la Figura 24, se muestra el segmento interpretado consistente con las columnas realizadas en PC4_JM (Macaguato) y el PC3_JM (Teleférico). En esta sección, la Formación Jordán está en contacto discordante con la Formación Los Santos. Nótese que el miembro inferior está en contacto erosivo con el miembro medio, lo que hace que éste tenga notables variaciones en su espesor. En esta panorámica se resaltó la Falla Potrereros de componente normal dextral con vergencia hacia el norte.

Figura 24

Panorámica del escarpe PC3_JM (Teleférico) y PC4_JM (Macaguato).



Nota. Se observa la sucesión desde las rocas del Jurásico de la Formación Jordán hasta la Formación Rosa Blanca del Cretácico.

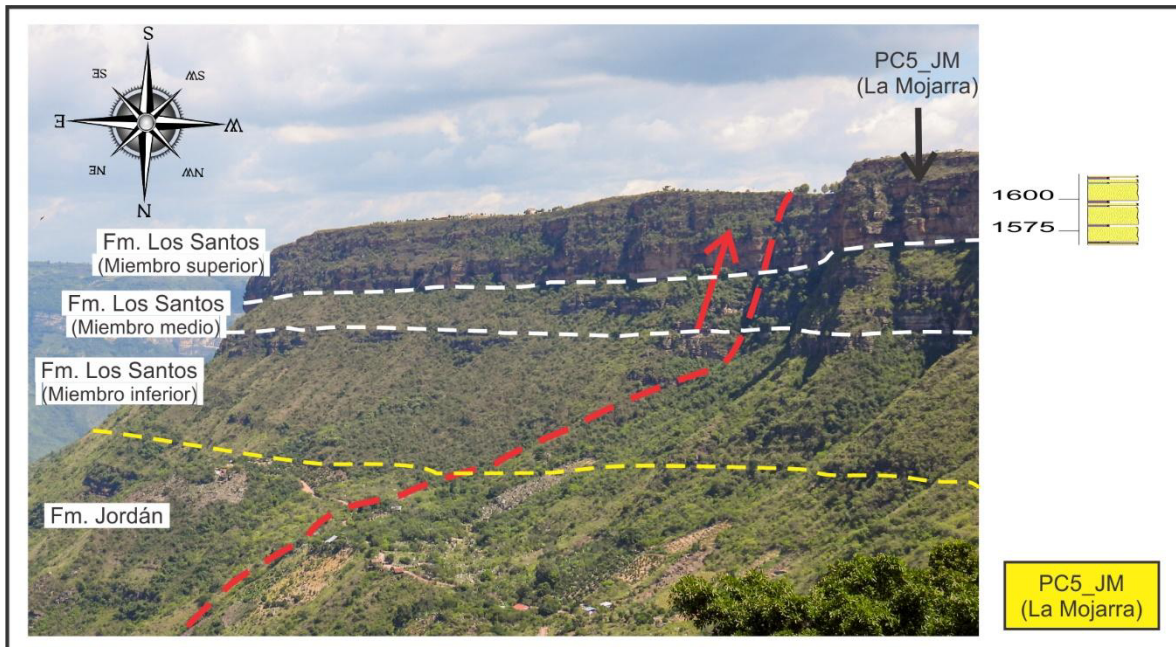
El sitio PC5_JM (La Mojarra) se observa en la vista panorámica de la vereda la Mojarra (Figura 25). En esta sección las areniscas del miembro superior de la Formación Los Santos se presenta parcialmente y no se encuentra el techo de la unidad, sin embargo, en el

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

lugar es posible encontrar la base de la Formación Los Santos en contacto con la Formación Jordán. Se resalta el trazo de una falla inversa con vergencia al suroriente.

Figura 25

Vereda la Mojarra, el levantamiento PC5_JM (La Mojarra)



Nota. En esta sección se registró la altitud del contacto del Miembro medio con el Miembro superior de la Formación Los Santos.

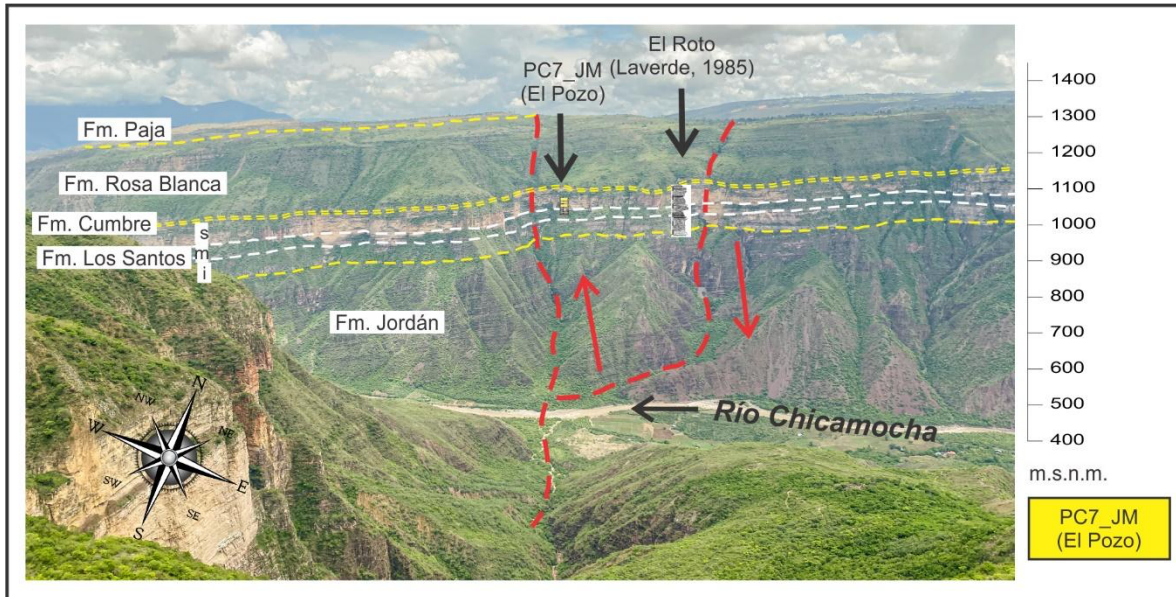
En el Cañón del río Chicamocha es posible observar la discordancia angular entre la Formación Jordán y la Formación Los Santos desde el observatorio de la Figura 26, desde este punto se puede reconocer “el camino del roto” donde se registra la sección tipo de la Formación Los Santos levantada por Laverde (1985), junto al punto de control PC7_JM (El Pozo) que se registra en la vereda del mismo nombre y que fue de gran utilidad para encontrar

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

la altitud a la que se encuentra la Formación en este punto. En la imagen se marca el trazo de las fallas en la zona del escarpe.

Figura 26

Panorámica al sur de la MLS

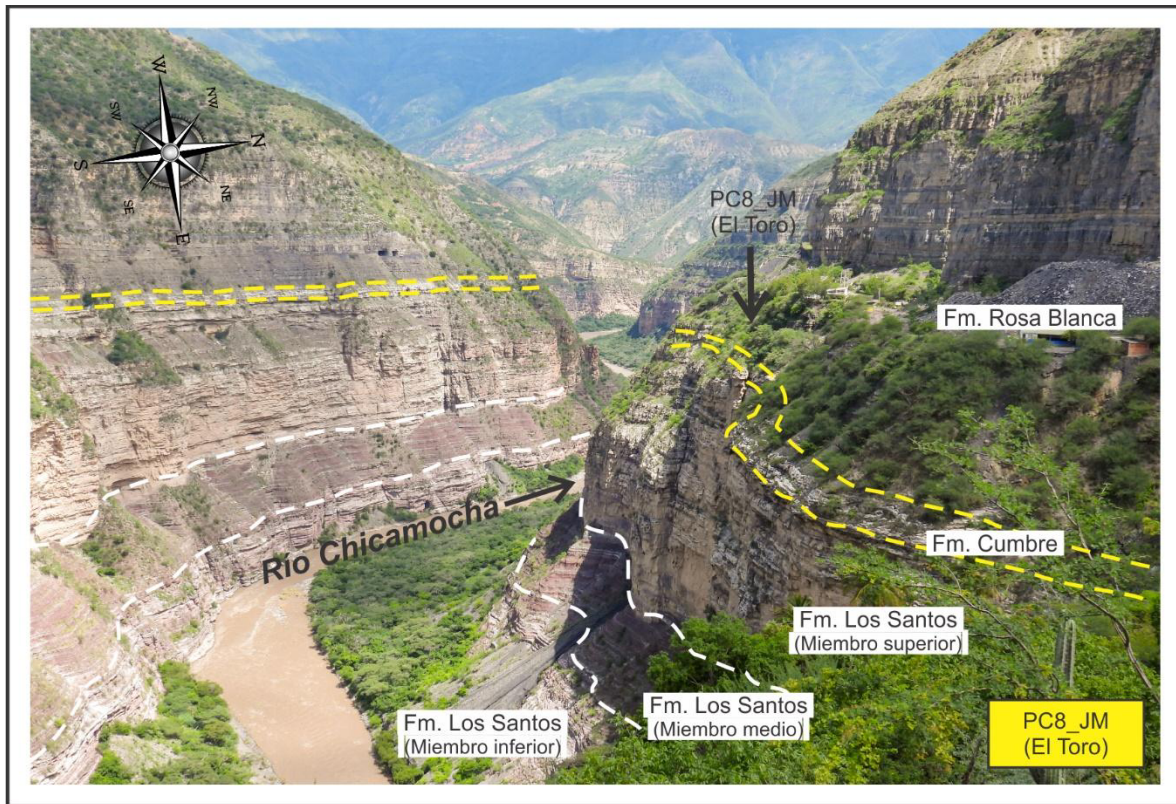


Nota. Esta fotografía fue capturada desde el alto de Marta en el camino de Lenguerke que conduce desde el municipio de Jordán al municipio de Villa Nueva muestra un amplio panorama de la vertiente sur de la MLS.

En PC8_JM (El Toro) (Figura 27) se reconoce el techo de la Formación los Santos, pero no se encuentra aflorando la infrayacente Formación Jordán debido a la inclinación que presentan los estratos al sur occidente de la MLS.

