

Extracción automática de lineamientos sobre relieves sombreados. Metodología y aplicación de esta en tres proyectos geológicos en los Andes del Norte.

Autor:

Manuel Felipe Arias López

Trabajo de grado para optar al título de Geólogo

Asesor:

José Fernando Duque Trujillo, PhD.

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE CIENCIAS
MEDELLÍN, COLOMBIA

2020

Tabla de contenido

1. Introducción	7
2. Objetivo general	8
2.1. Objetivos específicos	8
3. Hipótesis	9
4. Antecedentes	9
4.1. Lineamientos	9
4.2. Mapa de sombras multidireccional	10
4.3. Extracción automática de lineamientos	11
5. Contexto geológico	12
5.1. Dunita de Medellín	14
5.2. Complejo Volcánico Doña Juana	15
5.3. Región del Valle de Aburrá	17
6. Metodología	18
6.1. Mapa de sombras multidireccional	18
6.2. Extracción automática de lineamientos	20
6.3. Control de calidad	22
6.4. Visualización de los resultados	26
7. Resultados	27
7.1. Región del Valle de Aburrá	28
7.2. Complejo Volcánico Doña Juana	34
7.3. Dunita de Medellín	40
8. Discusión	45
8.1. Zonas de estudio	48
9. Conclusión	54
10. Bibliografía	54

Lista de figuras

Figura 1. Localización de las diferentes zonas de estudio en la región de los Andes del Norte. Adicionalmente, se muestra el ajuste tectónico con sus límites conformados por el Sistema de Fallas Oriental de los Andes (SFOA), Sistema de Fallas Cauca Romeral (SFC-R), Falla de Garrapatas (FG), Falla Santa Marta-Bucaramanga (FSM-B) y la Falla de Oca (FO). Modificado de Mora-Páez et al. (2019).....	14
Figura 2. Mapa geológico de la Dunita de Medellín. Modificado de Rodríguez et al. (2005).	18
Figura 3. Mapa geológico del Complejo Volcánico Doña Juana. Modificado de Murcia y Cepeda (1991), Murcia y Cepeda (1991b), Orrego et al. (1996), Ruiz (2002) y Núñez (2003).	16
Figura 4. Mapa geológico de la Región del Valle de Aburrá. Modificado de González (1980), Calle y González (1980), Mejía (1984), Rodríguez et al. (2005) y Nivia (2011).	15
Figura 5. Flujo de trabajo para crear un mapa de sombras multidireccional usando el DEM del CVDJ.	20
Figura 6. Ilustración del método Nodo a Nodo donde se muestra el trazo de una línea simple considerando solo el nodo inicial y final. Modificado de Koçal (2004).....	24
Figura 7. Ejemplo del proceso de intersección entre dos capas ráster a través de la herramienta Calculadora Ráster del software ArcGIS® (Esri, 2019).	26
Figura 8. Diagrama de rosas de las fallas cartografiadas a escala 1:100.000 en la Región del Valle de Aburrá. Tomado de González (1980); Calle y González (1980); Mejía (1984); Rodríguez et al. (2005); y Nivia (2011).	29
Figura 9. Mapa de sombra multidireccional y lineamientos extraídos automáticamente y depurados de la RVA.	31
Figura 10. Diagrama de rosas de los lineamiento extraídos automáticamente y depurados en la RVA.	32
Figura 11. (A) Mapa de lineamientos y fallas de la zona este del Valle de Aburrá. (B) posibles bloques rotados, delimitados a través de las fallas y lineamientos de la zona.	33
Figura 12. Zonas de cizalla de la RVA. Las líneas negras son lineamientos interpretados durante el presente trabajo. Los diagramas de rosas están codificados por colores con los mismos colores de las zonas de cizalla. Intervalo del diagrama de rosas: 10 °.	34
Figura 13. Diagrama de rosas de las fallas a escala 1:100.000 presentes en el CVDJ. Tomado de Murcia y Cepeda (1991), Murcia y Cepeda (1991b), Orrego et al. (1996), Ruiz (2002) y Núñez (2003).	35
Figura 14. Mapa de sombra multidireccional y lineamientos extraídos automáticamente y depurados del CVDJ.	37
Figura 15. Diagrama de rosas de los lineamientos regionales extraídos automáticamente y depurados para el CVDJ.	38
Figura 16. Mapa de los lineamientos contenidos en la zona definida por Duque et al. (2020) como bloque de basamento.	39
Figura 17. Diagrama de rosa de los lineamientos locales contenidos en la zona denominada como bloque de basamento (figura 16).	40
Figura 18. Diagrama de rosas de las fallas a escala 1:100.000 presentes en la DM. Tomadas de Rodríguez et al. (2005).	41
Figura 19. Mapa de sombras multidireccional junto con los lineamientos depurados de la DM.	43
Figura 20. Diagrama de rosas de los lineamiento extraídos automáticamente y depurados de la DM.	44
Figura 21. Mapa que representa la orientación de cada lineamiento a través de un color. Los rangos de azimut de cada color son: 000-010° (N-S), 010-030° (NNE-SSW), 030-060° (NE-SW), 060-080° (ENE-WSW), 080-100° (E-W), 100-120° (ESE-NNW), 120-150° (SE-NW), 150-170° (SSE-NNW) y 170-180° (N-S).	45

Figura 22. Mapa de tensores de esfuerzo del área de estudio y representación del tensor de compresión σ_1 (flechas roja y verde) obtenido de los diferentes conjuntos de datos de los sitios de recolección de datos medidos a lo largo del Valle de Aburrá. Tomado de Mariño et al. (2020). 49

Figura 23. Bloques rotados al oriente del Valle de Aburrá, con la cinemática de las fallas que componen este modelo y la consecuente dirección del esfuerzo principal..... 50

Figura 24. Distribución de Riedel con la respectiva dirección de esfuerzo principal (σ_1). (A) diagrama de rosas de los lineamientos contenidos en el bloque de basamento (figura 16). (B) diagrama de rosas de los planos de falla medidos por Duque et al. (2020). 52

Figura 25. Diagramas de rosas de las diaclasas pertenecientes a las distintas zonas estructurales de la DM. Tomado de Patiño et al. (2020). 53

Lista de tablas

Tabla 1. Parámetros que controlan los umbrales de la extracción automática de lineamientos con sus respectivos rangos de valores. Tomado de PCI-Geomatica (2005).....	21
Tabla 2. Combinación de los parámetros que controlan la extracción automática de lineamientos, con su respectiva referencia e identificación.	27
Tabla 3. Valor de las cuatro características cuantitativas medidas para los lineamientos de la RVA.	29
Tabla 4. Calificación de cada capa de lineamientos en los diferentes filtros. La capa número 9 (resaltada con color gris), obtuvo la mejor puntuación para la RVA.....	30
Tabla 5. Valor de las cuatro características cuantitativas de los lineamientos medidas para el CVDJ.....	35
Tabla 6. Calificación de cada capa de lineamientos en los diferentes filtros. La capa número 8 (resaltada con color gris), obtuvo la mejor puntuación para el CVDJ.	36
Tabla 7. Valor de las cuatro características cuantitativas medidas para los lineamientos de la DM.	41
Tabla 8. Calificación de cada capa de lineamientos en los diferentes filtros. La capa número 3 (resaltada con color gris), obtuvo la mejor puntuación para la DM.....	42

Resumen

La extracción automática de lineamientos sobre relieves sombreado es una técnica que ha sido usada ampliamente. Identificar estructuras geológicas a través de lineamientos ha cobrado cada vez más importancia en distintos campos de estudio debido a que controlan algunos procesos geológicos. Este estudio surge como un complemento en el análisis estructural de tres proyectos de investigación (Mariño et al., 2020; Duque et al., 2020; Patiño et al., 2020), cuyas áreas de estudio tienen distintas escalas y se ubican en diferentes lugares de los Andes del Norte. El método aplicado consta de cuatro pasos principales: (i) se genera un sombreado multidireccional en el software ArcGIS®, iluminando desde ocho direcciones (360°, 045°, 090°, 135°, 180°, 225°, 270° y 315°) y añadiendo un mapa de pendientes; (ii) se realiza una extracción automática de lineamientos usando el detector de bordes Canny a través del software PCI-Geomatica®; (iii) se efectúa un control de calidad a los lineamientos por medio de los filtros de longitud total, población, dirección e intersección, usando como referente las fallas cartografiadas en cada zona de estudio; y (iv) se construyen diagramas que permitan visualizar la información en función de los objetivos particulares de cada proyecto. Los resultados de este proyecto muestran la versatilidad y complemento que representa la metodología implementada en el análisis estructural. Asimismo, identificar las características estructurales superficiales a través de los lineamientos en diferentes ambientes geológicos, muestra la estrecha relación de estos con su contexto geológico local y regional.

1. Introducción

Los lineamientos son características lineales a escalas de mapas topográficos, fotos aéreas, imágenes satelitales o modelos digitales del terreno. Los lineamientos representan estructuras geológicas como fracturas, contactos, crestas de montañas (asociadas a pliegues) y foliaciones que intersecan la superficie de la Tierra. Además, se pueden manifestar como características curvilíneas, paralelas o en escalón (Koçal, 2004; Singhal y Gupta, 2010; Fossen, 2016; Soliman y Han, 2019). La detección y el análisis de características lineales relacionadas con las estructuras superficiales y subterráneas (por ejemplo, zonas de cizalla, fallas, lineamientos o cualquier discontinuidad), se han considerado necesarias en campos de estudio como la geología estructural, la exploración de recursos naturales y la evaluación de la inestabilidad de la superficie terrestre debido a que controlan algunos procesos geológicos, que son críticos para formar una variedad de depósitos minerales, reservorios de agua subterránea y controlar características de reservorios magmáticos (Tibaldi y Romero-Leon, 2000; Singhal y Gupta, 2010; Abdullah y Ghaleeb, 2013; Masoud y Koike, 2017; Khalifani et al., 2019; Duque et al., 2020).

Debido a la importancia y el alcance que puede tener la detección de lineamientos, se seleccionaron tres áreas para estudiar en una región distinguida por su variedad de ambientes geológicos como lo son los Andes del Norte, cuyo complejo ajuste tectónico está caracterizado por la colisión plateau vs continente en el margen Caribe (entre el Cretácico y Cenozoico), la colisión activa de arco-continente y la subducción oblicua de la placa de Nazca en el margen Pacífico (Fig. 1), además, de una serie de terrenos de afinidad oceánica, acrecionados y divididos por grandes sistemas de fallas: Sistema de Fallas Cauca-Romeral (SFCR) y Falla de Garrapatas (FG) (Cediell et al., 2003; Vallejo et al., 2006; Kellogg et al., 2019; Mora-Páez et al., 2019). Bajo estas condiciones tectónicas y distintas características locales, se encuentran las tres zonas de estudio que serán descritas a continuación: i) la región del Valle de Aburrá (RVA) ubicada al noroeste de Colombia, se caracteriza por ser una depresión intramontana moderada y estar sometida a un régimen transcurrente dextral, dominado por dos sistemas de fallas principales con orientaciones variantes entre N-S y NE-

SW (Restrepo et al., 2016; Mariño et al., 2020); ii) El Complejo Volcánico Doña Juana (CVDJ) se encuentra al suroeste colombiano, rodeado por fallas regionales de rumbo de tendencia NE-SW, casi paralelas a la trinchera y exhiben el componente dextral característico, además, el CVDJ comprende tres edificios superpuestos, cada uno truncado en la cumbre por estructuras afiladas que marcan depresiones topográficas superpuestas (Velandia et al., 2005; Tibaldi et al. 2007; Pardo et al., 2018; Duque et al., 2020); iii) La Dunita de Medellín (DM), la cual está ubicada en el flanco Este de la RVA, y por lo tanto comparten características geográficas y estructurales. No obstante, localmente esta unidad litológica se distingue por ser una escama de cabalgamiento con un espesor máximo de 600m, rodeada de fallas inversas y de rumbo (Rodríguez et al., 2005; Casas y Monsalve, 2018).

Teniendo en cuenta lo anterior y la necesidad de tener una visión integral del ajuste estructural en los proyectos Mariño et al. (2020), Duque et al. (2020) y Patiño et al. (2020), este trabajo pretende identificar y analizar las estructuras lineales de la RVA, el CVDJ y la DM a escala regional, intermedia y local respectivamente, usando una metodología de extracción automática de lineamientos por medio de un modelo de elevación digital (DEM) (Khalifani et al., 2019), usando los softwares PCI-Geomatica®, ArcGIS® y RockWorks®. Esta metodología constituye entonces una herramienta útil y objetiva en la identificación de las cualidades lineales manualmente, tarea que puede tomar mucho tiempo y presentar fuertes sesgos por el intérprete. Por lo tanto, la extracción automática de lineamientos representa una ventaja debido a su bajo nivel de subjetividad, eficacia y eficiencia a la hora de reconocer tendencias estructurales, incluso ante métodos geofísicos y trabajo de campo que pueden resultar lentos y costosos (Soliman y Han, 2019).

2. Objetivo general

Identificar y analizar los lineamientos estructurales en tres proyectos con escalas de trabajo local, intermedia y regional (DM, el CVDJ y la RVA respectivamente), usando una metodología de extracción automática de lineamientos a través de un DEM.

2.1. Objetivos específicos

- Establecer una metodología ideal para extraer lineamientos a partir de información remota.

- Aplicar la metodología a diferentes proyectos para mejorar el conocimiento que podemos tener de estos sitios a través de los sensores remotos.

3. Hipótesis

La distribución de la orientación de los lineamientos a escala regional e intermedia muestran una fuerte relación con la disposición de las estructuras regionales en una zona específica. No obstante, los lineamientos a escala local muestran variaciones respecto a estos patrones.

4. Antecedentes

En aras de entender y reconocer la información documentada sobre el objeto de estudio, en este proyecto se realizó una compilación de los trabajos más relevante en los distintos temas de la investigación (lineamientos, mapas de sombras multidireccional y extracción automática de lineamientos).