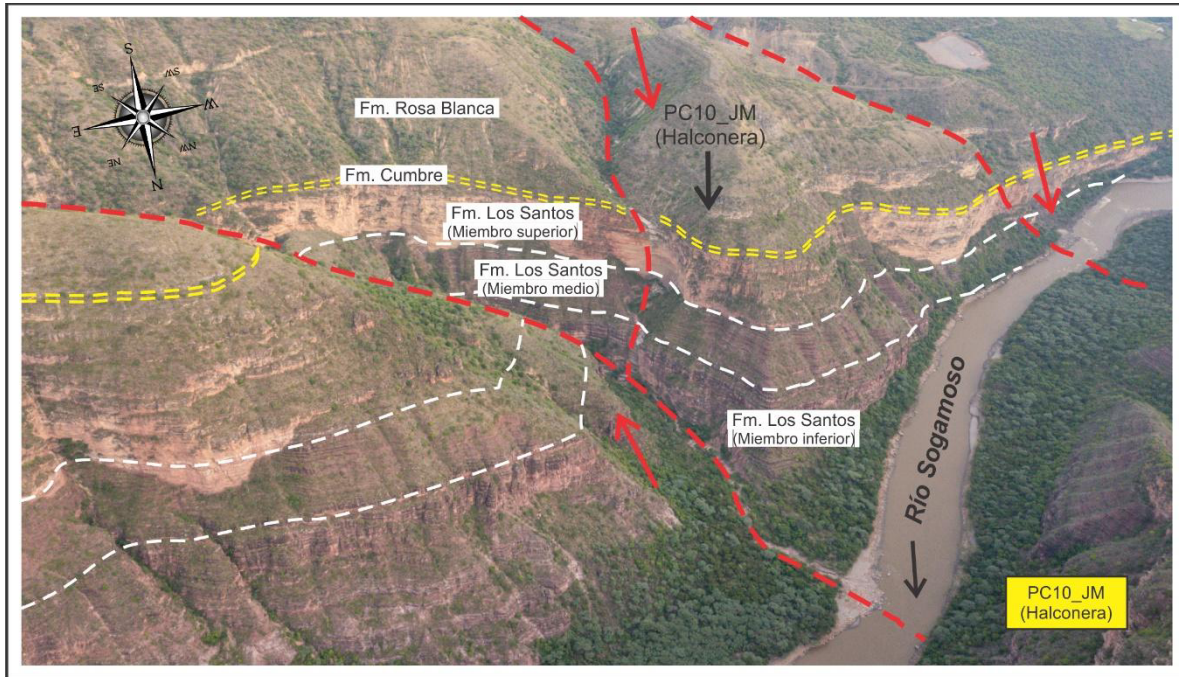
Figura 27

Panorámica del Cañón del río Chicamocha a la altura de la mina “El Toro”



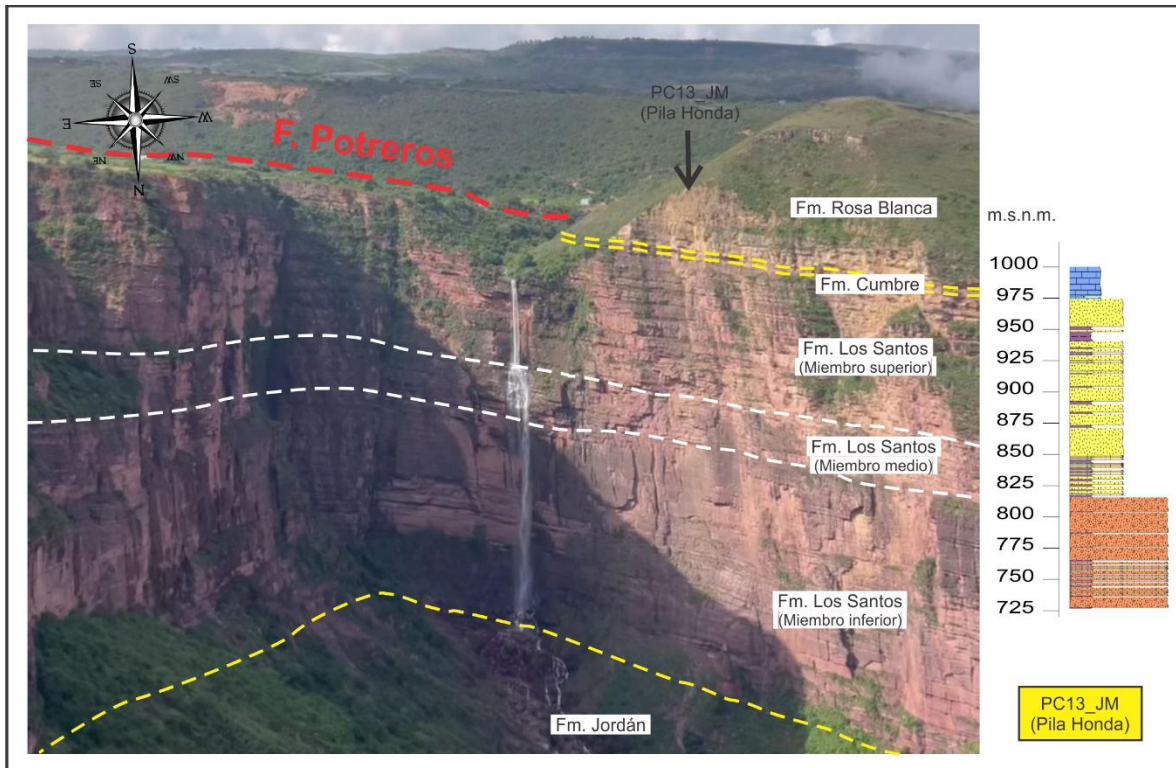
Nota. En la parte izquierda de la imagen corresponde a las cuevas del municipio de Villa Nueva y la parte izquierda corresponde al municipio de Los Santos.

En el modelo obtenido hacia el Cañón del río Sogamoso (Figura 28) no se observa en superficie el contacto con la Formación Jordán debido a la inclinación que presentan los estratos hacia el sur occidente de la MLS, sin embargo, se cuenta con un amplio registro de la Formación Rosa Blanca. Se identifican las principales fallas del lugar.

Figura 28*Panorámica PC10_JM (Halconera)*

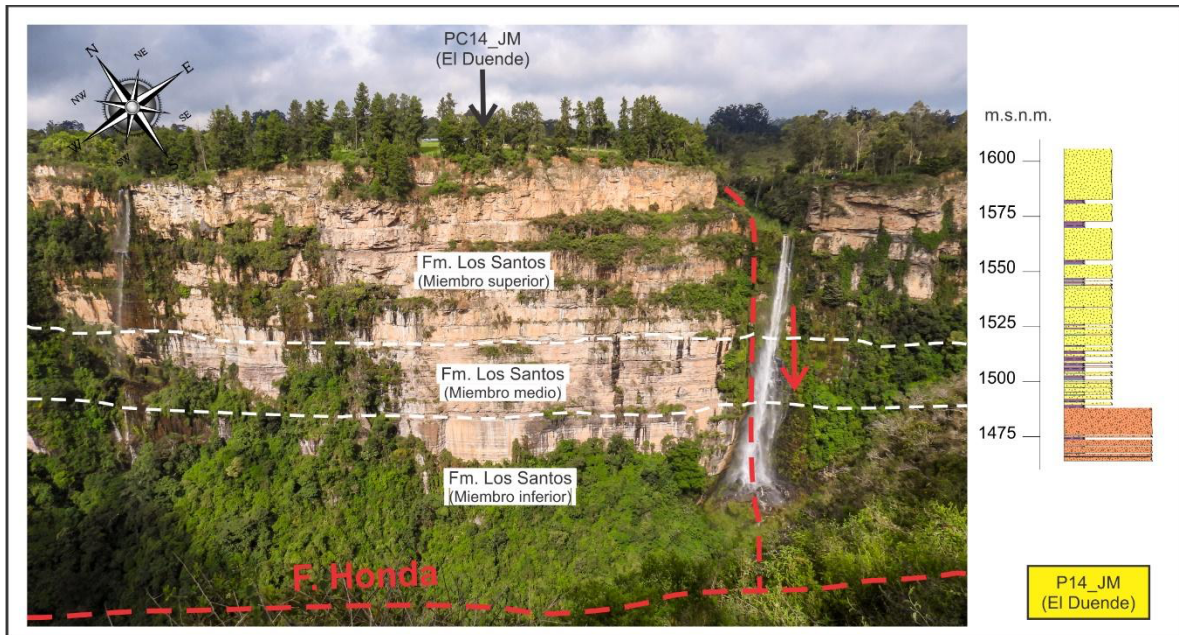
Nota. Panorámica en el cañón del río Sogamoso interpretada acorde al registro de la columna del PC10_JM (Halconera).

La sección PC13_JM (Pila Honda) (Figura 29) cuenta con el registro más amplio de la Formación Los Santos al occidente de la MLS, con más de 250 m de espesor. En este lugar si es posible identificar la sucesión desde la Formación Jordán hasta la Formación Rosa Blanca, se resalta la Falla Potrerillos de componente normal dextral y vergencia hacia el norte.

Figura 29*PC13_JM (Pila Honda).*

Nota. En la imagen se observa la cascada Pila Honda desde donde se realizaron los vuelos no tripulados para el registro del PC13_JM (Pila Honda).

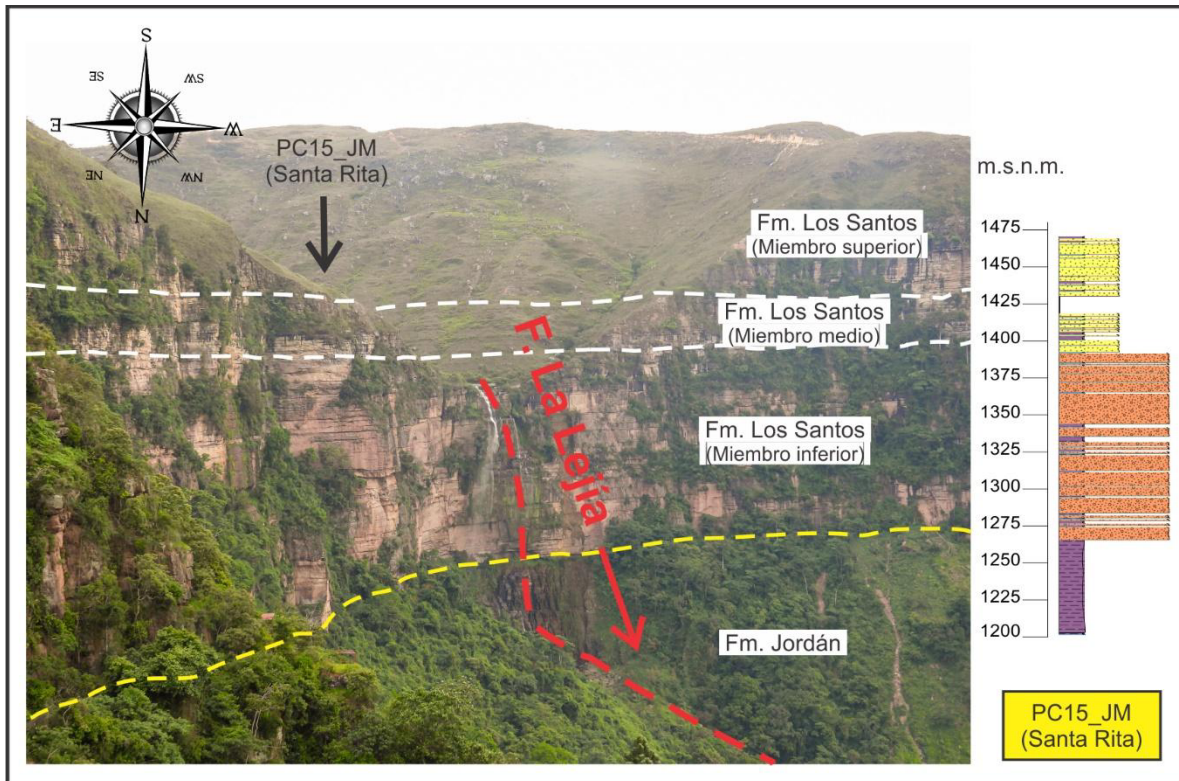
En PC14_JM (El Duende) (Figura 30) en el lugar conocido como el salto del Duende, se cuenta con el registro parcial de la Formación Los Santos sin registrar contactos con otra formación en el esquema de la columna estratigráfica. Se resalta la Falla Honda corresponde a una falla normal sínistral con vergencia hacia el norte.