A continuación, se muestran los resultados de este proceso:

4.1. Lineamientos

Con el objetivo de indagar sobre la orientación de los lineamientos terrestres dominantes de la Región del Borde Atlántico, Hobbs (1904) fue el primero en proponer el término «lineamiento» en un contexto geológico. Este lo describió como la representación de crestas de cordilleras o límites de áreas elevadas, líneas de drenaje, líneas costeras y líneas fronterizas de formaciones geológicas. Posteriormente, Vanderbrug (1976) cuyo propósito fue estudiar tres algoritmos para detectar líneas, expresó que los lineamientos son características similares a líneas que ocurren naturalmente en el terreno y que se infiere que son manifestaciones de fallas o fracturas. Adicionalmente, con el fin de enfatizar varios aspectos de la exploración, el desarrollo, la calidad, la contaminación y la evaluación del agua subterránea en medios rocosos fracturados, Singhal y Gupta (2010) tomaron y complementaron la definición propuesta originalmente por O'Leary et al. (1976) en la que un lineamiento es «una característica lineal simple o compuesta mapeable de una superficie cuyas partes están alineadas en una relación rectilínea o ligeramente curvilínea, y que difiere claramente del patrón de las características adyacentes, y presumiblemente refleja un fenómeno del subsuelo» relacionado con sistemas de fracturas, planos de discontinuidad,

fallas, zonas de cizallamiento, diques y vetas. Finalmente, Soliman y Han (2019) en su trabajo pretendieron evaluar y verificar los impactos de la precisión vertical del DEM empleado en la extracción de lineamientos. Para llevar a cabo lo anterior, los lineamientos se clasifican en tres categorías según su modo de formación: (i) lineamientos geológicos, como fallas y fracturas; (ii) lineamientos geomorfológicos o topográficos causados por el relieve, como crestas y segmentos de drenaje; (iii) hechos por el hombre, no geológicos o, a veces, llamados pseudo lineamientos causados por construcciones hechas por el hombre, como carreteras y límites de campos.

4.2. Mapas de sombras multidireccional

La investigación de Raghavan et al. (1993) tuvo como fin constituir una base para el desarrollo de un conjunto de programas informáticos independientes de un dispositivo para el reconocimiento informático de lineamientos a partir de imágenes rasterizadas. El artículo previamente mencionado, aplica un método en el cual se superponen una serie de mapas de sombras iluminados desde distintas direcciones, junto con una imagen satelital para crear un modelo tridimensional del área de estudio. Este procedimiento se asemeja a los métodos aplicados en los proyectos Masoud y Koike (2006), Abdullah et al. (2010), Al-Obeidat et al. (2016) y Soliman y Han (2019), excepto por los intervalos del azimut de iluminación usados y la supresión de la imagen satelital en la superposición de los mapas de sombras multidireccional realizada en estos proyectos. Por otra parte, Masoud y Koike (2011) pretendieron desarrollar un método que mejore las características de las líneas, detecte, conecte e integre los lineamientos extraídos desde las distintas fuentes de iluminación. Para esto, extrajeron los lineamientos de cada mapa de sombras, iluminados cada 030° de azimut y con ángulos de inclinación de 15° , 30° y 45° . Para finalizar, Šilhavý et al. (2016) tuvo como objetivo presentar un nuevo método de agrupamiento jerárquico de sombreado múltiple (MHHC por sus siglas en inglés) para la extracción automatizada de lineamientos. El núcleo del método anterior incorpora un conjunto de mapas de sombras iluminados y rotados de diversas formas en combinación con el agrupamiento jerárquico de los lineamientos derivados de cada mapa. Es decir que se realiza la extracción de lineamientos en cada capa iluminada desde un azimut específico y luego se superponen los resultados para eliminar el

ruido extrayendo un lineamiento que represente un grupo de polilíneas con similar orientación y ubicación espacial.

4.3. Extracción automática de lineamientos

Ehrich (1977) quiso detectar líneas basado en la detección de bordes usando un sistema para el uso de Filtros Conectados para obtener aproximaciones lineales o segmentos de lineamientos. Estos segmentos de lineamientos luego se enlazan mediante una programación dinámica y así formar lineamientos completos. Los filtros son simples para maximizar la velocidad de procesamiento del sistema, y se pueden configurar parámetros para que sean selectivos según el ancho o el perfil del borde. Posteriormente, Wang (1993) tuvo como finalidad presentar un nuevo sistema basado en X-Window, llamado Detección y Análisis de Redes de características Lineales (LINDA por sus siglas en inglés). Este sistema permite el reconocimiento y análisis automatizado de características lineales y / o bordes. La entrada al sistema es cualquier imagen digital de tonos grises que contenga líneas y / o bordes. Consta de varios módulos, entre los más relevantes para este estudio son la transformada de Hough que detecta automáticamente los lineamientos geológicos (solo considera bordes rectos) y el reconocimiento de patrones estructurales, que genera automáticamente las medidas estructurales y estadísticas asociadas a mapas de lineamientos. Adicionalmente, Kocal et al. (2004) realizó un análisis automático de lineamientos utilizando imágenes de satélite de alta resolución para la identificación de discontinuidades en la roca. Lo anterior se llevó a cabo con la extracción automática de lineamientos a través del detector de bordes Canny del módulo LINE de PCI Geomatica v8.2. Además, la selección de los parámetros más precisos de LINE, se ejecutó por medio de una evaluación de precisión. Se usó como referencia la extracción manual de lineamientos con filtrado direccional en cuatro direcciones principales (N-S, E-W, NE-SW y NW-SE) como el método más adecuado. Para la comparación de los procesos de extracción automática y extracción manual de lineamientos, se realizó un análisis de longitud total, número de lineamientos y direcciones mediante la construcción de los diagramas de rosas. Por otro lado, Abdullah et al. (2010) tuvieron como propósito aclarar la capacidad de los mapas de sombras multidireccional derivados del modelo de elevación digital, para la extracción de lineamientos (extracción de lineamientos positivos y negativos). Para realizar lo anterior, crearon dos imágenes en relieve sombreadas con luz

multidireccional, la primera imagen con los cuatro ángulos azimutales de las fuentes de luz que son 0°, 45°, 90° y 135°, y la segunda imagen con los ángulos 180°, 225°, 270° y 315°. Ambas imágenes se utilizaron para la extracción automática de lineamientos mediante el software PCI Geomatica. Finalmente, este estudio (Abdullah et al., 2010) comparó el resultado de los lineamientos con las fallas cartografiadas del área de estudio para obtener una buena calidad en los resultados.

5. Contexto geológico

La evolución geológica de los Andes del Norte está relacionada con la interacción entre las placas tectónicas y una serie de terrenos de afinidad oceánica, acrecionados y divididos por grandes sistemas de fallas desde el Cenozoico (Cediel et al., 2003; Kellogg et al., 2019). En el sur de los Andes en Colombia, la cordillera se divide en tres ramales: la Cordillera Occidental que está compuesta por rocas de afinidad oceánica; la Cordillera Central, donde se ubica el arco volcánico moderno y se compone de un basamento de rocas metamórficas paleozoicas y plutones del Mesozoico y Cenozoico; y la Cordillera Oriental, conformada por rocas sedimentarias deformadas, debido a la inversión tectónica del sistema de cuencas mesozoicas (Toro et al., 2004).

El complejo ajuste geodinámico actual, se distingue por la colisión plateau vs continente en el margen Caribe, la colisión activa de arco-continente y la subducción oblicua de la placa de Nazca en el margen Pacífico (Fig. 1) (Cediel et al., 2003; Pulido, 2003; Vallejo et al., 2006; Restrepo et al., 2016; Kellogg et al., 2019; Mora-Páez et al., 2019). Estas interacciones definen un entorno general de transpresión dextral y son responsables de la distribución de los campos de esfuerzo conforme avanza el tiempo (Cortés y Angelier, 2005; Monte et al., 2019), conformados por dos direcciones de esfuerzos principales, hacia el E y SE para el margen Caribe y E y NE para el margen Pacífico (Restrepo et al., 2016; Mora-Páez et al., 2019). Bajo este régimen de esfuerzos se encuentra sometido el Bloque Andino del Norte (BAN) como un segmento diferente, que presenta un desplazamiento de 8.6 mm/año en dirección noreste (N60E) respecto a la placa suramericana (Mora-Páez et al., 2019). Además, la dirección de desplazamiento hacia el noreste del Bloque Panamá-Chocó (BPC), es un componente relevante que controla la deformación del BAN en consecuencia del escape

tectónico que este sufre producto de la subducción del Cocos Ridge en Centro América (Kobayashi et al., 2014; Mora-Páez et al., 2019).

Entre los grandes sistemas de fallas de esta región de los Andes se destacan dos principales que dividen las tres cordilleras mencionadas e influyen sobre la configuración estructural de las zonas de estudio. El primero es el Sistema de Fallas Cauca-Romeral (SFCR), ubicado al oeste de la región entre las cordilleras Central y Occidental, y caracterizado por estar conformado por fallas de rumbo (Taboada et al., 2000; Cediél et al. 2003). La cinemática del SFCR ha sido objeto de desacuerdo entre distintos autores, uno de ellos es MacDonald et al. (1996), que propone una cinemática sinextral. Por otro lado, Rodríguez et al. (2005) y Cediél et al. (2003), afirman que la cinemática es dextral. Otros autores, proponen una policinemática debido a los cambios en la configuración geodinámica (Ego et al., 1995; Taboada et al., 2000; Pulido, 2003; Ordóñez et al., 2005; Restrepo et al., 2016). El segundo, es el Sistema de Fallas Palestina (SFP), ubicado en el flanco este de la Cordillera Central y caracterizado por ser una falla de rumbo con claras expresiones morfotectónicas que indican una cinemática dextral (Cediél et al., 2003; Mariño et al., 2020; García y Velandia, 2020).

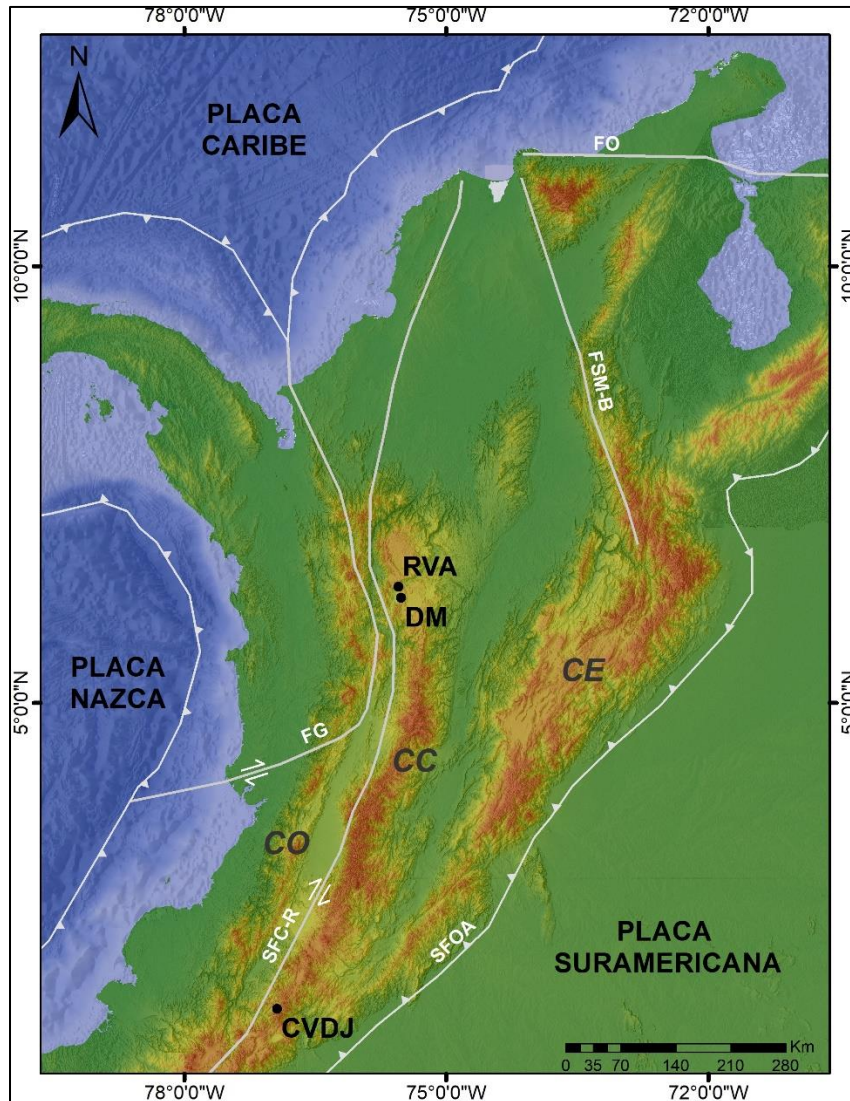


Figura 1. Localización de las diferentes zonas de estudio en la región de los Andes del Norte. Adicionalmente, se muestra el ajuste tectónico con sus límites conformados por el Sistema de Fallas Oriental de los Andes (SFOA), Sistema de Fallas Cauca Romeral (SFC-R), Falla de Garrapatas (FG), Falla Santa Marta-Bucaramanga (FSM-B) y la Falla de Oca (FO). Modificado de Mora-Páez et al. (2019).