Figura 30*Panorámica PC14_JM (El Duende).*

Nota. En la imagen panorámica se observa la cascada del salto del Duende, en el lugar se realiza la interpretación de acuerdo al registro del PC14_JM (El Duende).

En la sección PC15_JM (Santa Rita) (Figura 31) se cuenta con un registro completo del miembro inferior de la Formación Los Santos, con alrededor de 126 m de espesor. Además,

se registra el contacto discordante angular con la Formación Jordán. Se resalta la Falla La Lejía como normal sínestral con vergencia hacia el sur.

Figura 31*Panorámica PC15_JM (Santa Rita)*

Nota. Panorámica de la cascada Santa Rita guiada por la Falla La Lejía.

Registro del PC15_JM (Santa Rita)

A partir de los 15 esquemas estratigráficos y considerando el modelo estructural de García et al., (2024), así como la geología propuesta por Pinto et al. (2007), se realizaron seis cortes geológicos – esquemáticos, señalados en planta en la Figura 22. Esta correlación permite una mejor comprensión de los cambios laterales de espesor que presentan las unidades y la influencia de las fallas en cada bloque estructural. (Figura 32, 33).

El Corte 1 (C1-C1') que va desde el PC7_JM (El Pozo) hasta PC2_JM (La Pradera) contando con control de altitudes en PC5_JM (La Mojarra), PC4_JM (Macaguato) y PC3_JM (Teleférico), tiene una orientación N 45° E y corta perpendicularmente las Fallas Los Santos,

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

La Mojarra Las Calaveras, Potreros y Aljibe. Se observa que La Falla Los Santos es inversa sinistral con vergencia hacia el noreste y su desplazamiento marca claramente una discontinuidad de los estratos. Al suroeste de la Falla Los Santos se encuentra presente gran parte del espesor de la Formación Rosa Blanca presente en superficie, mientras que al noreste de la falla predomina en superficie el miembro superior de la Formación Los Santos con escasa presencia de las rocas calcáreas de la Formación Rosa Blanca. Otra discontinuidad de los estratos se presenta en la zona de la Falla La Mojarra y en la que aflora la Formación Jordá debido a la erosión (Figura 32).

El Corte 2 (C2-C2') inicia en PC8_JM (El Toro) y va hasta el PC3_JM (Teleférico) cuenta con una orientación N 63° E y corta perpendicular y oblicuo a la Falla Zanjón La Vega y de forma perpendicular a las Fallas La Chivatera, Los Santos, La Mojarra, Las Calaveras y Potreros. Al igual que en el corte anterior, se evidencia como la Falla Los Santos genera la discontinuidad de los estratos. En este perfil es notable que el espesor de la formación Los Santos aumenta hacia el suroeste de la MLS (Figura 32). Esto se puede comprobar con la medida de los espesores en la Tabla 4 ya que ambos puntos de control cuentan con un registro de base a techo de los miembros medio y superior. Este corte se traza por un sector al norte de la Falla Paso Grande donde aflora la Formación Paja, es decir que se cuenta en el perfil con los más de 300 m de espesor de la Formación Rosa Blanca interpretados en una panorámica hacia la MLS por Etayo et al., (2019).

El Corte 3 (C3-C3') con una dirección N 85° E, va de oeste a este desde el PC11_JM (Halconera) hasta PC3_JM (Teleférico) cortando de forma oblicua a la Falla Paso Grande y perpendicular oblicua a las Fallas La Mojarra, Las Calaveras y Potreros. Al igual que en los cortes anteriores es notable la discontinuidad de los estratos debido a la Falla Los Santos y

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

se observa como los dominios de las pendientes de los estratos son diferentes al noreste o al suroeste de la Falla La Mojarra (Figura 32). La Formación Los Santos presenta un adelgazamiento hacia el este sustentado en los datos de las tablas 3 y 4.

El Corte 4 (C4-C4') en dirección S 72° E, inicia en PC13_JM (Pila Honda) y termina igualmente en PC3_JM (Teleférico) cortando oblicuamente las Fallas La Mojarra, Las Calaveras y Potreros. En este perfil es donde mejor se aprecia el adelgazamiento de la Formación Los Santos hacia el este de la MLS. También es posible observar cómo se pronuncia la inclinación de los estratos al suroeste de la Falla La Mojarra. La Formación Jordán es parcialmente registrada en PC3_JM (Teleférico) y cartografiada en los mapas geológicos disponibles en la zona entre la Falla La Mojarra y Falla Las Calaveras, y así mismo reconocida en las jornadas de campo en el desarrollo de este proyecto (Figura 33).

El Corte 5 (C5-C5') en dirección S 22° E, comienza en PC15_JM (Santa Rita), con un control de altitudes en PC14_JM (El Duende) y llega hasta PC3_JM (Teleférico). Corta oblicuamente a la Fallas Honda, El Aljibe y Potreros. En este registro es ideal tener como referencia el contacto discordante entre la base de la Formación Los Santos con la Formación Jordán pues este fue registrado en los MDA de PC15_JM (Santa Rita) y PC3_JM (Teleférico). Debido a que la inclinación de las capas es menor y se mantiene constante, en este perfil las unidades sedimentarias presentan una mejor continuidad restringida en secciones por el desplazamiento y los saltos de las fallas (Figura 33).

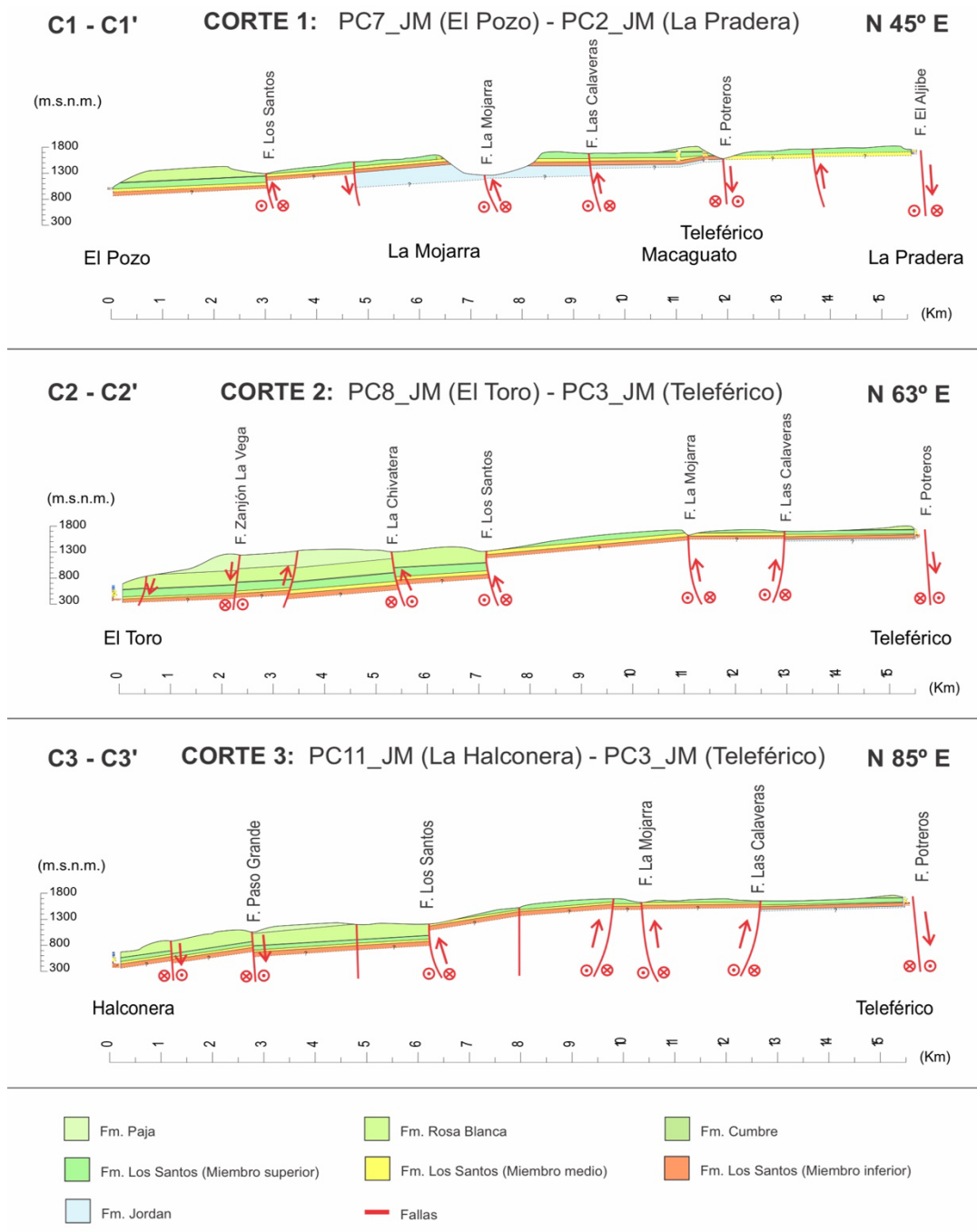
El Corte 6 (C6-C6'), perpendicular al corte anterior, se encuentra en dirección N 60° E, va desde PC13_JM (Pila Honda), pasando por el PC14_JM (El Duende) hasta el PC1_JM (La Punta). Corta perpendicularmente a las Fallas Aljibe, Honda y La Lejía. Este perfil permite observar un mayor espesor de la Formación Los Santos en el suroeste y un

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

adelgazamiento de la formación al noreste de la MLS. La Formación Jordán se identificó en los alrededores de la Falla el Aljibe durante las jornadas de campo (Figura 33).