5.1. Dunita de Medellín

La Dunita de Medellín hace parte del complejo ofiolítico de Aburrá, elongada en dirección N10°W y se localiza en el flanco este del valle de Aburrá, entre las latitudes 6° 11' y 6° 13', y longitudes 75° 33' y 75° 30'. Se encuentra desmembrada en tres partes y la parte Sur se extiende desde el municipio de Envigado hasta quebrada Santa Elena (zona de estudio) (figura 4). Estructuralmente, esta unidad se considera una escama de cabalgamiento delgada

de rocas ultrabásicas, con un espesor máximo de 600 metros (Casas y Monsalve, 2018). La falla de Rodas, con ángulos de buzamiento bajos en la parte oeste y altos en la parte este, es la encargada de poner en contacto esta unidad con la Anfibolita de Medellín. Al este, el miembro centro y sur de la Dunita, se encuentra en contacto fallado con el Gneiss Milonítico de Sajonia, a través de la falla Acuarela con orientación N-S. Esta se bifurca en la parte sur (miembro sur), donde posteriormente se vuelve a unir en la zona de Paulandia (Rodríguez et al., 2005). Por otro lado, esta roca dunítica se encuentra altamente diaclasada y presenta desarrollo de estructuras pseudokarsticas con un claro control estructural (Patiño et al., 2020).

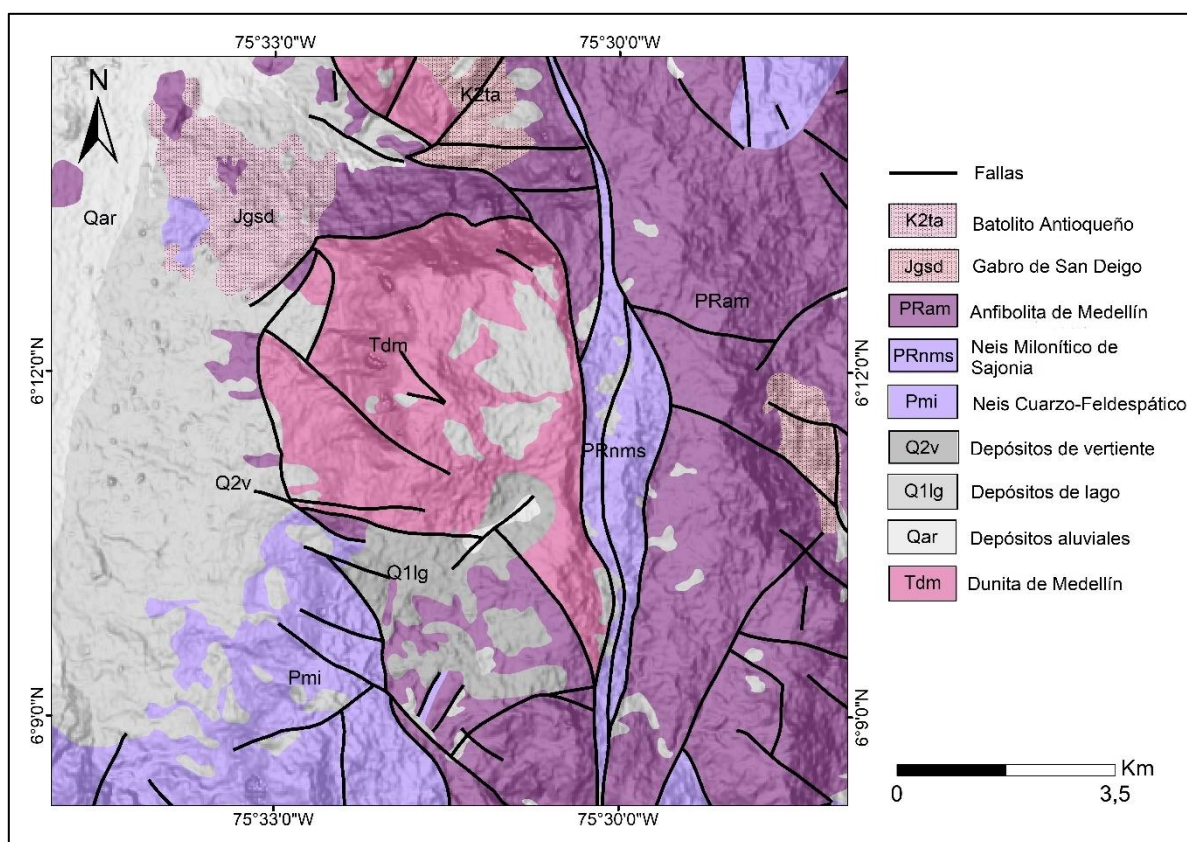


Figura 2. Mapa geológico de la Dunita de Medellín. Modificado de Rodríguez et al. (2005).

5.2. Complejo Volcánico Doña Juana

Complejo Volcánico Doña Juana (CVDJ) del Pleistoceno Tardío-Holoceno (figura 3), está ubicado al suroeste de Colombia entre N 1° 20' y N 1° 46' y W 76° 48' y W 77° 10', dentro del segmento volcánico central del bloque andino norte en una región conocida como el "nudo de Los Pastos", donde la Cordillera Real de Ecuador y su valle interandino se ramifican

en las tres cordilleras distintas de Colombia (Hall y Wood, 1985). El CVDJ comprende tres edificios superpuestos, cada uno truncado en la cima por estructuras afiladas que marcan depresiones topográficas superpuestas, que actualmente están rellenas y cortadas transversalmente por los domos de lava del Holoceno reciente (Pardo et al., 2018). Los productos correspondientes del Pleistoceno-Holoceno están intercalados con productos del vecino Volcán Animas, dacítico, y están confinados entre fallas de rumbo regionales con orientaciones NE-SW, que son casi paralelas a la trinchera del pacífico y exhiben el característico componente lateral derecho (Tibaldi y Romero -León, 2000; Velandia et al., 2005; Tibaldi et al. 2007). Además, el CVDJ se encuentra sobre un basamento conformado por basaltos del Complejo Quebradagrande y esquistos del Complejo Cajamarca (Pardo et al., 2018). Finalmente, los depósitos de avalancha de escombros relacionados con el colapso los flancos, y los depósitos de flujo de bloques y cenizas, relacionados con el colapso del domo de lava, evidencian la inestabilidad del edificio preferentemente en las direcciones NE y SW (Duque et al., 2020).

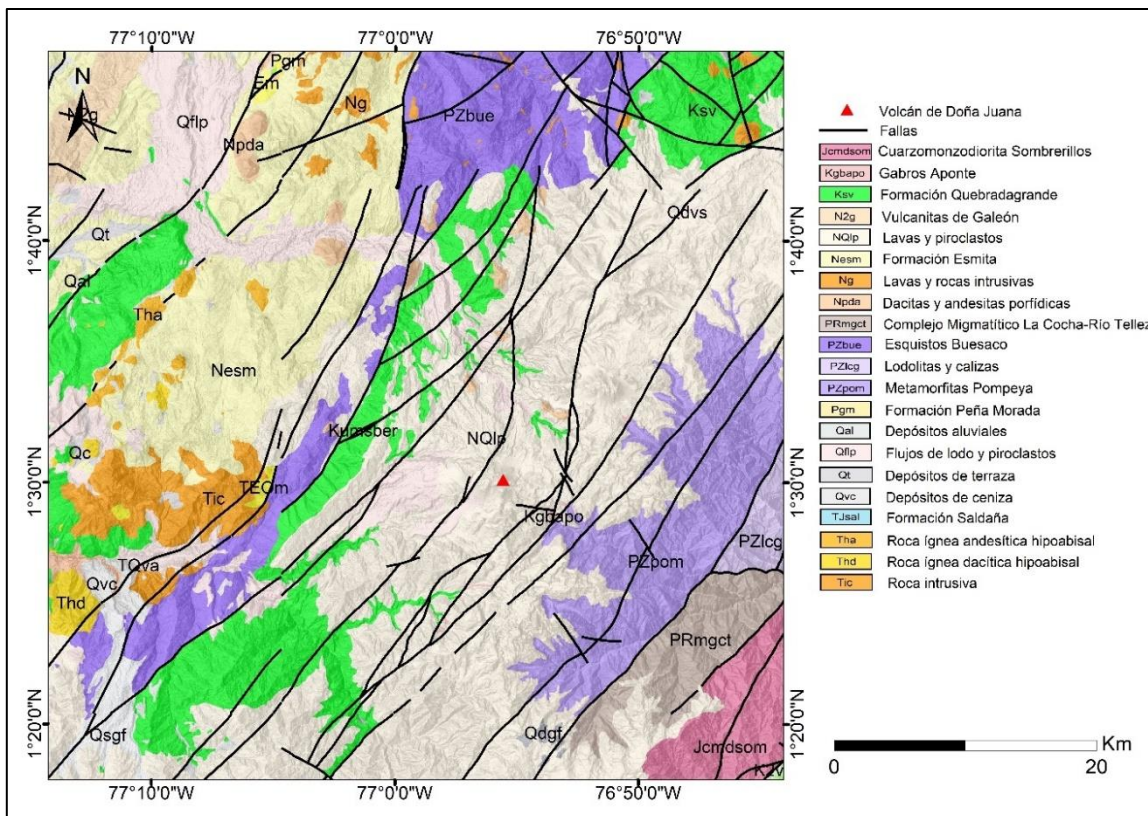


Figura 3. Mapa geológico del Complejo Volcánico Doña Juana. Modificado de Murcia y Cepeda (1991), Murcia y Cepeda (1991b), Orrego et al. (1996), Ruiz (2002) y Núñez (2003).

5.3. Región del Valle de Aburrá

El Valle de Aburrá está ubicado en el flanco NW de la Cordillera Central entre N 6 ° 0 'y N 6 ° 30' N y W 75 ° 44 'y W 75 ° 14' W (figura 2). El valle es una depresión alargada de unos 60 km, dividida en dos segmentos. El segmento sur de unos 30 km está orientado de norte a sur y tiene un ancho máximo de 7 km. El segmento norte es más estrecho que el segmento sur, tiene unos 35 km de longitud y está orientado NE-SW (Hermelín, 2007). Esta región se encuentra dominada por el Sistema de Fallas Cauca-Romeral (SFCR) y el Sistema de Fallas Palestina (SFP), con orientaciones N-S y NE-SW respectivamente (Restrepo et al., 2016; Mariño et al., 2020). Estos sistemas de fallas tienen un papel importante en la configuración del valle como una cuenca tectónica (Toro y Velásquez, 1984; Rendón, 2003; Rodríguez et al., 2005). De hecho, el Valle de Aburrá marca una diferencia estructural entre los flancos este y oeste (Fig. 3). El flanco occidental tiene un fuerte control estructural del CRFS, mientras que el flanco oriental está dominado por la deformación ocurrida en el Batolito de Antioquia y a lo largo de su margen (Mariño et al., 2020).

El valle de Aburrá es un corte dentro del Complejo Cajamarca, que localmente se intercala con una secuencia de anfibolitas, esquistos y gneises. Esta configuración geológica es el resultado de la obducción de una ofiolita desmembrada sobre las rocas metamórficas del Complejo Cajamarca entre el Triásico Tardío y el Cretácico (Restrepo y Toussaint, 1984; Martens et al., 2014). Luego, estas rocas fueron altamente deformadas y dispuestas como cuerpos alargados casi N-S. Este basamento metamórfico está invadido por rocas magmáticas del Jurásico, Cretácico al Paleoceno (Cochrane et al., 2014; Bustamante et al., 2017), incluido el voluminoso Batolito Antioqueño del Cretácico (Duque-Trujillo et al., 2019).

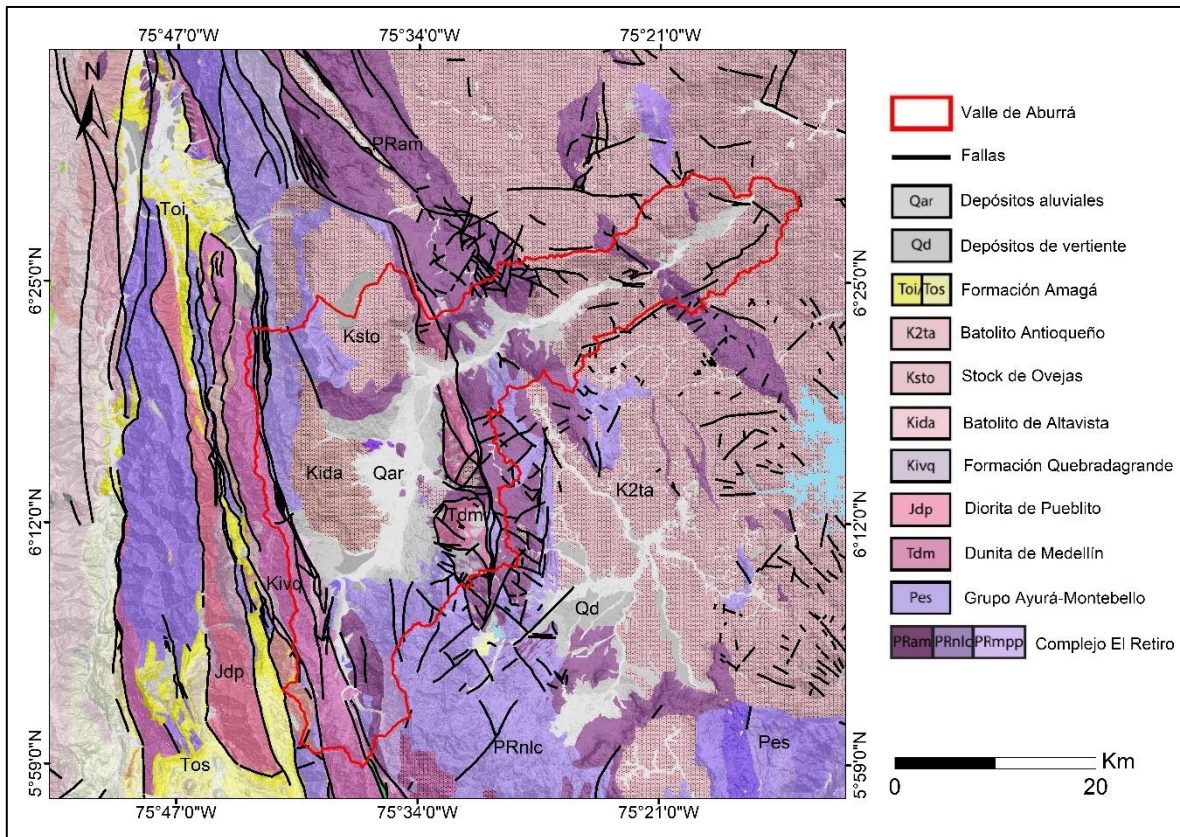


Figura 4. Mapa geológico de la Región del Valle de Aburrá. Modificado de González (1980), Calle y González (1980), Mejía (1984), Rodríguez et al. (2005) y Nivia (2011).

6. Metodología

La metodología que se ha planteado y analizado para llevar a cabo este trabajo consiste en una secuencia de cuatro pasos principales que serán descritos detalladamente a continuación:

6.1. Mapa de sombras multidireccional

La importancia de los mapas de sombras en el análisis de la superficie terrestre ha perdurado debido a que recrea el relieve de la zona que se esté trabajando, transformando las representaciones bidimensionales de elevaciones en representaciones pseudo tridimensionales (Al-Obeidat et al., 2016). Estos mapas se crean a partir de un DEM, cuya resolución espacial debe ser seleccionada según la escala y el propósito del análisis. Teniendo en cuenta lo anterior, la resolución espacial, la inclinación de iluminación (altura de la fuente de luz) y el azimut de iluminación (ángulo de la fuente de luz), son parámetros que influyen en el sombreado del relieve (Šilhavý et al., 2016). De hecho, Masoud y Koike (2011), Mallast

et al. (2011) y Abdullah et al. (2010) mencionaron la dependencia de los resultados en el azimut de iluminación cuando el sombreado del relieve se usa para la extracción de lineamientos. Para evitar este sesgo de dirección, estos autores combinaron capas ráster con iluminaciones diferentes en un solo ráster (Šilhavý et al., 2016). Por tal razón, en este trabajo se recreó la metodología mencionada, incluyendo técnicas desarrolladas por Nelson (2020) que logran simular la iluminación difusa del cielo sobre el relieve y ayudan a eliminar los sesgos que se puedan generar en la extracción de lineamientos.

Para generar el relieve sombreado multidireccional de la RVA, CVDJ y DM, se seleccionaron los DEM con una resolución espacial de 30m, 12m y 5m respectivamente, debido a la escala de cada zona (tomados de USGS, 2014; Dataset ASF DAAC, 2011; Alcaldía de Medellín, 2016). Posterior a esto, se crearon a través de la herramienta Hillshade del software ArcGIS® las sombras desde 8 diferentes azimuts de iluminación (000°, 045°, 090°, 135°, 180°, 225°, 270° y 315°) (Abdullah et al., 2010). Encima, se usó una inclinación constante de 45° en la fuente de luz, debido a que la variación de este último parámetro produce cambios en el contraste de la imagen que no tienen considerable inferencia en los resultados. Además, las direcciones de los azimuts mencionados fueron seleccionadas porque estadísticamente permiten captar la mayor cantidad de lineamientos (Šilhavý et al., 2016). Después de la generación de las sombras, se ajustó la simbología de cada capa creada, dándole el 100% de transparencia a la paleta de colores blancos y 75% de transparencia a la paleta de colores oscuros. Adicionalmente, los cambios repentinos en la pendiente dentro del mapa de gradiente pueden indicar la presencia de una estructura lineal (Khalifani et al., 2019; Nelson, 2020). Teniendo en cuenta lo anterior, se generó un mapa de pendientes en grados y se le asignó en simbología una paleta de colores blanco-negro continua, siendo los tonos blancos los lugares con menor pendiente y los tonos oscuros los de mayor pendiente, con el fin de resaltar los contrastantes cambios de pendiente en la zona de estudio y así obtener una mejor calidad en la extracción de lineamientos. Finalmente, se superpuso cada capa siguiendo el orden del azimut de iluminación mencionado y el mapa de pendiente se situó en la base de la superposición (Nelson, 2020) (figura 5).

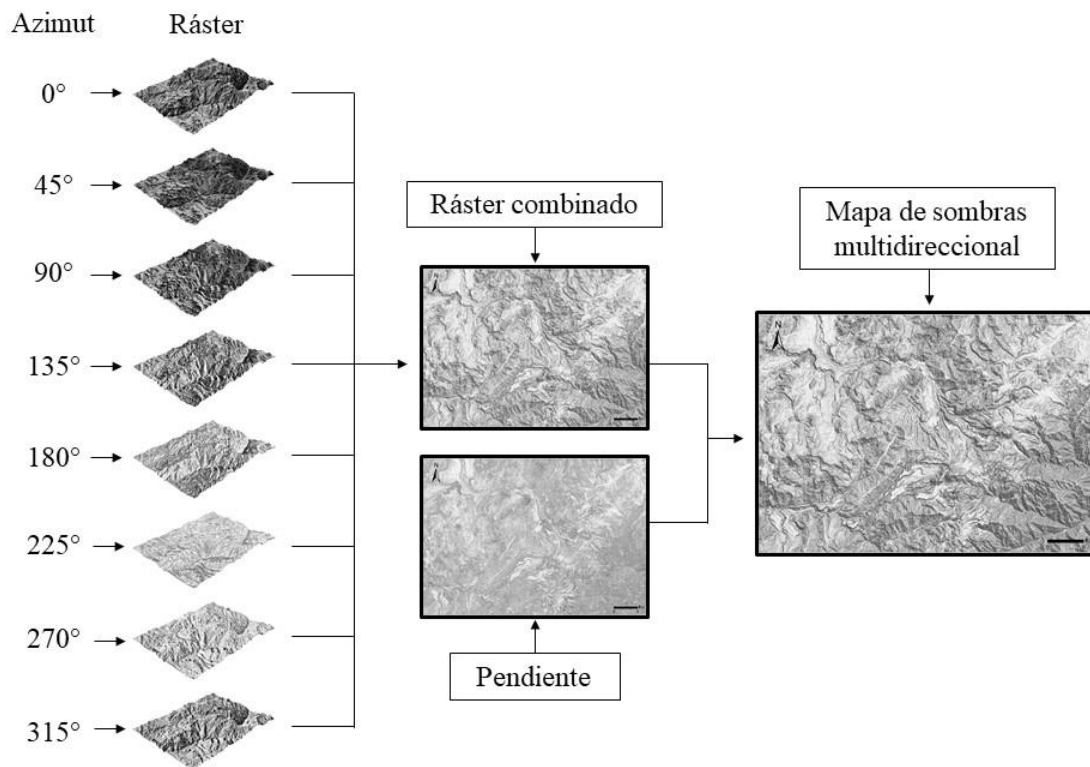


Figura 5. Flujo de trabajo para crear un mapa de sombras multidireccional usando el DEM del CVDJ.

6.2. Extracción automática de lineamientos

Los análisis de lineamientos en la teledetección siempre representan una parte importante de los estudios basados en ciencias de la Tierra. Los mapas de lineamientos generados por técnicas de mapeo de campo convencionales no pueden identificar todos los lineamientos existentes en el área, debido a la gran escala. Sin embargo, son los mapas más precisos y confiables (Koçal, 2004). En este sentido, una metodología que logre identificar la mayor cantidad de lineamientos es una opción adecuada siempre y cuando estos representen estructuras geológicas. Para lograr esto, el módulo «LINE» del software PCI-Geomatica resulta ser una alternativa apropiada para extraer automáticamente los lineamientos que no se logran identificar a través de métodos convencionales (Soliman y Han, 2019). El proceso de este módulo radica en extraer entidades lineales de una imagen y registrar las polilíneas en una capa vectorial. Aunque este módulo está diseñado para extraer lineamientos de imágenes de radar, también se puede usar en imágenes ópticas para extraer características

curvilíneas (PCI-Geomatica, 2005). El proceso anterior está controlado por los parámetros de la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros que controlan los umbrales de la extracción automática de lineamientos con sus respectivos rangos de valores. Tomado de PCI-Geomatica (2005).

Nombre	Descripción	Rango de valores
RADI	Radio de filtro (píxeles)	0 - 100
GTHR	Umbral para gradiente de borde	0 - 255
LTHR	Umbral para longitud de curva	0 - 100
FTHR	Umbral para error de ajuste de línea	0 - 100
ATHR	Umbral de diferencia angular	0 - 90
DTHR	Umbral para vincular la distancia	1 - 100

La extracción de lineamientos se realizó sobre los mapas de sombras del CVDJ, RVA y DM. Cada mapa se usó como input del módulo LINE cuyo procesamiento inicial consistió en tomar un solo canal de la imagen de entrada para escalarlo a 8 bits con una rutina no lineal solo si la imagen es de 16 o 32 bits (PCI-Geomatica, 2005). Es decir que, al escalar la imagen a 8 bits, se reduce a 255 la cantidad de tonos en escala de grises o color que pueden ser representados en un píxel (Cornell University, 2000). A partir del mapa de sombras multidireccional escalado, se realizó la extracción automática de lineamientos en tres etapas principales: detección de bordes, umbralización y extracción de lineamientos (Soliman y Han, 2019). En el primer paso se usó el método de detección de borde basado en gradientes (Canny). Consistió en definir el radio de filtro (RADI), que especifica el tamaño del núcleo gaussiano utilizado como filtro durante la detección de bordes. Cuanto mayor fue el valor de RADI, menos ruido y detalles aparecieron en el resultado de detección de bordes. Después de filtrar la imagen, se calculó el gradiente para cada píxel y de esta manera se obtuvo la imagen de gradiente o fuerza de borde. En el segundo paso, se obtuvo una imagen binaria en la que los píxeles ON reflejan la presencia de un borde y los píxeles OFF lo contrario. Esto se llevó a cabo examinando varios valores en el umbral de gradiente de borde (GTHR), el cual especifica el gradiente en cada píxel de la imagen de fuerza de borde, que se aceptará como un borde o se mantendrá como fondo. Entre más alto fue el umbral de este parámetro mayor fue el número de píxeles ON (PCI-Geomatica, 2005; Soliman y Han, 2019).

En el tercer paso, se extrajeron las entidades lineales en una capa vector a partir de la imagen binaria usando varios parámetros, entre ellos el umbral de ajuste de curva (FTHR), que se da en número de píxeles e indica el nivel de tolerancia de ajustar varios segmentos de línea en una línea curvada. Entre más bajos fueron los valores de este último parámetro, más preciso era el ajuste entre la polilínea y los píxeles ON de la imagen binaria, aunque resultaba un mayor número de líneas. Adicionalmente, se experimentó con varios valores en el umbral de longitud (LTHR) para determinar la longitud mínima (en píxeles) que define si una curva se considera como línea. Finalmente, los parámetros ATHR y DTHR ayudaron a determinar el máximo ángulo en grados y la máxima distancia en píxeles respectivamente, para establecer la conexión entre dos líneas (PCI-Geomatica, 2005).

6.3. Control de calidad

Los lineamientos pueden ser el resultado de procesos o efectos geológicos, geomorfológicos o antropogénicos. Estas características superficiales lineales pueden incluir ríos, valles, carreteras, fallas, límites de campos agrícolas y crestas de montañas (Soto-Pinto et al., 2013; Soliman y Han, 2019). Dado que existen varios procesos que forman lineamientos, es importante hacer la discriminación de aquellos que no representan estructuras geológicas para obtener una mejor calidad en los resultados (Khalifani et al., 2019). Adicionalmente, es importante garantizar ciertas características en los lineamientos como la continuidad y las tendencias en las orientaciones para asemejar el eficaz método convencional (PCI-Geomatica, 2005; Soliman y Han, 2019). Para llevar a cabo lo anterior, se aplicaron un total de diez combinaciones de los seis parámetros que controlan el proceso de extracción automática. Entre las combinaciones seleccionadas, se encuentra la que arroja por defecto el software Geomatica® (PCI-Geomatica, 2005), dos determinadas en este estudio, y siete aplicadas en los estudios Abdullah et al. (2010), Abdullah et al. (2013), Thannoun (2013), Salui (2018), Alshayef y Javed (2018), Soliman y Han (2019) y Khalifani et al. (2019). Los resultados obtenidos, se evaluaron a través cuatro filtros con enfoques cuantitativos y usando una escala de 0.1 a 1 se clasificaron, siendo 1 la valoración del resultado que cumple con mayor satisfacción el criterio empleado. Después de evaluar cada capa de lineamientos en cada filtro, se promediaron los cuatro valores de clasificación obtenidos para elegir el resultado con las mejores puntuaciones. Teniendo en cuenta que diferentes combinaciones

de clasificaciones pueden dar el mismo valor promedio, se usó la desviación estándar para prescindir de uno de los resultados en empate, seleccionando aquel con menor variación respecto a su media aritmética. Finalmente, el resultado que más se ajusta a las características geológicas del terreno, se analizó usando el mapa de sombras y el mapa geológico, con el fin de eliminar aquellos lineamientos que no corresponden o no están asociados a las estructuras geológicas de la zona de estudio (Khalifani et al., 2019).

Filtro de dirección

Para llevar a cabo el análisis de las direcciones, primero se extrajeron las coordenadas (x, y) de los nodos iniciales y finales de cada lineamiento, basándose en el método "Nodo a Nodo", que define la dirección de un lineamiento independientemente de los segmentos de línea que lo forman. Este método usa la dirección de un segmento de línea simple que conecta el nodo inicial y final del elemento de línea. Nodo a Nodo da resultados satisfactorios porque los lineamientos extraídos no tienen líneas con forma de "anzuelo" o "herradura". Una ilustración simple del método se da en la figura 6 (Koçal, 2004). Por medio de la herramienta Propiedades de Línea del software RockWorks®, se tomaron las coordenadas para calcular la dirección de cada lineamiento en un rango de 0 a 180° y luego se graficaron usando la herramienta Diagrama de Rosas (RockWorks17, 2019). Con el fin de analizar las direcciones, se ignoró el orden inicial / final de los nodos en un elemento de línea y se distribuyó la población de direcciones equitativamente para obtener un diagrama de rosas simétrico. Así, por ejemplo, una línea en un ángulo de 45° es equivalente a una línea en un ángulo de 225° (Koçal, 2004; RockWorks17, 2019).