Figura 32

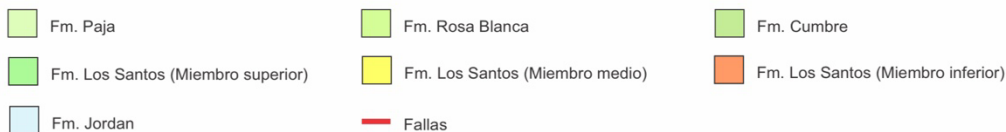
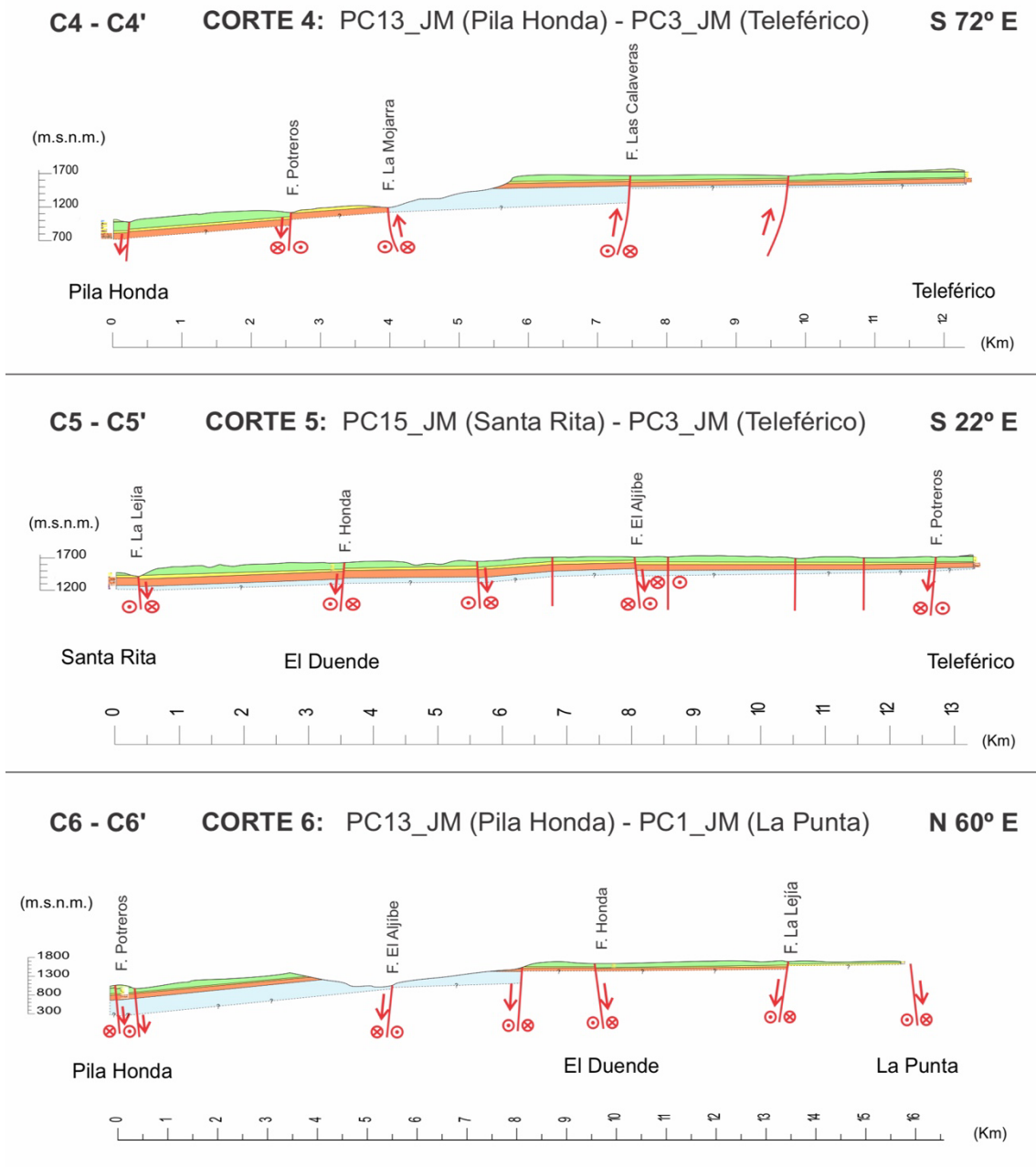
Cortes geológicos esquemáticos de la MLS.. Corte 1, Corte 2, Corte 3



CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

Figura 33

Cortes geológicos esquemáticos de la MLS. Corte 4, Corte 5, Corte 6.



6.4 Familias de Diaclasas

Tras realizar los análisis de los principales grupos de diaclasas en los nueve MDA generados, se identificaron sus principales familias. En la Figura 34 se muestran los rumbos de los planos de diaclasas y las orientaciones de las principales fallas del área de estudio. Estos planos de diaclasas pueden ser interpretados con mayor facilidad en el diagrama de polos y su densidad según la escala de colores que se muestra junto a los diagramas rosa generado en cada MDA analizado (Figura 34).

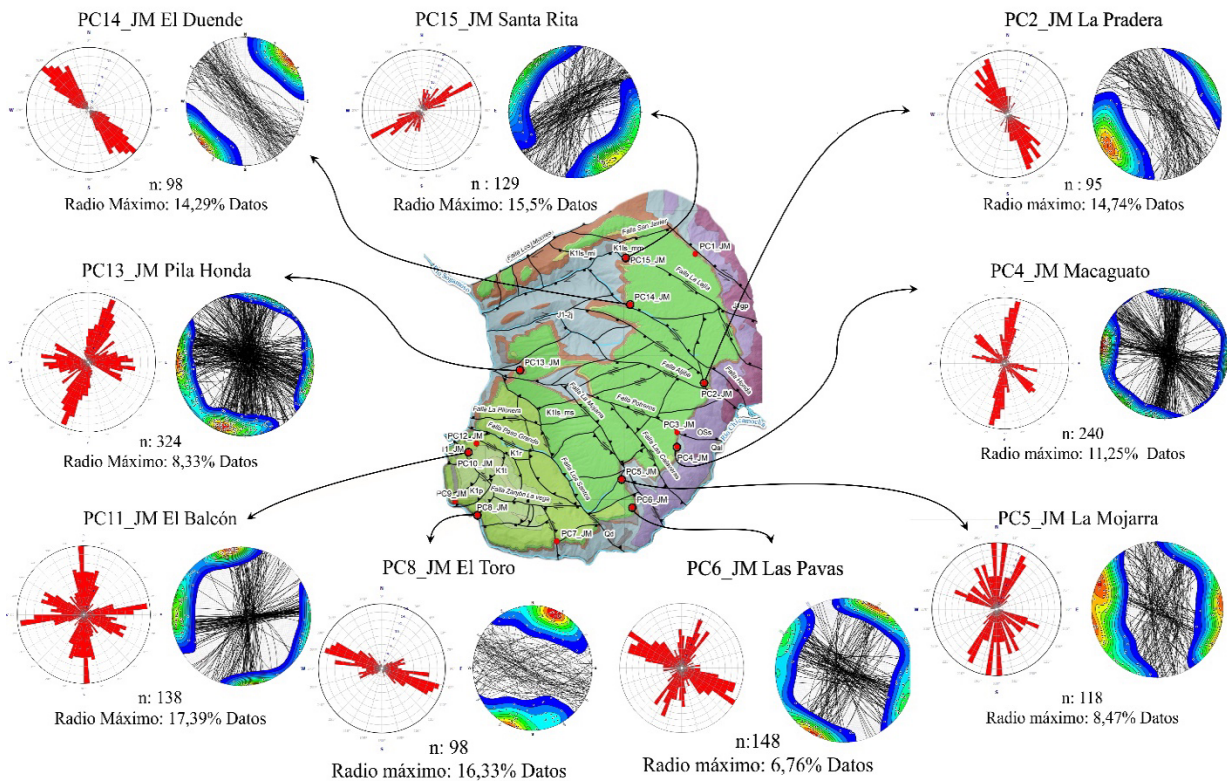
- Orientación NO-SE: se observa en los puntos PC4_JM, PC5_JM, PC6_JM, PC7_JM, PC13_JM y PC14_JM. Esta orientación se establece como la principal familia de diaclasas y presenta el mayor número de estructuras asociadas que corresponden a las fallas Potreros, El aljibe, Honda, y La Lejía.

- Orientación SSO-NNE: se observa en los puntos PC4_JM, PC5_JM, PC6_JM y PC11_JM. Esta orientación se presenta en menor magnitud que la anterior, siendo la segunda familia de diaclasas medidas en la investigación, poseen un comportamiento casi perpendicular a las fallas Potreros y Aljibe.

En los afloramientos PC2_JM, PC8_JM, PC14_JM se puede observar una sola orientación preferencial en cada MDA. La orientación de PC2_JM con un rumbo N20°O se asocia a la Falla el Aljibe que presenta. PC8_JM posee una orientación cercana a N80°O paralela a la Falla Zanjón La Vega y para el punto PC14_JM, el cual está ubicado sobre la trayectoria de la falla Honda, se percibe un leve cambio de orientación más al norte con dirección hacia su cierre con la falla San Javier.

Figura 34

Diagrama de rosas y proyección respectiva de sus azimuth y polos en cada MDA analizado.



Nota. Conjuntos de datos compuesta por un diagrama de rosas de diaclasas medidos en MDA, se indican cada número de datos y se realiza la proyección de sus respectivos azimuths en sus diagramas de polos indicando densidad de acumulación de estos.

6.5 Intensidad y densidad de patrones de fractura

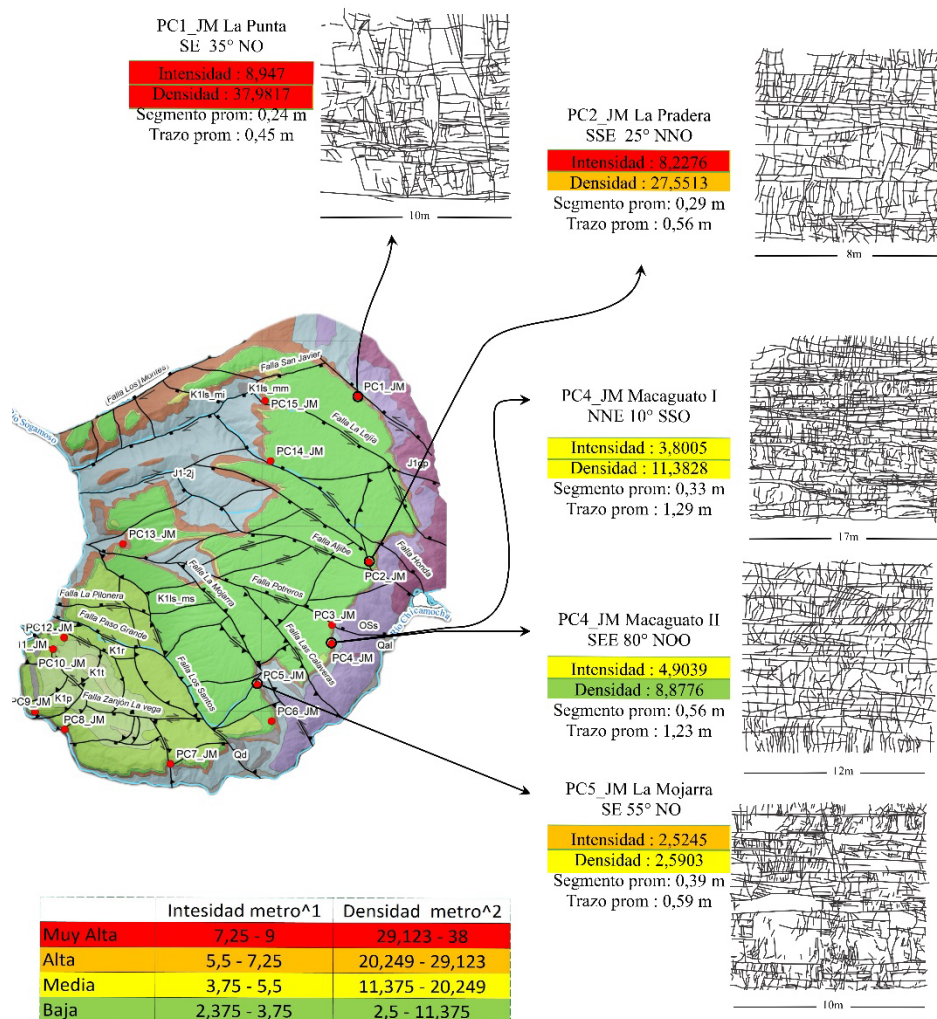
En los escarpes de los miembros de la Formación Los Santos, la longitud de los trazos y segmentos se configura de manera directamente proporcional a los valores de intensidad y densidad (Figura 35 y Figura 36). Cuando los valores de intensidad y densidad son bajos, los

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

segmentos pueden tener una longitud de alrededor de 1 m y los trazos de 2 m, pero al mantener un nivel de densidad media con alta intensidad, la longitud de los segmentos se acorta en cerca de un 50 %. Además, según la distribución espacial de los afloramientos se puede evidenciar que los volúmenes de rocas más fracturadas según su intensidad y densidad están cerca a los planos de fallas (zonas de daño), mientras que las rocas que registran menos facturación son las que se ubican lejos de las fallas.