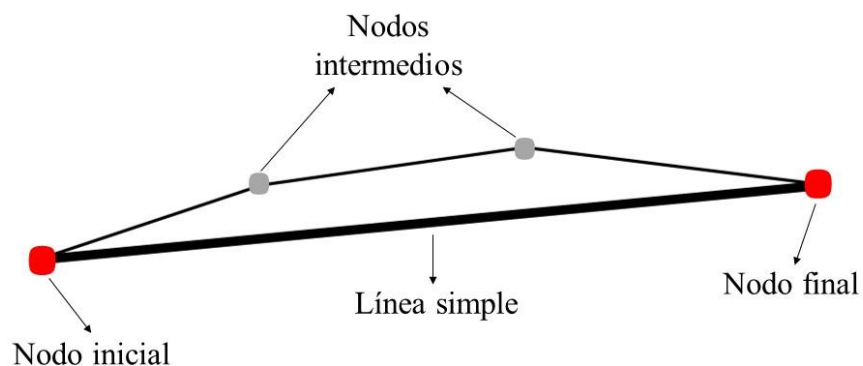


Figura 6. Ilustración del método Nodo a Nodo donde se muestra el trazo de una línea simple considerando solo el nodo inicial y final. Modificado de Koçal (2004).

El primer paso para identificar el resultado con las mejores características según este filtro es definir el referente con el que será comparado. Para este estudio, se determinó usar información secundaria de las fallas cartografiadas en cada zona de estudio, debido a que presentan menor subjetividad en su ubicación espacial producto de su calibración con trabajo de campo (Abdullah et al., 2010). Además, el tipo de lineamiento que se quiere identificar en este estudio se encuentra asociado a estas estructuras. Debido a la poca disponibilidad de información a escala detallada, se seleccionaron como referencia las fallas cartografiadas a escala 1:100.000 por el Servicio Geológico Colombiano para la Región del Valle de Aburrá (González, 1980; Calle y González, 1980; Mejía, 1984; Rodríguez et al. 2005; Nivia, 2011), La Dunita de Medellín (Rodríguez et al., 2005) y el Complejo Volcánico Doña Juana (Murcia y Cepeda, 1991; Murcia y Cepeda, 1991b; Orrego et al., 1996; Ruiz, 2002; Núñez, 2003). Después de elegir los referentes, se graficaron en un diagrama de rosas para identificar los rangos de dirección principales que fueron usados como referencia. Posteriormente, se creó un código en el software MATLAB[®] en donde se tomaron las direcciones de cada resultado y se seleccionaron aquellas que estaban en el rango de referencia. Seguidamente, se calculó en cada resultado la frecuencia relativa del rango definido y se le asignó una calificación mayor a los resultados que concentren mayor población en estos rangos de dirección.

Filtros de población y longitud total de lineamientos

Este filtro se realizó considerando la longitud total o acumulada y la población de los lineamientos como características cuantitativas principales de los resultados (Soliman y Han, 2019). Considerando que los lineamientos extraídos a través de técnicas de mapeo de campo convencionales tienen mayor continuidad y precisión, debido a que el sistema visual humano es altamente eficiente para extrapolar características lineales. Es decir, que un lineamiento que varía su intensidad en la imagen a lo largo de su longitud puede verse como un solo lineamiento largo (PCI-Geomatica, 2005). Se eligió el resultado que tuviera la mayor longitud acumulada en menor número de líneas, con el fin de obtener una mayor continuidad en el trazado de los lineamientos. Lo anterior se debe a que el aumento del detalle en el detector de bordes de la extracción automática puede aumentar la población, pero disminuir

la longitud promedio de los lineamientos (PCI-Geomatica, 2005). Para evaluar los resultados, en el caso de la población, se les asignó los mayores puntajes a aquellos con el menor número de lineamientos y para la longitud se les otorgó los mejores puntajes a los resultados con la mayor longitud acumulada de lineamientos.

Filtro de intersección

Una manera de identificar los lineamientos que coinciden con las estructuras geológicas de la zona de estudio (en este caso las fallas), es encontrando su intersección. Para realizar este método, primero se rasterizaron los shapefiles de los lineamientos extraídos automáticamente y de las fallas geológicas de referencia (Koçal, 2004). El proceso anterior se hizo asignando un valor de 1 a los píxeles que marcan la presencia de un lineamiento o falla y aquellos píxeles que representan zonas sin datos se les atribuyó un valor de 0. La consideración anterior se hizo con el fin de obtener dos capas ráster binarias, que luego se multiplicaron entre si a través de la herramienta Calculadora Raster del software ArcGIS®. El resultado de la operación anterior es una capa ráster binaria, que marca con un valor de 1 aquellos píxeles en las que hubo intersección entre las fallas y los lineamientos (figura 7) (Esri, 2019). Después de analizar el ráster de salida, se tomó la decisión de eliminar las intersecciones que están marcadas con un solo píxel, considerando que la presencia de estos datos genera ruido a la hora de evaluar los resultados. Además, estos píxeles suelen representar intersecciones perpendiculares entre un lineamiento y una falla, disposición geométrica que no es usual siguiendo el patrón de fracturas asociadas a una falla propuesto por Riedel (1929). Finalmente, la evaluación de cada resultado en este filtro se llevó a cabo contando el número de píxeles de intersección que tuvo cada uno y se les asignó una mayor calificación a aquellos resultados con mayor número de píxeles.

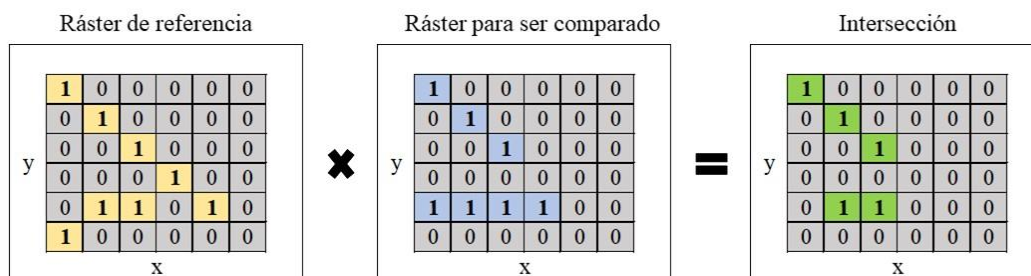


Figura 7. Ejemplo del proceso de intersección entre dos capas ráster a través de la herramienta Calculadora Ráster del software ArcGIS® (Esri, 2019).

6.4. Visualización de los resultados

Con el fin de obtener una mayor claridad en la presentación de los resultados y poder obtener la mayor información de ellos, se consideró graficar y analizar los resultados a través de varios métodos que respondan a los objetivos de los estudios Mariño et al. (2020), Duque et al. (2020) y Patiño et al. (2020).

Región del Valle de Aburrá

Con el objetivo de construir un modelo de deformación para la apertura de un valle intracordillerano en los Andes del norte, el estudio de Mariño et al. (2020) proponen un modelo cinemático en el que se divide la RVA en zonas con distintos comportamientos estructurales. Para aportar al desarrollo de esta investigación, se dividió la RVA en cinco zonas elongadas paralelamente a las tendencias estructurales presentes y usando como límites las fallas definidas por Mariño et al. (2020). Posteriormente, se tomaron los lineamientos de cada zona y se graficaron en un diagrama de rosas para identificar los patrones estructurales de cada una y encontrar su relación con los tensores de esfuerzos medidos por Mariño et al. (2020). Adicionalmente, se tomó una zona localizada del área de estudio para analizar las características lineales asociadas a un patrón de bloques rotados. Para llevar a cabo lo anterior, se construyó un mapa de sombras con la metodología previamente descritas usando un DEM de 12m de resolución espacial (Dataset ASF DAAC, 2011). Posteriormente, se redefinieron a través de este nuevo mapa de sombras los lineamientos seleccionados para la RVA. Para redefinirlos, se seleccionaron los lineamientos que representan las estructuras geológicas usando el mapa geológico y las fallas cartografiadas. Finalmente, se graficaron los lineamientos en un diagrama de rosas y se delimitaron los posibles bloques rotados usando las fallas y los lineamientos extraídos.

Complejo Volcánico Doña Juana

Con la intención de contribuir a llenar los vacíos en el conocimiento de las interacciones vulcano-tectónicas en los Andes del Norte, Duque et al. (2020) tomaron como caso de estudio el CVDJ. Para mejorar el conocimiento de esta zona a través de sensores remotos, se graficó

el diagrama de rosas para identificar las tendencias principales. Por otra parte, se graficaron en un diagrama de rosas los lineamientos contenidos en una estructura romboédrica (10x17), definida como bloque de basamento y delimitada a través de fallas y lineamientos marcados manualmente por Duque et al. (2020). Lo anterior con el fin de encontrar una correspondencia en los patrones de fracturamiento y los datos de planos de fallas medidos por Duque et al. (2020). Finalmente, se tomaron los diagramas mencionados para hacer un análisis detallado de los patrones estructurales que reflejan los lineamientos del CVDJ y relacionarlos con los tensores de esfuerzos medidos por Duque et al. (2020).

Dunita de Medellín

De acuerdo con Patiño et al. (2020) el objetivo del estudio es determinar las direcciones de flujo de agua subterránea, a partir del análisis estructural y estadístico del macizo rocoso. Teniendo en cuenta lo anterior y tomando la base de datos de estructuras recolectada por Patiño et al. (2020), se graficó el diagrama de rosas de los lineamientos con el fin de comparar y encontrar una relación con las diaclasas de la DM. Adicionalmente, se realizó un mapa de lineamientos que, a través del color de la polilínea, se pudo identificar la orientación de esta dentro de los 9 rangos de orientación definidos (N-S, NNE-SSW, NE-SW, ENE-WSW, E-W, ESE-WNW, SE-NW, SSE-NNW y N-S). Para obtener esto, se identificaron las direcciones de cada lineamiento y estas se añadieron como un atributo en el shapefile. Después, se clasificaron las polilíneas a partir de este atributo y se crearon nueve categorías.

7. Resultados

Al cambiar los seis parámetros de control del proceso de extracción automática, se obtienen distintos resultados, como la longitud total y la población de lineamientos, además de las direcciones e intersecciones de estos con las fallas de las zonas de estudio. Las combinaciones de parámetros aplicadas se muestran en la tabla 2 con su respectiva identificación y origen.

Tabla 2. Combinación de los parámetros que controlan la extracción automática de lineamientos, con su respectiva referencia e identificación.

Capa ID	Parámetros						Origen de la combinación
	RADI	GTHR	LTHR	FTHR	ATHR	DTHR	
1	10	50	30	3	30	10	Alshayef y Javed (2018)

2	5	75	10	2	20	1	Thannoun (2013)
3	30	10	50	5	30	30	Soliman y Han (2019)
4	7	73	12	4	25	2	Khalifani et al. (2019)
5	12	90	30	10	30	20	Abdullah et al. (2010)
6	12	80	30	10	30	15	Abdullah et al. (2013)
7	12	100	60	10	30	20	Salui (2018)
8	10	100	30	3	30	20	Por defecto
9	30	60	30	3	30	25	Este proyecto
10	35	40	35	5	30	25	Este proyecto

A continuación, se exhibirá el resultado del control de calidad realizado a cada capa de lineamientos proveniente de cada combinación de parámetros, donde finalmente se seleccionó la capa con las mejores y más cercanas cualidades al referente (fallas). Con el fin de obtener un orden coherente con la metodología, se subdividieron los resultados de cada zona en los siguientes ítems: control de calidad, lineamientos finales y visualización de los resultados.

7.1. Región del Valle de Aburrá

Control de calidad

Con una población de 1244 datos tomados de 6 planchas geológicas (130, 131, 146, 147, 166 y 167) (González, 1980; Calle y González, 1980; Mejía, 1984; Rodríguez et al. 2005; Nivia, 2011), la figura 8 muestra que las fallas de esta zona tienen una fuerte tendencia en la orientación NNW-SSE, concentrando más del 30 % de los lineamientos, específicamente en el rango de azimut (160-180°). Por otro lado, se ve la presencia de una tendencia estructural en menor proporción en el rango de azimut 030°-050°, concentrando más del 8% de los datos.

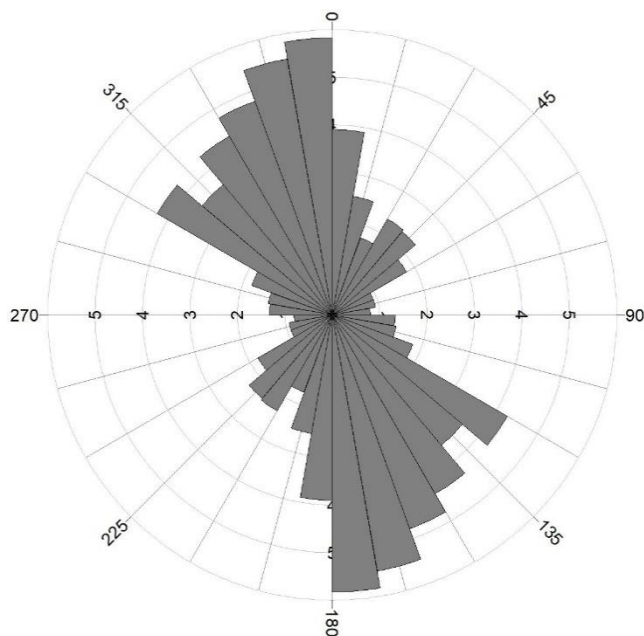


Figura 8. Diagrama de rosas de las fallas cartografiadas a escala 1:100.000 en la Región del Valle de Aburrá. Tomado de González (1980); Calle y González (1980); Mejía (1984); Rodríguez et al. (2005); y Nivia (2011).