Figura 42

Intensidad y Densidad de las ventanas de muestreo ubicadas al Este de LMS



CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

Nota. En esta figura se miden la Intensidad y Densidad de patrones de fractura en ventanas de muestreo de los PC1_JM, PC2_JM, PC4_JM I, PC4_JM II y PC5_JM. PC4_JM posee dos ventanas de muestreo con direcciones ortogonales, también indican la tabla de utilizada para categorizar las áreas medidas.

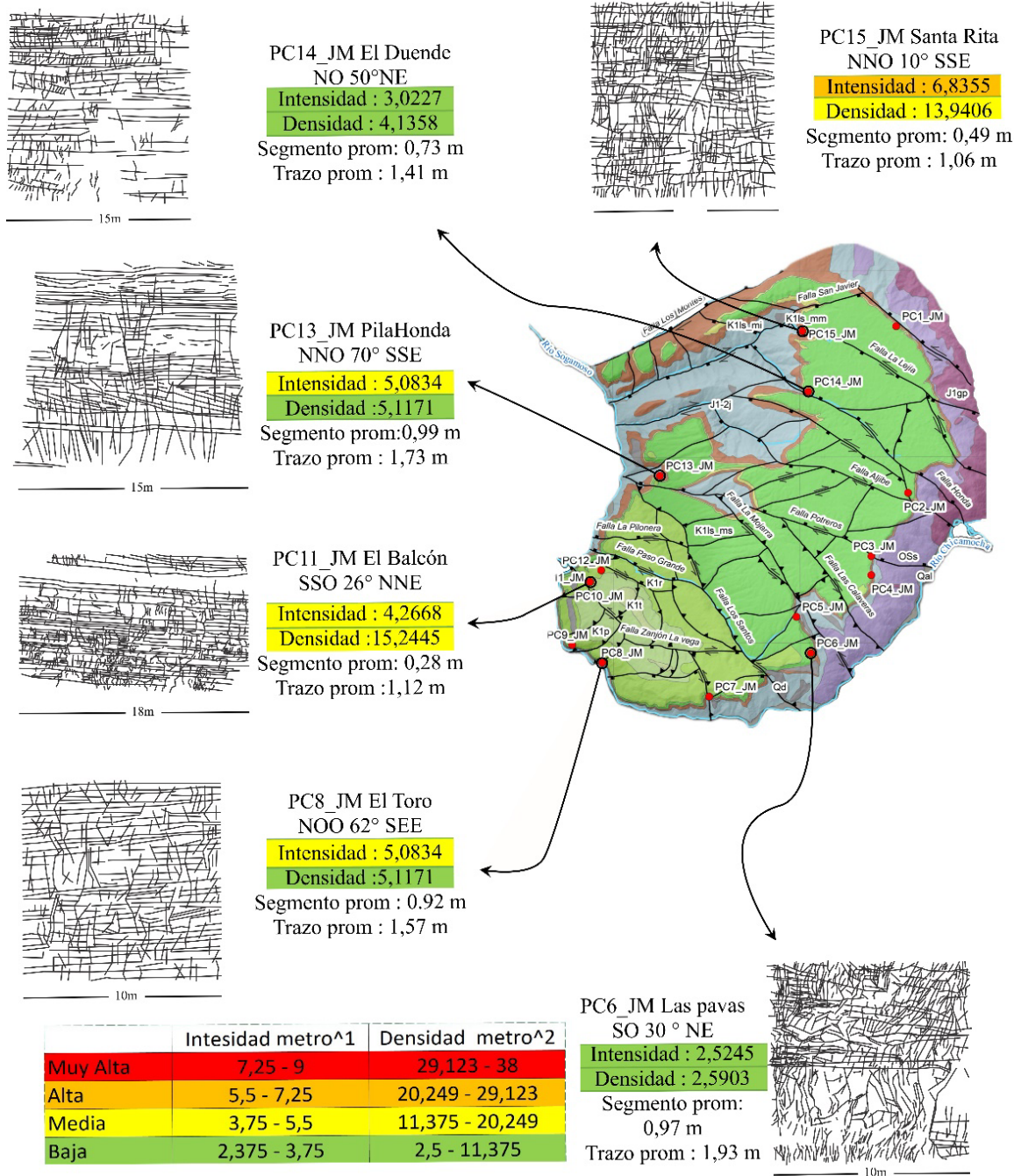
De esta manera los puntos de control PC1_JM La Punta, PC2_ La Pradera y PC15_ Santa Rita son los puntos con mayor intensidad con valores desde $6,8255 m^{-1}$, hasta $8,947 m^{-1}$ y densidad de fracturas registradas $13,9506 m^{-2}$ hasta $37,9817 m^{-2}$ en los afloramientos del miembro superior de la Fm. Los Santos y en contraposición los puntos PC13_JM El Duende, PC6_ Las Pavas y PC5_JM La Mojarra son los puntos de control con menor intensidad en valores de $2,5245 m^{-1}$, hasta $3,0227 m^{-1}$ y densidad de $2,5903 m^{-2}$ hasta $4,1358 m^{-2}$ registrados las ventanas de nuestros y escala de las fracturas trazadas.

Según la intensidad y densidad de las facturas medidas en los MDA se sugiere que las zonas menos accidentadas de la mesa están ubicadas en los puntos PC4_JM Macaguato, PC5_JM La Mojarra y PC6_JM Las Pavas y en contraposición PC1_JM La Punta, PC2_JM La Pradera y PC15_JM Santa Rita, que poseen los patrones de fracturas con mayor intensidad y densidad de fracturas, seguramente relacionado a su cercanía con las zonas de fallas.

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

Figura 43

Intensidad y densidad de ventanas de muestreo ubicadas al Oeste de LMS



Nota. Intensidad y Densidad medida de los PC6_JM, PC8_JM, PC11_JM, PC13_JM, ubicadas en el flanco occidental de LMS

6.6 Conectividad y Permeabilidad

A partir de la Conexión de Línea (CL) obtenidas en los triángulos de conectividad de las Figura 37 y Figura 38 se pueden identificar en la zona oriental de la MLS los escarpes con menos conectividad al poseer valores CL entre {2} y {3,5}, los cuales expresan una conectividad moderada. Esto indica que las fracturas suelen unirse, es decir que una fractura continua donde finaliza otra, en lugar de conectarse. En contraposición, la zona oeste del área de estudio presenta valores de CL= {3.5} en los triángulos, esto permite definir a esta zona como el área con mayor conectividad dentro del miembro superior de la Fm. Los Santos, donde el comportamiento de las fracturas tiende a unirse y construir una mayor integración de la porosidad secundaria.

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

la MLS.

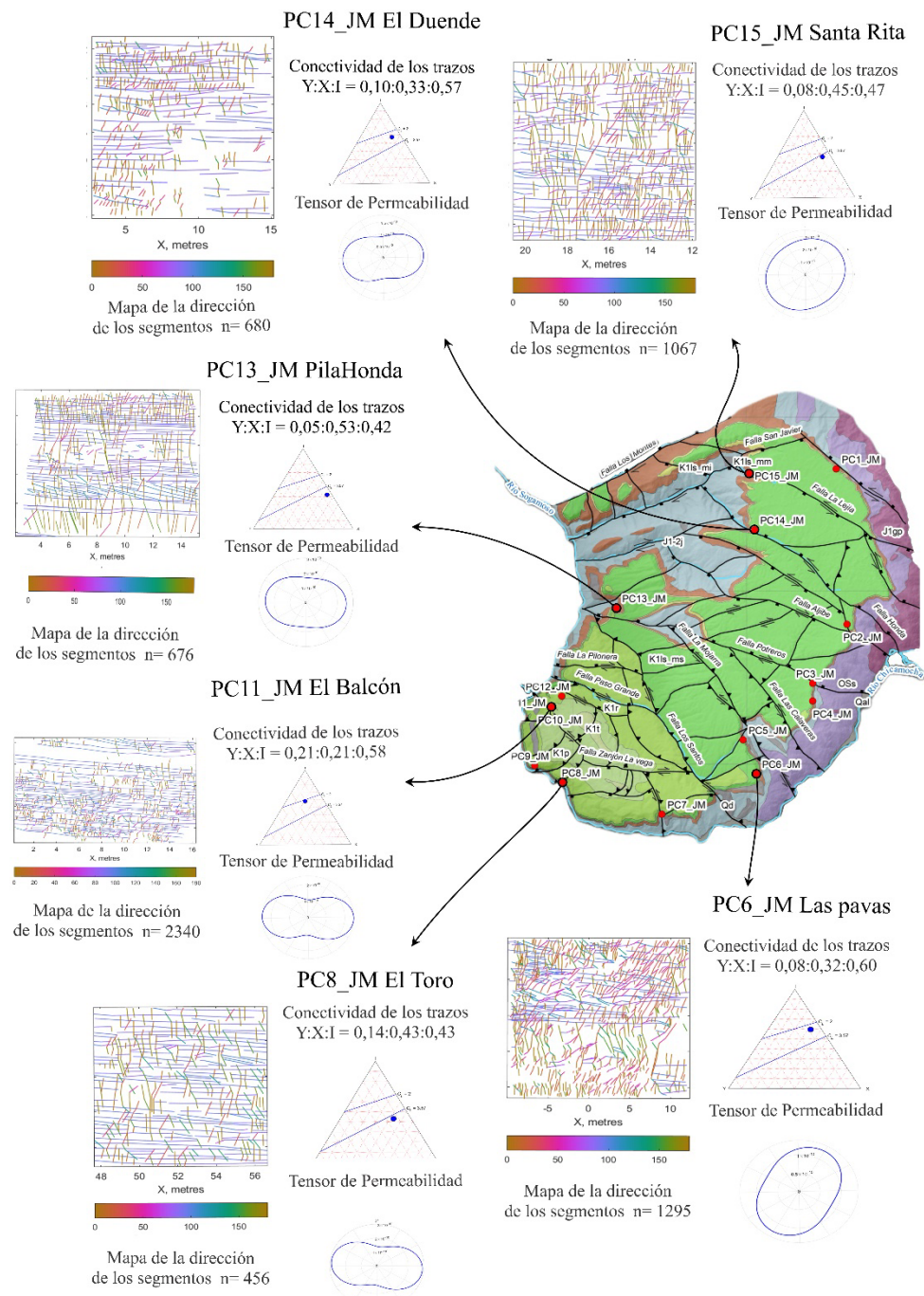
De manera general los tensores de permeabilidad medidos en las ventanas de muestreo indican que predomina una dispersión de los fluidos de manera sub horizontal debido a los planos de estratificación de la roca. Puntualmente, los diagramas de flujo que poseen direcciones verticales se registran en las zonas sur sobre los puntos PC8_JM y PC6_JM, y en la zona norte sobre los puntos PC1_JM y PC15_JM, indicando una mayor infiltración que sigue los patrones de fracturas como se aparecía en las Figuras 37 y 38. En los puntos PC4_JM, PC11_JM, PC 13_JM y PC14_JM al este y oeste de la MLS predomina una serie de discontinuidades horizontales sin una componente vertical marcada y en el caso del PC2_JM el sistema de fractura no posee una orientación definida por lo cual sugiere un sistema de flujo anisotrópico en esta región de la Mesa de Los Santos.

Debido a que las mediciones de los patrones de fractura se realizaron en diferentes azimuts para los MDA los resultados de conectividad y permeabilidad de las mediciones de azimuts ortogonales el PC4_JM Macaguato, evidencian como los patrones de fractura están asociados en las direcciones de los planos de diaclasas. En el caso del azimut SE 80° NO, el cual presenta valores de conectividad de línea cercano de 3,5 CL y su tensor de permeabilidad tiene una mayor orientación vertical. Ortogonal a este azimut se encuentra la segunda dirección preferencial NE 10° SO, con un valor de conectividad de línea cercano a 2 y su tensor de permeabilidad presenta un comportamiento anisotrópico de las fracturas. Es por esto por lo que se sugiere como las direcciones donde podría haber un mayor fracturamiento será a través de las zonas de daño de fallas con orientación NE-SO.

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

Figura 48

Conectividad y Permeabilidad de ventanas de muestreo ubicadas al Oeste de LMS



Nota. ventanas de muestreo PC6_JM, PC8_JM, PC11_JM, PC13_JM, ubicadas en el flanco Oeste de la MLS.

7. Discusión

A continuación, se realiza la discusión de los resultados presentados dividiendo los temas para comparar el rendimiento de los dispositivos utilizados, la nomenclatura de la estratigrafía usada y geología estructural a partir de los resultados de investigaciones anteriores.

7.1 Dispositivos UAV Utilizados

Se realizó una comparación en el escarpe denominado “La Mojarra” con levantamientos fotogramétricos usando 3 UAV para establecer las diferencias y la veracidad de los MDA generados a partir de cada vehículo. Como se aprecia en la Tabla 5, algunas características técnicas de los UAV pueden ser muy similares, hay componentes de hardware que favorecen y permiten el procesamiento con algoritmos que aumentan la precisión de los modelos construidos.

Al realizar los tres procesamientos, se observaron algunas variaciones en los resultados obtenidos. Cabe mencionar que para esta comparación se usó la misma estación de trabajo para garantizar el mismo hardware durante el procesamiento. En cuanto a las fotografías utilizadas como insumo base de este proceso, se notaron diferencias en cada UAV desde la captura debido al área que puede cubrir cada sensor, es por ello que en la Tabla 5 muestran al Mavic 2 pro como el UAV que brinda resultados óptimos según el número de fotografías y los tiempos de procesamiento requeridos.

Se descartó realizar mediciones de componentes estructurales con el Mavic 2 Mini debido a que solo ejecuto operado MVS (Multi View Stereo), el cual solo logra componer

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

un objeto 3D con una orientación de baja confiabilidad, pero con una escala definida, lo necesario para hacer un reconocimiento estratigráfico y litológico para la construcción de columnas estratigráficas. Con el Mavic Air 2 si se ejecutó procesamiento con operadores MVS y SFM (Structure From Motion), es decir el objeto 3D estaba orientado en las coordenadas (X, Y), pero se reconoció que la altitud del modelo (Z) entraba en conflicto con la altitud del punto de despegue del UAV desplazando la altitud de los MDA, lo cual fue corregido para el análisis de la información estructural y estratigráfica. Finalmente, se decidió descartar el Mini 2 para la investigación y ejecutar la captura y registro de los afloramientos de esta investigación con el Mavic 2 Pro suministrado por la Escuela de Geología y el Mavic Air 2 suministrado por los tesisistas. Estos ejecutan correctamente los operadores MVS y SFM resultando en MDA de alta confiabilidad y resolución.

Tabla 5.

Comparación de resultados obtenidos tras modelar La Mojarra con los tres UAV.

	Dispositivos UAV comparados		
	Mavic Mini 2	Mavic Air 2	Mavic 2 Pro
Dimensiones y orientaciones del Afloramiento	No genera las dimensiones básicas reales como Longitud, Altura y Ancho del Afloramiento el MDA carece de coordenadas o puntos de referencia espaciales	Genera MDA con dimensiones validas con orientaciones de los puntos y caras orientadas como en la realidad peor posee errores en la altitud de los puntos	Genera MDA con una valides de investigación al reconstruir con precisión la orientación y escala de los afloramientos
Operadores ejecutado	MVS	MVS - SFM	MVS - SFM
N° de fotografías necesarias	120% más de imágenes requeridas	30% + de imágenes	"1:1"
Tiempos de Procesamiento	Muy Alto en comparación de con los demás UAV	En relación tarda los mismos tiempos que el Mavic 2 Pro	"1:1"
Resolución de los MDA	No genera MDA	Genera MDA desplazados en su altitud	Genera MDA de Alta resolución
Posibles usos de los modelos digitales generados	Genera objetos 3D de buena resolución pero no son validos para un Análisis geológico	permite medir características generales de los afloramientos pues sacrifica resolución en algunos detalles debido a la resolución de la cámara	Permite medir propiedades estructurales y estratigráficas confiables de los MDA

En la Tabla 5 se compara el número de fotografías necesarias para desarrollar un MDA. Para el Mavic Mini 2 requiere un aproximado de 120% más de imágenes y el Mavic

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

Air 2 un 30% más de fotografías frente al Mavic 2 Pro. Los tiempos de procesamiento aumentan significativamente con el Mavic Mini 2 por su baja resolución y mayor cantidad de fotografías necesarias para recrear una escena.

7.2 Estratigrafía

Varios autores estudiaron la Formación Los Santos con diferentes enfoques. Según Etayo et al., (2019) esta formación se puede dividir en tres intervalos. El primer intervalo corresponde al Grupo Girón, intervalo arenítico superior, que Laverde (2023) denomina Segmento A, y que en el presente estudio se identifica como el miembro inferior de la Formación Los Santos. El segundo intervalo, descrito por Etayo et al., (2019) como el Grupo Girón, intervalo lodolítico arenítico, es denominado Segmento B por Laverde (2023) y miembro medio de la Formación Los Santos por esta investigación. Finalmente, el tercer intervalo, la Formación Los Santos según Etayo et al., (2019), es clasificado como Segmento C+D por Laverde (2023) y como el miembro superior de la Formación Los Santos según el presente trabajo. La secuencia de la Formación Los Santos se identifica al noroccidente de la MLS. En la Tabla 7 se compara con este trabajo, la nomenclatura usada entre diferentes autores y en la Figura 39 se representa la comparación de la nomenclatura sobre la vista

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

panorámica del mismo sector. La Formación Cumbre se ubica entre el techo de la Formación Los Santos y la base de la Formación Rosa Blanca.

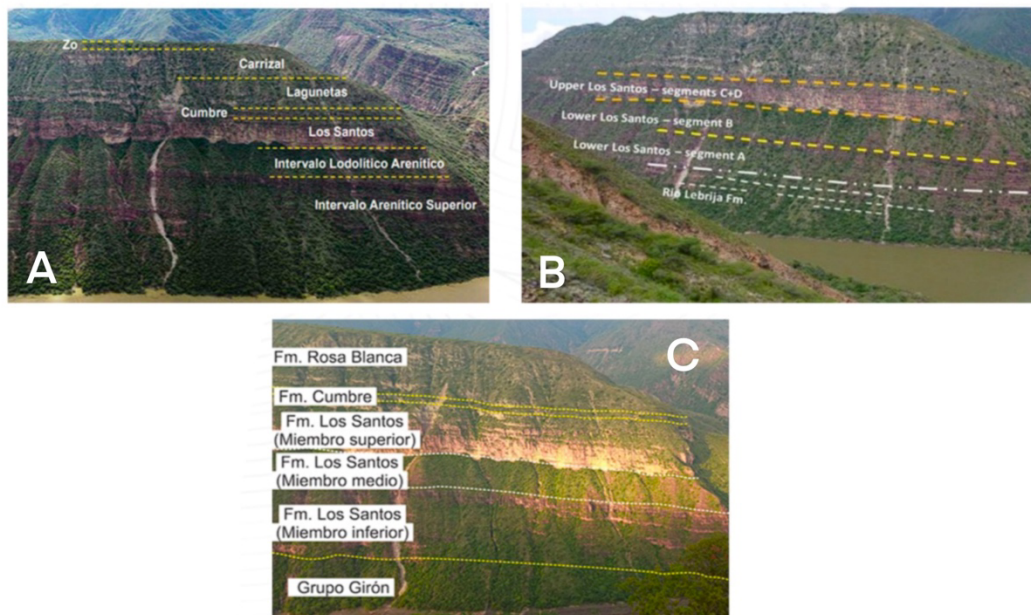
Tabla 7.

Comparación de la nomenclatura usada por diferentes autores

Autor	Etayo et. al., (2019)	Laverde (1985, 2023)	Pinto et. al., (2007)
Localidad	Area del río Sogamoso y Zapatocha	Mesa de Los Santos y Yariguies	Mesa de Los Santos
Formación	Fm. Los Santos	Fm. Los Santos (Segmento C+D)	Fm. Los Santos (Miembro Superior)
	Grupo Girón (Intervalo lodolítico arenítico)	Fm. Los Santos (Segmento B)	Fm. Los Santos (Miembro Medio)
	Grupo Girón (Intervalo arenítico superior)	Fm. Los Santos (Segmento A)	Fm. Los Santos (Miembro inferior)

Figura 49

Comparación de la nomenclatura usada por diferentes autores



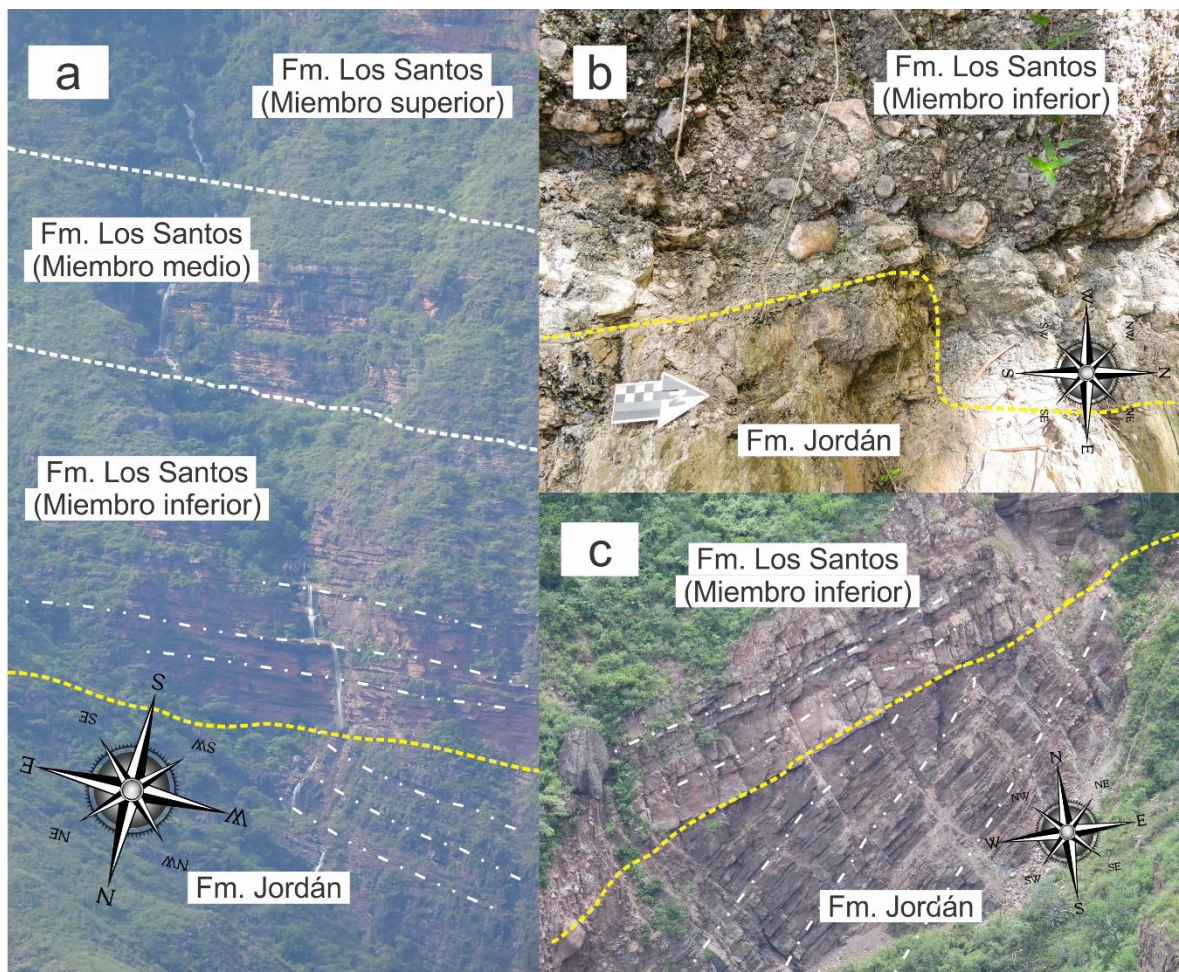
Nota. Sucesión del Jurásico y del Cretácico cerca del cruce de la carretera Girón-Zapatocha con el río Sogamoso descrita por Etayo et al., (2019). b). Interpretación geológica de la misma vista panorámica realizada por Laverde (2023), consistente con la columna estratigráfica realizada en la localidad tipo “El Roto”.