En la tabla 3 se observa una relación proporcional entre la longitud total y la población de los lineamientos. El filtro de dirección refleja el porcentaje de lineamientos que se encuentran orientados en el rango de azimuth principal (160-180°), identificado en la figura 8 para la RVA. Además, este filtro muestra la menor variabilidad respecto a los demás, con un valor mínimo de 12,31% y máximo de 15,20. Finalmente, el filtro de intersección también presenta baja variabilidad excepto por las capas 4 y 7.

Tabla 3. Valor de las cuatro características cuantitativas medidas para los lineamientos de la RVA.

Capa ID	Filtro de longitud (metros)	Filtro de población	Filtro de dirección (%)	Filtro de intersección (píxeles)
1	20561863	27872	12,8774	8601
2	16002904	63909	14,6971	8076
3	13710915	9954	14,6964	5724
4	30646200	90898	12,3194	13543
5	23619569	27174	12,6494	9816
6	24424630	29563	12,6585	10084
7	9759913	6981	13,2013	4487
8	16333418	19593	14,2389	7017
9	17373172	17657	15,2057	7308
10	15069656	13577	13,2113	6431

Acorde con la tabla 4, la capa de lineamientos producto de la combinación número 9 de los parámetros, presenta la mayor puntuación en los diferentes filtros aplicados en el control de calidad. En general el rango del promedio estuvo entre 50 y 60, solo las capas 7 y 9 están por fuera de ese rango con el menor y el mayor valor respectivamente.

Tabla 4. Calificación de cada capa de lineamientos en los diferentes filtros. La capa número 9 (resaltada con color gris), obtuvo la mejor puntuación para la RVA.

Capa ID	Clasificación del filtro de longitud	Clasificación del filtro de población	Clasificación del filtro de dirección	Clasificación del filtro de intersección	Promedio	Desviación estándar
1	0,7	0,4	0,4	0,7	0,55	0,17
2	0,4	0,2	0,9	0,6	0,53	0,30
3	0,3	0,9	0,8	0,2	0,55	0,35
4	1	0,1	0,1	1	0,55	0,52
5	0,8	0,5	0,2	0,8	0,58	0,29
6	0,9	0,3	0,3	0,9	0,60	0,35
7	0,1	1	0,5	0,1	0,43	0,43
8	0,5	0,6	0,7	0,4	0,55	0,13
9	0,6	0,7	1	0,5	0,70	0,22
10	0,3	0,8	0,6	0,3	0,50	0,24

Lineamientos finales

De acuerdo con la figura 9, el mapa de sombras multidireccional exhibe una superficie topográfica irregular con drenajes principales orientados en sentido N-S. En la zona SW se logra apreciar una depresión orientada en sentido NW- SE, con una textura superficial generalmente suavizada, aunque presente irregularidades localizadas. Por otra parte, en la parte central se observa la depresión intramontana del Valle de Aburrá con una orientación N-S, no obstante, esta orientación cambia a la altura de los 6° 20' N, al sentido SW-NE. Adicionalmente, la zona E y N del mapa de sombras muestra una planicie con una textura generalmente suavizada. Finalmente, en las zonas con topografía irregular (oeste) se puede ver una alta concentración de lineamientos respecto a las zonas con topografía plana (este).

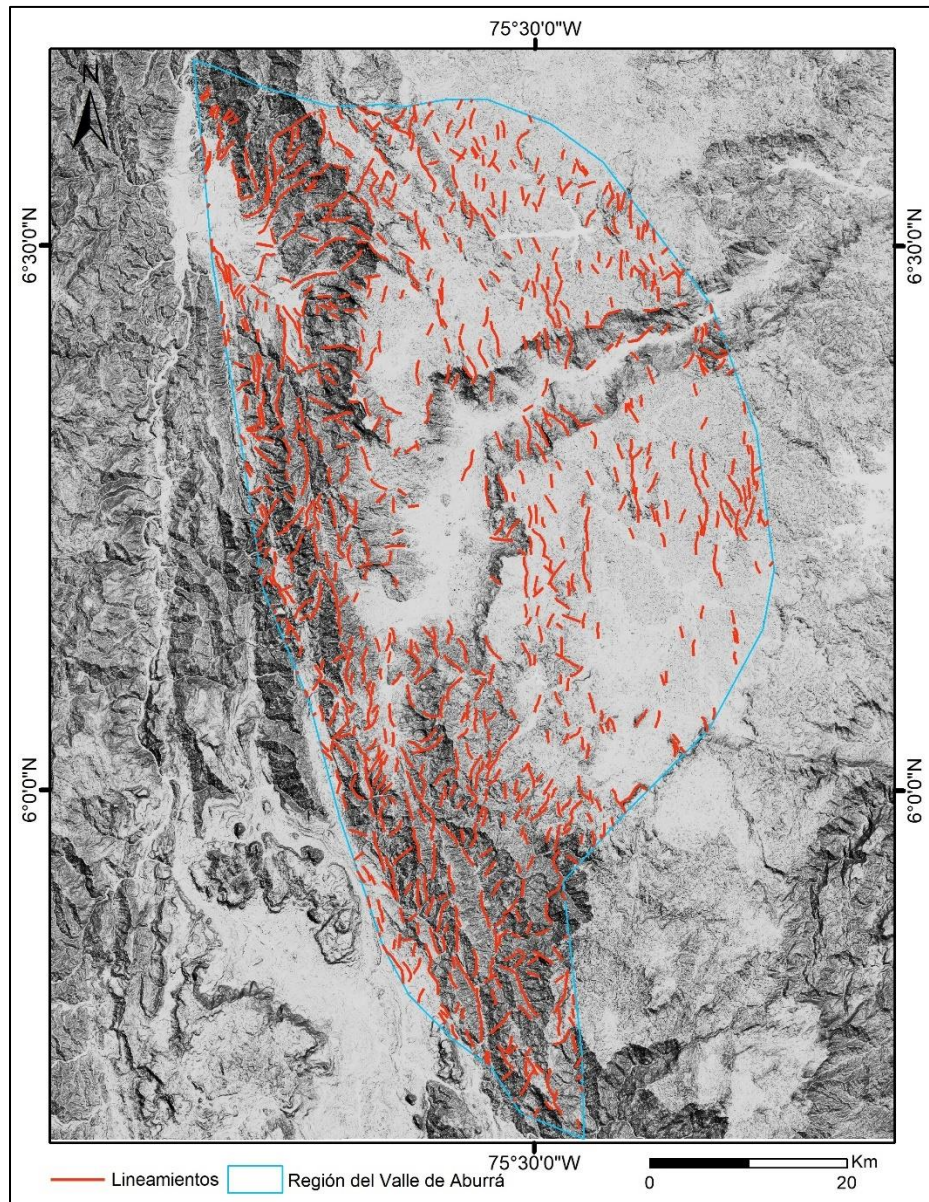


Figura 9. Mapa de sombra multidireccional y lineamientos extraídos automáticamente y depurados de la RVA.

El diagrama de rosas de la figura 10, se ve una clara tendencia en la orientación NNW-SSE de los lineamientos extraídos automáticamente para la RVA. Específicamente, en el rango de azimut 160-180°, se concentra más del 24% de los datos. Por otra parte, se ve una muy baja concentración de menos del 1% en la orientación W-E.

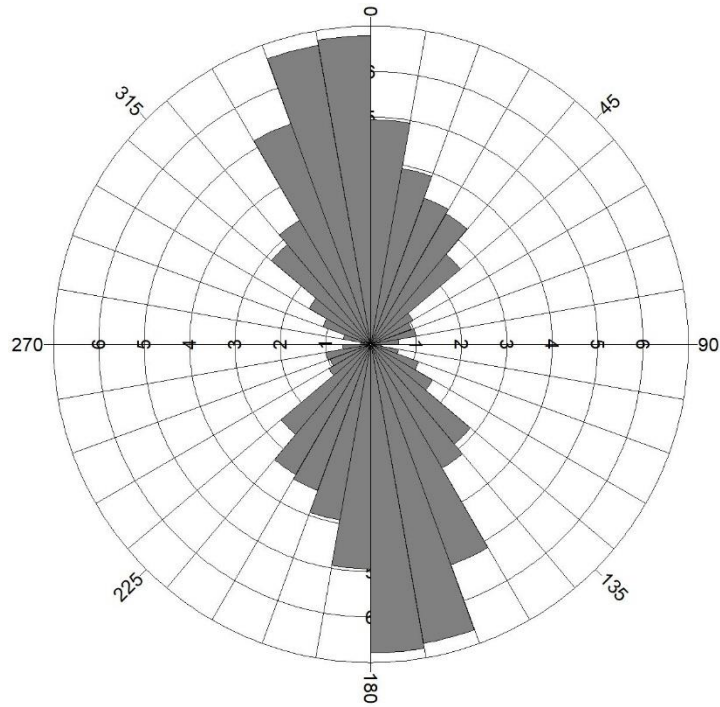


Figura 10. Diagrama de rosas de los lineamiento extraídos automáticamente y depurados en la RVA.

Bloques rotados

Después de analizar el relieve sombreado de la RVA con el fin de encontrar características estructurales que permitan entender el comportamiento cinemático de esta zona, se pudo identificar un área con ciertas particularidades estructurales, ubicada en la ladera oriental del Valle de Aburrá (figura 11). De acuerdo con la figura 11A, se observa en la parte central un patrón en sentido N-S, que da lugar a una serie de lineamientos escalonados, los cuales tienen una correspondencia con la orientación de las fallas cartografiadas en esta zona. Asimismo, en la figura 11B se considera el modelo rígido de dominó que exhibe una serie de bloques estructurales rotados, como el modelo asociado a este tipo de patrón estructural. La secuencia de bloques rotados se encuentra limitada a ambos costados, por fallas orientadas N-S, como la falla La Acuarela al costado W y falla La Honda al costado E (figura 11). Adicionalmente, teniendo en cuenta el modelo y las características superficiales, estos bloques están delimitados entre sí por una serie de fallas paralelas con cinemática sinextral, que en algunas zonas están inferidas en función de los lineamientos (líneas discontinuas) y en otros está definida por una falla cartografiada (línea continua) (figura 11B).

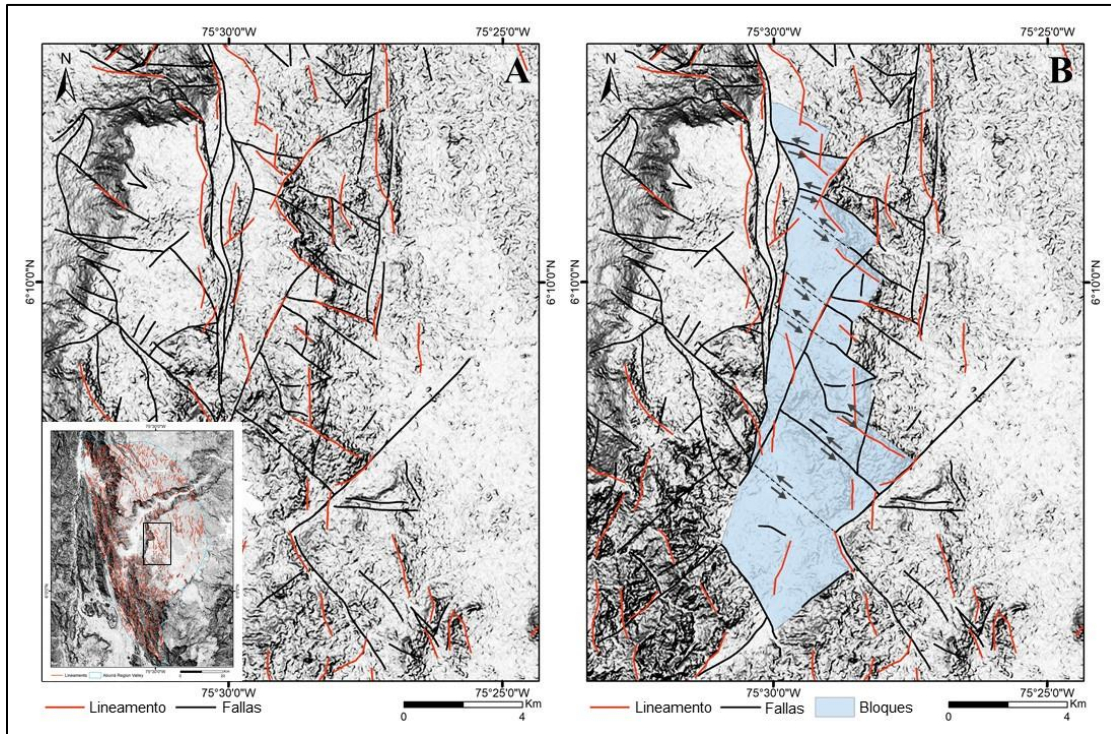


Figura 11. (A) Mapa de lineamientos y fallas de la zona este del Valle de Aburrá. (B) posibles bloques rotados, delimitados a través de las fallas y lineamientos de la zona.

Visualización de resultados

El proceso de extracción de lineamientos para la RVA permite analizar la variación de la orientación de los lineamientos a lo largo del Valle de Aburrá y su entorno, con el fin de interpretar cómo se representan y varían los procesos deformacionales a lo largo del área de estudio. A mayor escala, ambos flancos del valle (zonas 1, 2, 4 y 5 en la figura 12) muestran una clara tendencia de alineamiento dominado por estructuras orientadas entre N-S a NNW-SSE, con concentraciones del 15 al 25% de los datos para cada zona, en los rangos de orientación mencionados. La tendencia anterior representaría el principal control estructural en el área de estudio, según Lachaine (1999); Meshkani et al. (2013); Hashim et al. (2013). Sin embargo, la parte central del Valle de Aburrá (zona 3 en la figura 12) está dominada por un grupo de lineamientos orientados NE-SW con una concentración de más del 30 % de los datos. A parte de la tendencia principal ya mencionada, el diagrama de rosas de la zona 4 muestra dos tendencias orientadas NE-SW y NW-SE, con concentraciones del 6 y 8% de los datos respectivamente, reflejando así los patrones identificados en la figura 11.