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

Existen múltiples evidencias de la actividad tectónica que se registran en la base de la Formación Los Santos pues al oriente de la Falla del Suarez se desarrolló una discordancia que abarcó la Formación Jordán del Jurásico temprano (Figura 40). Ubicar este elemento fue útil para identificar la base de los estratos de la Formación Los Santos en los diferentes puntos de control alrededor de la MLS.

Figura 50

Contactos en diferentes flancos de la MLS.



Nota. a) La base de la Formación Los Santos al sur de la falla los montes por donde principalmente hacia el este de la falla Suárez se desarrolló una discordancia con las rocas del Jurásico temprano. b). Conglomerados arenosos de la base de la

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

Formación Los Santos en contacto con lodolitas de la Formación Jordán en la vertiente oriental de la MLS en PC3_JM Teleférico. c). Discordancia entre las unidades antes mencionadas, en los alrededores de PC13_Jm Pila Honda en la vertiente occidental de la MLS.

Las 15 columnas construidas a partir de los MDA permitieron la identificación textural de las capas y los seis cortes geológicos esquemáticos, permitieron la identificar los cambios de espesores de las unidades y la influencia de las fallas. Se logran reconocer en su conjunto los dominios deposicionales con características específicas en la Formación Los Santos; zona de los conglomerados intercalados con areniscas y lodolitas en menos proporción (miembro inferior), una zona donde predominan los litoclastos sedimentarios de color rojo de areniscas y lodolitas (miembro medio) y la zona de areniscas y lodolitas intercaladas sin facies de conglomerados significativos (miembro superior), mencionado por Pinto et al., (2007), como el miembro con el mayor potencial hidrogeológico en la MLS.

La secuencia presente en los escarpes sugiere un control estructural en la sedimentación, en la que se observan claras diferencias de los espesores, en donde el registro incluye los contactos de techo y base, así como en los cortes, reflejando un mayor espesor de toda la Formación Los Santos al occidente de la MLS. En PC13_JM (Pila Honda) llega a tener un espesor de más de 250 m, mientras que en PC3_JM (Teleférico) llega hasta los 160 m de espesor total, es decir que presenta un adelgazamiento hacia el este. El miembro inferior es el que mejor representa el engrosamiento de la unidad al occidente de la MLS en los puntos de control anteriormente mencionados, lo cual genera inquietudes sobre la presencia de la Formación Río Lebrija para esta zona. La investigación de Laverde (2023) señala que la cuenca de inmersión occidental con fallas de bloques extensionales, se llenó principalmente

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

con sedimentos provenientes del Macizo de Santander y áreas circundantes mostrando una fuerte correlación entre las respuestas sedimentológicas y las fallas normales. La migración temporal y espacial de estas fallas, con inclinación dominante hacia el oeste, se asocia con el cambio gradual en las facies y el entorno resultante (Laverde, 2023). La importancia de los datos que resultaron de este trabajo está en las posibles implicaciones en la exploración de recursos hídricos al proporcionar elementos de comprensión en zonas con alto potencial hidrogeológico.

7.3 Geología Estructural

7.3.1 Familias de diaclasas con base en información estructural previa

En el área de estudio se han realizado diferentes trabajos enfocados al análisis de la geología estructural. Araque Gómez y Otero Ramírez (2016) proponen un sistema de esfuerzos NE-SO y NO-SE basado en mediciones realizadas sobre la Falla Potreros ubicada en el centro del área de la MLS, con valores $\sigma^1 = 345/14$, $\sigma^2 = 225/64$ y $\sigma^3 = 081/21$ medidos por Vargas Jerez (2008). Araque Gómez y Otero Ramírez (2016) establecen el tensor de esfuerzos general resultante es de $\sigma^1 = 290/09$, $\sigma^2 = 156/78$ y $\sigma^3 = 022/09$. Para la zona sur de la MLS, Tarazona et al., (2021) obtienen una dirección preferencial de N 60 – 80 O de las diaclasas. Por último, García., et al. (2024) recolectando nueva información en campo y con la información anterior simplifican estas direcciones de los tensores de fractura de LMS en NE-SO, NO-SE y N-S. Estas direcciones se ven reflejadas en las orientaciones predominantes de las fallas ubicadas en la zona de estudio. Al comparar estas orientaciones de deformación, las orientaciones de las fallas y las familias de diaclasas

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

medidas en los MDA, se evidencia una correlación con las superficies expuestas por los afloramientos de la presente investigación, así como con las medidas realizadas en las investigaciones previas en la superficie de la MLS.

Al comparar las direcciones de las familias de diaclasas en los puntos de control PC4_JM y PC5_JM, ubicados al este de la zona de estudio, con los puntos de control PC11_JM y PC13_JM al oeste de la MLS se puede evidenciar como las familias de diaclasas giran levemente en sentido antihorario. Esto puede estar relacionado con el componente sinistral de algunas fallas de rumbo que configuran bloques dentro de la MLS.

7.3.2 Intensidad y densidad de los patrones de fractura

Para la comparación de los resultados de intensidad y densidad registrados por Tarazona, et al. (2021) y por García et al. (2024), así como los obtenidos en la presente investigación, es indispensable considerar la escala a la cual se registraron las fracturas en las ventanas de muestreo de cada investigación. Esto porque el área cubierta por cada ventana de muestreo configura la magnitud y valores medibles. Por lo que Tarazona et al., (2021) y en García et al., (2024), poseen márgenes de intensidad de fracturas con valores hasta de $30 m^{-1}$ y densidades de fractura hasta los $1250 m^{-2}$.

En cambio, en esta investigación, las ventanas de muestreo cubrieron áreas más extensas aproximadamente $100 m^2$ por ventana de muestreo, lo que llevo a una disminución significativa en los valores cuantificables debido al número de fracturas identificadas a esta escala. No obstante, estas fracturas poseen trazos muchos más extensos que disminuyen la intensidad y densidad.

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

Los valores de intensidad y densidad se pueden relacionar dentro de las investigaciones debido a la proporcionalidad de la clasificación de las fracturas que se realiza sobre los resultados obtenidos en las investigaciones anteriores. Esto sugiere que, a pesar de las diferencias en la escala de muestreo, es posible evaluar las propiedades de las fracturas de manera cualitativa y cuantitativa, reflejando la relación entre la intensidad y densidad de fractura en cada situación de análisis.

8. Conclusiones

A partir de las comparaciones realizadas de los UAV comerciales en la elaboración de MDA se recomienda el uso de las versiones Mini para construir Objetos 3D que solo se requieran para el análisis de aspectos visuales. Los dispositivos Mavic Air permiten la generación de MDA donde solo se requieren realizar un ajuste de la altitud de acuerdo con la altura de despegue. El Mavic 2 Pro permite generar MDA precisos con dimensiones correspondientes a las superficies capturadas y una vez procesados se pueden realizar mediciones espaciales de propiedades estructurales y estratigráficas confiables. Se sugiere el uso de esta herramienta desde etapas de exploración hasta su uso para medir y capturar características más complejas de rocas o sistema a analizar.

El uso de MDA permite una identificación remota de las texturas de las capas cuando es acompañada de una guía de campo de referencia. Además, permite la medición indirecta de los estratos de afloramientos de difícil acceso. Esto facilitó el reconocimiento de distintos dominios deposicionales dentro de la Formación Los Santos, con características específicas en cada uno.

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

Las columnas estratigráficas y los cortes geológicos esquemáticos proporcionaron una representación visual de los bloques y permitieron una comprensión de la distribución y variación en los espesores de las unidades litológicas en el área de estudio. Los resultados se ajustan con la propuesta de Laverde (2023) en la que la Formación Los Santos tiene un mayor espesor al occidente de la MLS. Se observa un claro control estructural en la sedimentación.

Respecto a los planos de diaclasas medidos en los MDA, se identificó una orientación N-S en cinco de los nueve modelos. Estas orientaciones solo estaban registradas previamente en el sector sur. Los vectores de deformación medidos anteriormente en la zona de estudio poseen orientaciones cercanas a las NO-SE, N – S y NE – SO, se relacionan respaldando las orientaciones de las familias de diaclasas N-S registradas en la presente investigación en los bloques centro y norte de la MLS.

La conectividad de las fracturas prioriza la migración de los fluidos a lo largo de los planos de estratificación las unidades, soportado por la disposición plana de los tensores de permeabilidad. La migración vertical de los fluidos solo ocurre cuando la intensidad y densidad de fractura son altas y cortan de manera ortogonal a los planos de estratificación, generando un tensor de permeabilidad de forma elíptica.

9. Recomendaciones y Posibles usos Geológicos de los MDA

La información capturada por los dispositivos (UAV) mediante técnicas de fotogrametría los Modelos Digitales de Afloramiento (MDA) no solo favorecen a la comprensión de la geología estructural y la estratigrafía de las regiones, como se ha demostrado en la presente investigación, pues se construyen insumos como nubes de puntos, ortoimágenes y modelos digitales que pueden sentar las bases para nuevas investigaciones. Estos estudios pueden desarrollarse en diferentes áreas y propiedades como la permeabilidad y conectividad de unidades de roca, el análisis detallado y consecutivo de patrones de fractura, y la conservación y divulgación del patrimonio geológico

La comparación entre los diferentes UAVs, como el Mavic 2 Pro, Mavic Air 2 y Mini 2 usados para la construcción de los MDA ha demostrado que los modelos generados por el Mavic 2 Pro presentan una mayor calidad y veracidad. Por ello recomendamos su uso para investigaciones detalladas. En cambio, el Mavic Air 2 y Mini 2 son adecuados para la construcción de objetos 3D con fines de divulgación o herramientas de apoyo visual.