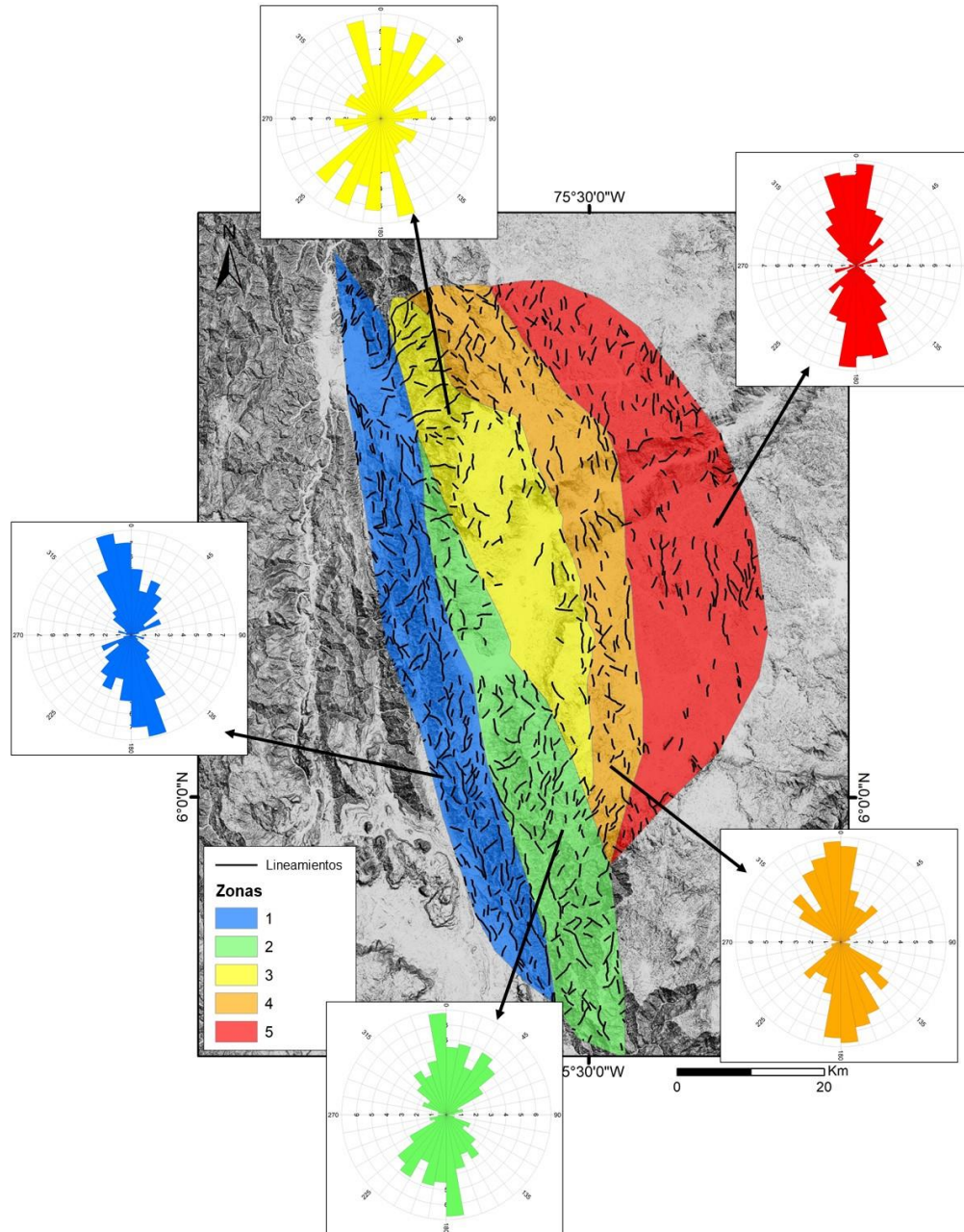


Figura 12. Zonas de cizalla de la RVA. Las líneas negras son lineamientos interpretados durante el presente trabajo. Los diagramas de rosas están codificados por colores con los mismos colores de las zonas de cizalla. Intervalo del diagrama de rosas: 10 °.

7.2. Complejo Volcánico Doña Juana

Control de calidad

Con una población de 218 datos tomados de 6 planchas geológicas (386, 387, 410, 411, 429 y 430) (Murcia y Cepeda, 1991; Murcia y Cepeda, 1991; Orrego et al., 1996; Ruiz, 2002; Núñez, 2003), la figura 8 muestra que las fallas de esta zona tienen una fuerte tendencia en la orientación NE-SW, concentrando más del 35 % de los lineamientos, específicamente en el rango de azimut 030 a 050°. Por otro lado, se ve la presencia de una tendencia estructural en menor proporción en la orientación W-E, concentrando más del 8% de los datos.

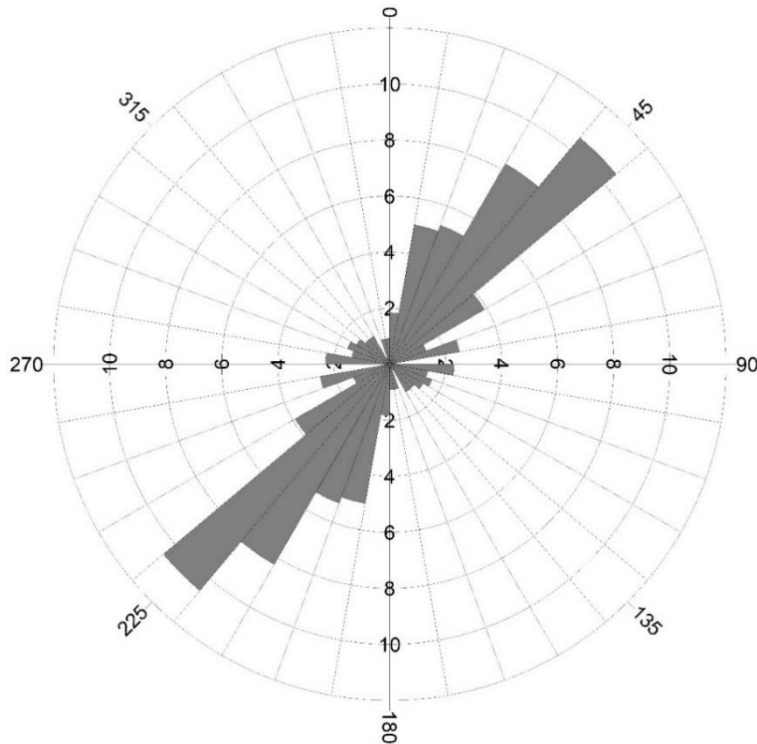


Figura 13. Diagrama de rosas de las fallas a escala 1:100.000 presentes en el CVDJ. Tomado de Murcia y Cepeda (1991), Murcia y Cepeda (1991b), Orrego et al. (1996), Ruiz (2002) y Núñez (2003).

En la tabla 5 se observa una relación proporcional entre la longitud total y la población de los lineamientos. Por otro lado, el filtro de dirección refleja el porcentaje de lineamientos que se encuentran orientados en el rango de azimut principal (030-050°), identificado en la figura 13 para el CVDJ. Además, este filtro exhibe una gran variabilidad, con un valor mínimo de 15,84% y máximo de 29.20%, y un promedio del 19,03%. Para finalizar, en el filtro de intersección y de población de la capa 2, se muestra un valor anómalo muy por debajo de la mediana (2405 píxeles y 5592 lineamientos, respectivamente).

Tabla 5. Valor de las cuatro características cuantitativas de los lineamientos medidas para el CVDJ.

Capa ID	Filtro de longitud (metros)	Filtro de población	Filtro de dirección (%)	Filtro de intersección (píxeles)
1	4294265	5698	18,5328	2375
2	278009	428	29,2056	231
3	5866935	5894	15,8466	2587
4	1488041	2110	24,0758	1106
5	5748736	6894	16,2460	2957
6	5684190	7037	16,2853	2864
7	3502416	3498	18,5820	1895
8	3719496	4667	19,3272	2181
9	5564829	5914	16,3510	2476
10	5321590	5487	15,9103	2436

Acorde con la tabla 6, la capa de lineamientos producto de la combinación número 8 de los parámetros, presenta el valor promedio más alto en la puntuación del control de calidad, al igual que las capas 3, 5 y 6. No obstante, tiene una desviación estándar muy baja, lo que la posiciona como la combinación mejor calificada en esta zona de estudio.

Tabla 6. Calificación de cada capa de lineamientos en los diferentes filtros. La capa número 8 (resaltada con color gris), obtuvo la mejor puntuación para el CVDJ.

Capa ID	Clasificación del filtro de longitud	Clasificación del filtro de población	Clasificación del filtro de dirección	Clasificación del filtro de intersección	Promedio	Desviación estándar
1	0,5	0,5	0,6	0,5	0,53	0,05
2	0,1	1	1	0,1	0,55	0,52
3	1	0,4	0,1	0,8	0,58	0,40
4	0,2	0,9	0,9	0,2	0,55	0,40
5	0,9	0,1	0,3	1	0,58	0,44
6	0,8	0,2	0,4	0,9	0,58	0,33
7	0,3	0,8	0,7	0,3	0,53	0,26
8	0,4	0,7	0,8	0,4	0,58	0,21
9	0,7	0,3	0,5	0,7	0,55	0,19
10	0,6	0,6	0,2	0,6	0,50	0,20

Lineamientos finales

Según la figura 14, el mapa de sombras multidireccional del CVDJ, exhibe una topografía relativamente plana en la zona NW y NE. Las zonas SE y SW reflejan una topografía montañosa, sin embargo, la zona SE presenta una textura más rugosa que la zona SW. Asimismo, se distingue claramente la topografía que forman los depósitos volcánicos en la

parte central NE y SW, del Volcán Doña Juana y Ánimas. Finalmente, los lineamientos de la zona W del mapa (figura 14), son relativamente más elongados que los lineamientos de la zona E.

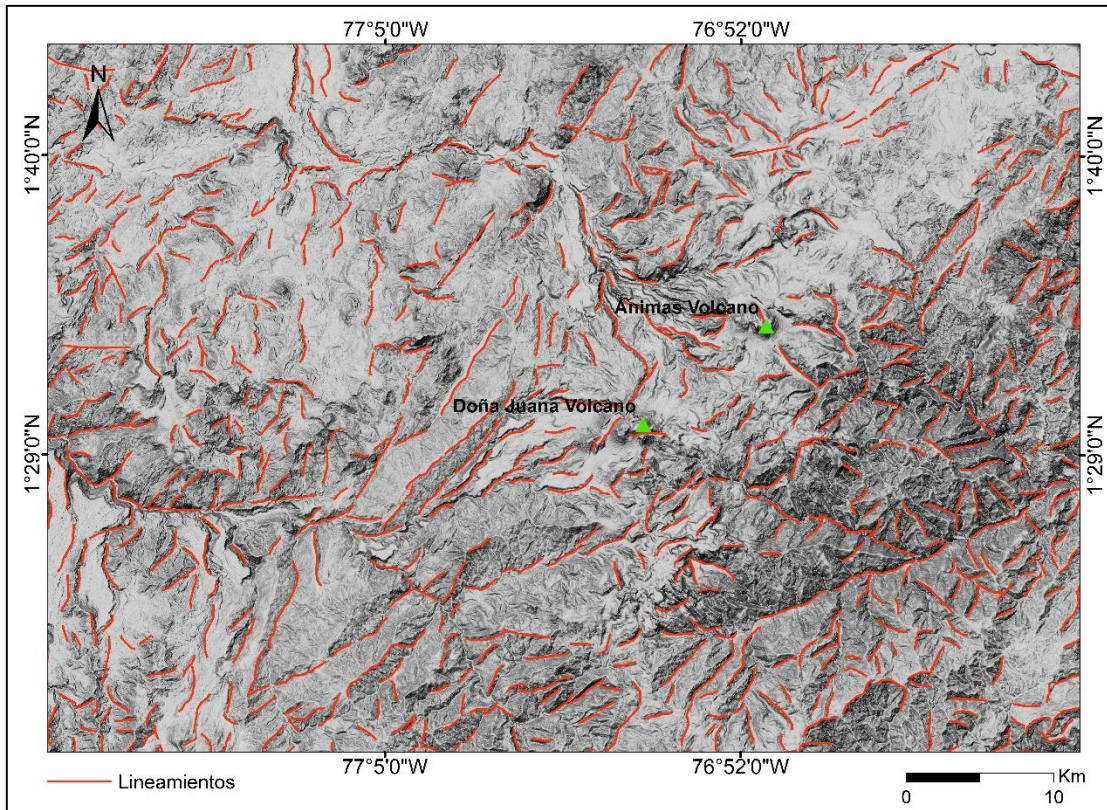


Figura 14. Mapa de sombra multidireccional y lineamientos extraídos automáticamente y depurados del CVDJ.

De acuerdo con el diagrama de rosas de los lineamientos del CVDJ (figura 15), existe una tendencia principal en la orientación NE-SW, específicamente en el rango de azimut 040-060°, concentrando más del 20% de los lineamientos. En las orientaciones N-S y E-W, se ven tendencias de proporciones similares, concentrando más del 10% de los datos en cada una. Finalmente, se identifica una tendencia menor en la orientación NW-SE, acumulando alrededor del 5 % de los datos.