8.1 Análisis estructurales de los MDA a través de scripts de programación

Dentro de las etapas realizadas en el proceso de construcción de los MDA se elaboraron otros espacios tridimensionales cuantificables y calificables como son las nubes de puntos y las mallas tridimensionales de superficie. Actualmente, los Software de programación permiten medir estos espacios mediante el uso de diferentes Scripts ó guiones

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

de programación. Estos procesos requieren menos recursos computacionales y han sido desarrollados para el análisis y clasificación de múltiples tipos de superficies, donde se obtienen resultados con una mayor precisión debido a la cantidad masiva de datos analizados.

Para realizar un análisis general de todas las formaciones cubiertas y superficies modeladas en esta investigación, se proponen sean estudiadas con herramientas orientados bajo un enfoque de geología estructural o desarrolladas bajo los conceptos de ciencias de datos. Esto facilitará la comprensión de superficies específicas. Recomendamos que estos MDA sean analizadas mediante Scripts o guiones de programación para automatizar la segmentación de nubes de puntos y la detección de formas en los espacios tridimensionales ya generados, por ejemplo, utilizando algoritmos RANSAC de orden múltiple y clústeres no supervisados con algoritmos (DBSCAN)

Estos Scripts son solo un par de las disponibles en las diferentes bases de datos, sin embargo, se recomiendan realizar indagaciones de nuevos códigos o scripts publicados recientemente que puedan ser usados sobre los MDA.

8.2 Análisis de los patrones de fractura en los miembros de la Fm. Los Santos y Fm. Rosablanca

Para futuras investigaciones de patrones de fractura de la Fm. Los santos la Fm. Rosa Blanca del presente estudio aporta un registro aproximado de 2000m de espesor en los 15 MDA generado. Esto representa un gran potencial de investigación, teniendo en cuenta que las mediciones de permeabilidad y conectividad han sido realizadas en una vista de perfil y solo reconocen las propiedades en el azimut de la proyección de la ventana de muestreo, por

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

lo tanto, se recomienda realizar un análisis con al menos dos ventanas de muestreo ortogonales según la posibilidad de cada afloramiento. Esto permitirá comprender con mayor precisión la distribución interna de las fracturas según la unidad de volumen de roca establecida y entender así tridimensionalmente las fracturas y el sistema de porosidad secundaria de la Fm. Los santos y demás unidades de interés en la MLS.

Para conocer las variaciones en el comportamiento de los patrones de fractura asociados a los cambios estratigráficos a una escala más precisa, se recomienda relacionar propiedades como la intensidad, densidad y las direcciones de orientación de las fracturas medidas a través de FracPaQ. Estas propiedades deben ser evaluadas en una sucesión de ventanas de muestreo cuadradas adyacentes y dispuestas de manera descendente hasta cubrir todo el espesor del afloramiento modelado. Este orden se busca comprender la disposición de las fracturas según las variaciones estratigráficas registradas en las columnas elaboradas en la presente investigación.

8.3 Uso de los MDA para el Análisis, preservación y divulgación del patrimonio Geológico

Los MDA son una herramienta que permiten representar escalas geológicas desde muestras de mano a macroestructuras. Debido a la versatilidad de estas innovaciones tecnológicas, se permite una exploración digital detallada y precisa del patrimonio geológico mueble e inmueble.

En áreas donde se presente un acceso físico limitado o sean muy extensas se puede recurrir al uso de drones o vehículos aéreos no tripulados para la captura de imágenes que

CORRELACIÓN Y FRACTURAS DE ESCARPES EN LA MLS

conforman los afloramientos y cañones de la zona, dado que la captura remota permite explorar las áreas sin comprometer la seguridad o el ingreso a terrenos difíciles.

Finalmente, dado que los modelos digitales pueden ser compartidos y visualizados dinámicamente a través de diferentes plataformas (dispositivos móviles, computadores, sistemas de realidad virtual, etc.) los usuarios pueden recorrer estos modelos por medio de una experiencia de inmersión, que facilita la comprensión, el análisis y la divulgación del conocimiento de la zona para el público en general. Además, esta tecnología genera una nueva alternativa para conservar elementos del patrimonio geológico de forma digital.

Referencias Bibliográficas

- Alarcón, G. C., & Rodríguez, L. J. (2019). *Estratigrafía, facies y paleoambiente de sedimentación de la Formación Jordán: Un registro fluvio-lacustre con incidencia de actividad volcánica (proyecto de grado de Geología)*. Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Bucaramanga
- Alcaldía Los Santos. (2003). *Esquema de Ordenamiento Territorial-EOT*.
- Aldana, S. (2008). *Estratigrafía de la Formación en las secciones de La Navarra y El Calicho, en La Mesa de Los Santos (Departamento de Santander)*. (Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander).
- Bemis, S. P., Micklethwaite, S., y Turner, D., et al. (2014). *Ground-based and UAV-Based photogrammetry: A multi-scale, high-resolution mapping tool for structural geology and paleo seismology*.
- Campbell, J. B., y Wynne, R. H. (2011). *Introduction to Remote Sensing*. Guilford Press.
- Cediel, F. (1968). *El Grupo Girón, una molada mesozoica de la cordillera oriental*. Boletín Geológico, 16, 5-96.
- Chesley, J., Leie, A., y Torres, S. (2017). *Using unmanned aerial vehicles and structure-from-motion photogrammetry to characterize sedimentary outcrops: An example from Morrison Formation, Utah, USA*.
- Colomina, I., y Molina, P. (2014). *Unmanned aerial system for photogrammetry and remote sensing: A review*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 92, 79-97.

Díaz, E. E., Contreras, N. M., Pinto, J. E., Velandia, F., Morales, C. J., y Hincapie, G. (2009).

Evaluación hidrogeológica preliminar de las unidades geológicas de la Mesa de los Santos, Santander. Boletín de Geología, 31(1), 61-70.

Etayo-Serna, Fernando, dir. cient. y ed. (2019). *Estudios geológicos y paleontológicos sobre el Cretácico en la región del embalse del río Sogamoso, Valle Medio del Magdalena.*

Bogotá: Servicio Geológico Colombiano

FUNDEMESA. (2009). *Mesa de los Santos. Memorias del paraíso. Fundación para el Desarrollo de la Mesa de los Santos, Bucaramanga, 96.*

García-Arias, S., Velandia, F., Alvarez, A., Sanabria-Gómez, J. D., Tarazona, Y., & Vargas,

M. C. (2024). *Stress tensors and quantification of fracture patterns to analyze connectivity and potential fluid flow in a mesa landform of the Northern Andes.*

Journal of Mountain Science, 21(1). <https://doi.org/10.1007/s11629-023-8338-5>.

Healy, D., & Rizzo, R. (2019). *FracPaQ: Fracture pattern quantification user guide version*

2.6. Recuperado de <https://github.com/fracpaq/fracpaq/releases/tag/v2.6.0>

Herrero. (2022). *3D model generated from UAV photogrammetry and semi-automated rock mass characterization.*

Julivert, M. (1958). *La morfoestructura de la zona de las mesas al SW de Bucaramanga (Colombia S. A.). Boletín de Geología, 1, 7-43.*

Laverde, F. (1985). *Descripción geológica del sector de "el camino de El Roto" en la localidad tipo de la Formación Los Santos (Santander). Boletín Geológico, 28(1), 3-*

41.

Laverde-Montaño, F. (2023). *Revisiting the latest Jurassic-earliest Cretaceous Los Santos Formation, Eastern Cordillera of Colombia. A – The history of its origin and the*

- lowermost part of the unit*. Boletín Geológico, 50(1). <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bol.geol.50.1.2023.689>
- Laverde-Montaña, F. (2023). *Revisiting the latest Jurassic-earliest Cretaceous Los Santos Formation, Eastern Cordillera of Colombia. B- A transgressive river mouth deposit in a syntectonic scenario*. Boletín Geológico, 50(1). <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bol.geol.50.1.2023.690>
- Li, Y., Liu, Y., Liu, H., y Cai, Q. (2021). *Comparison of ground-based and UAV-based photogrammetry methods for rock slope stability analysis*. Journal of Mountain Science, 18(2), 543-558. <https://doi.org/10.1007/s11629-020-6274-4>
- Long, J.C.S., Remer, J.S., Wilson, C.R., Witherspoon, P.A.. (1982). *Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures*. Water Resour. Res. 18 (3), 645e658.
- Mauldon, M., Dunne, W.M., y Rohrbaugh, M.B. (2001). *Circular scanlines and circular windows: new tools for characterizing the geometry of fracture traces*. J. Struct. Geol. 23 (2), 247e258.
- Nibourel. (2016). *Fracture analysis of sandstones in the southern flank of the Alpine Thrust Belt (Central Alps, Switzerland)*. Journal of Structural Geology.
- Pacheco, M. I. (2012). *Estratigrafía de la zona yesífera de Formación Rosablanca en el borde occidental de la Mesa de Los Santos – Santander (Colombia)*. (Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander).
- Panacea Cooperative Research. (s.f.) (2024). *MANUAL AGISOFT METASHAPE* <https://skeleton-id.com/wp-content/uploads/2021/01/Manual-Agisoft-Metashape.pdf>

- Pinto V., J. E., Clavijo Torres, J., Gómez Isidro, S., Gutiérrez Toledo, D., Mora Ortiz, J. P., Rojas Parra, N. R., Adarme, I. R., Aldana, S. C., Contreras, N. M., Díaz, E. J., Melo, L. F., Tarazona, G. R., Rincón, M. A., Vargas J., C. Y., Morales A., C. J., Velandia P., F., Hincapié V., G., Forero O., H., Duarte, R., Consuelo Vargas, M., y 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. (Memoria explicativa de la investigación geológica e hidrogeológica en la Mesa de Los Santos)*. Informe técnico, INGEOMINAS-UIS, Bucaramanga.
- Renzoni, G. (1985). *Paleoambientes de la Formación Tambor en la quebrada Pujamanes*. En F. Etayo-Serna y F. Laverde (Eds.), *Proyecto Cretácico, Contribuciones*. Publicaciones Geológicas Especiales 16. Bogotá: Ingeominas.
- Rincón, M. (2008). *Estratigrafía de la Formación en las secciones estratigráficas La Punta, Carrizal (Mesa de Los Santos) y La Cuevana (Curití), departamento de Santander*. (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.
- Shang, Z., Shen, Z. (2022). *Topology-based UAV path planning for multi-view stereo 3D reconstruction of complex structure*.
- Tarazona, Y., Vargas, M., y Velandia, F. (2021). *Análisis cuantitativo de sistemas de fracturas y sus implicaciones hidrogeológicas en la zona sur de la Mesa de Los Santos, Santander - Colombia*. *Boletín De Geología*, 43(3), 107–123.

Tziavou, S., Pytharouli, J., y Souter, J. (2018). *Unmanned Aerial Vehicle (UAV) based mapping in engineering geological surveys: Considerations for optimum results.*

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Strathclyde.

Villareal, C., Rojas, D., y Ríos, C. (2020). *3D digital outcrop of the Lower Cretaceous Los Santos Formation sandstones, Mesa de Los Santos region (Colombia): Implications for structural analysis.*