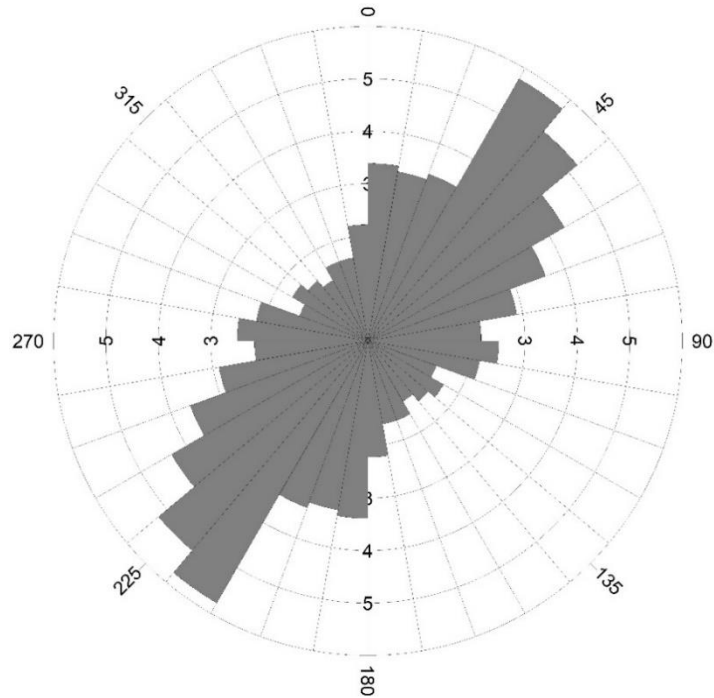


Figura 15. Diagrama de rosas de los lineamientos regionales extraídos automáticamente y depurados para el CVDJ.

Visualización de resultados

A partir de los lineamientos trazados manualmente y las fallas cartografiadas de la zona de estudio, Duque et al. (2020) delimitó una zona llamada bloque de basamento, que contiene los tres edificios volcánicos del CVDJ y el Volcán Ánimas. Acorde con la figura 16, los lineamientos extraídos en este trabajo y contenidos en dicha zona reflejan una clara correspondencia con los lineamientos trazados manualmente por Duque et al. (2020). Adicionalmente, estos lineamientos también muestran una semejanza con las fallas regionales en la parte sur. No obstante, en la parte norte muestran unas variaciones respecto a las fallas provocado por el relieve asociado a los flujos volcánicos y cuya orientación principal en esta área del bloque de basamento es NNW-SSE. Por otro lado, los lineamientos alrededor del Volcán Doña Juana muestran una orientación principal NE-SW con una tendencia menor E-W, sin embargo, el Volcán Ánimas exhibe una fuerte orientación E-W con un solo lineamiento orientado NW-SE. Finalmente, Se reconocieron tres tendencias estructurales tectónicas en esta zona: (1) NE-SW, (2) E-W y (3) NW-SE, siendo los patrones

estructurales NE-SW los dominantes de en las estructuras asociadas a las fallas regionales Silvia-Pijao, Tablón, Buesaco y San Jerónimo (figura 16).

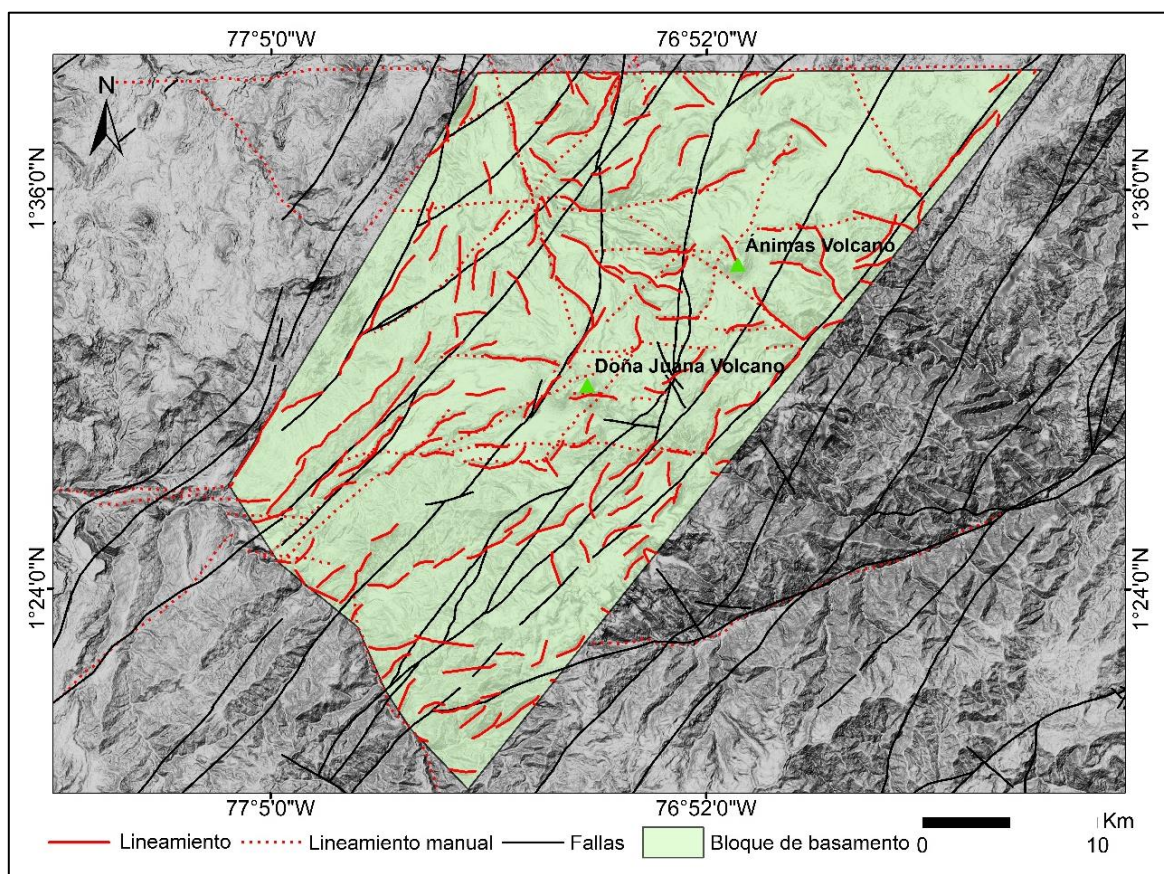


Figura 16. Mapa de los lineamientos contenidos en la zona definida por Duque et al. (2020) como bloque de basamento.

De acuerdo con la figura 17, se observan dos tendencias principales en los rangos de azimut 050-060° y 030-040°, concentrando más del 22% de los datos. También se identifican una tendencia media en el rango de azimut 090-110°, conteniendo más del 14% de los datos. Por otro lado, se exhibe una tendencia menor en el rango de azimut 150-160°, concentrando menos del 4% de los datos. Por último, se identificaron las tendencias estructurales SW-NE, E-W y NW-SE al igual que en la figura 16.

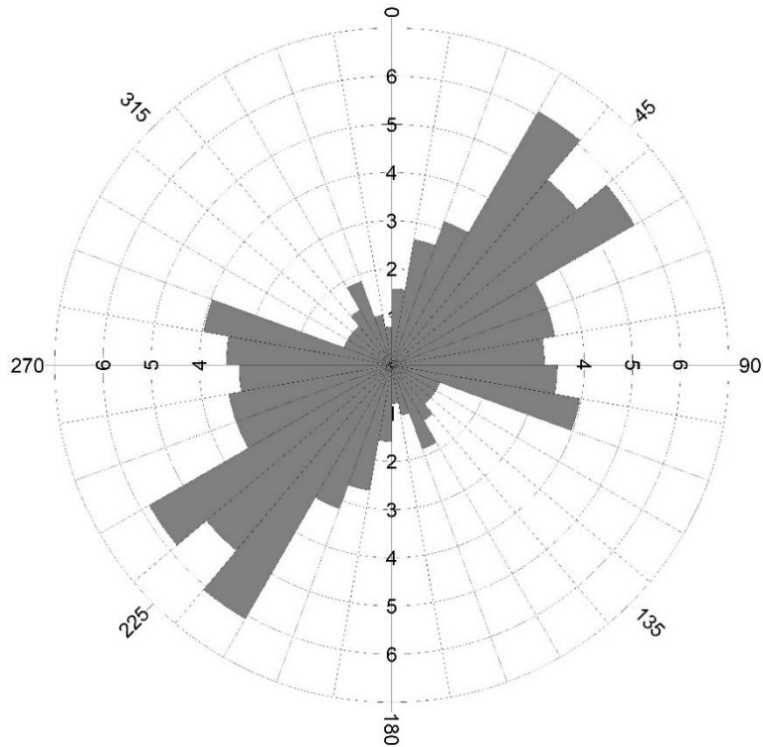


Figura 17. Diagrama de rosa de los lineamientos locales contenidos en la zona denominada como bloque de basamento (figura 16).

7.3. Dunita de Medellín

Control de calidad

Con una población de 55 datos tomados de la plancha geológica 147 (Rodríguez et al. 2005), la figura 18 muestra que las fallas de esta zona tienen una fuerte tendencia en la orientación N-S, concentrando más del 20% de los lineamientos, específicamente en el rango de azimut (350-010°). Por otro lado, se ve la presencia de una tendencia estructural no menos importante en el rango de azimut 100-110°, concentrando más del 10% de los datos. Finalmente, se identificó una tendencia menor con una orientación NE-SW, concentrando menos del 6% de los datos.

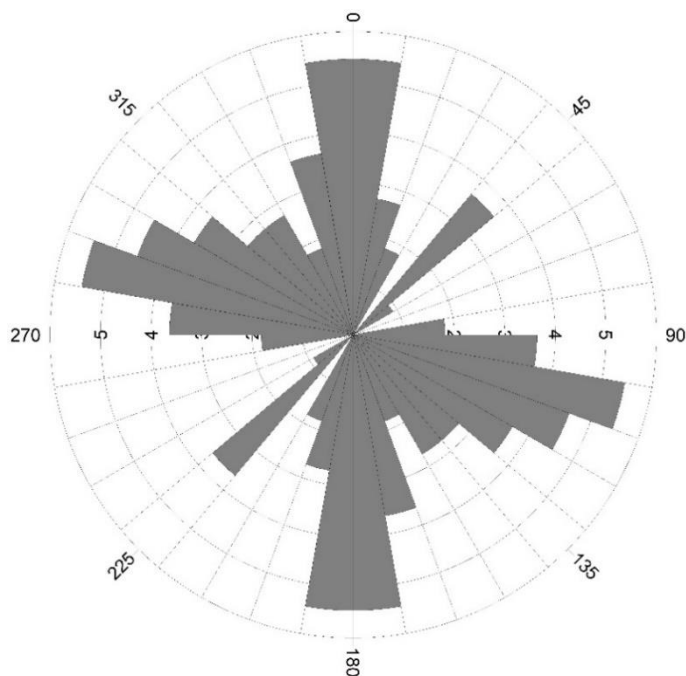


Figura 18. Diagrama de rosas de las fallas a escala 1:100.000 presentes en la DM. Tomadas de Rodríguez et al. (2005).

En la tabla 7 se observa una relación proporcional entre la longitud total y la población de los lineamientos. Por otra parte, el filtro de dirección refleja el porcentaje de lineamientos que se encuentran orientados en los rangos de azimuth principal (100-110° y 000-010°), identificado en la figura 18 para la DM. Finalmente, el filtro de dirección obtuvo la menor variabilidad respecto a los demás filtros, con una desviación estándar de 1,4%.

Tabla 7. Valor de las cuatro características cuantitativas medidas para los lineamientos de la DM.

Capa ID	Filtro de longitud (metros)	Filtro de población	Filtro de dirección (%)	Filtro de intersección (pixeles)
1	178941	1103	13,3273	376
2	34969	249	9,6386	90
3	205239	731	13,9535	377
4	94461	622	11,2540	231
5	205302	1131	13,0858	507
6	208487	1184	13,9358	489
7	85087	298	12,7517	240
8	142296	792	12,5000	347
9	210919	1029	12,5364	406
10	210235	954	10,6918	355

Acorde con la tabla 8, la capa de lineamientos producto de la combinación número 3 de los parámetros, presenta el valor promedio más alto en la clasificación del control de calidad y una desviación estándar baja. Por otra parte, la capa número 2 presentó la puntuación más baja en tres de los cuatro filtros, posicionándola como la combinación con los resultados menos semejantes al ajuste estructural de la DM.

Tabla 8. Calificación de cada capa de lineamientos en los diferentes filtros. La capa número 3 (resaltada con color gris), obtuvo la mejor puntuación para la DM.

Capa ID	Clasificación del filtro de longitud	Clasificación del filtro de población	Clasificación del filtro de dirección	Clasificación del filtro de intersección	Promedio	Desviación estándar
1	0,5	0,3	0,8	0,6	0,55	0,21
2	0,1	1	0,1	0,1	0,33	0,45
3	0,6	0,7	1	0,7	0,75	0,17
4	0,3	0,8	0,3	0,2	0,40	0,27
5	0,7	0,2	0,7	1	0,65	0,33
6	0,8	0,1	0,9	0,9	0,68	0,39
7	0,2	0,9	0,6	0,3	0,50	0,32
8	0,4	0,6	0,4	0,4	0,45	0,10
9	1	0,4	0,5	0,8	0,68	0,28
10	0,9	0,5	0,2	0,5	0,53	0,29

Lineamientos finales

El relieve de la Dunita de Medellín está caracterizado por zonas con cambios abruptos de pendiente y zonas relativamente planas. la figura 19 refleja las características previamente mencionadas en la zona W del mapa, exhibiendo una ladera larga de pendiente alta (60-80°) correspondiente a la ladera E del Valle de Aburrá. En la parte central se ve una superficie relativamente lisa llamada El Plan, limitada al W por una ladera de longitud corta llamada Escarpe de Paysandú (Rodríguez et al., 2005). Al W del escarpe mencionado, se identifica una textura rugosa al igual que en la zona sur del mapa. Finalmente, la zona S presenta una menor población de lineamientos respecto a la zona N. Para terminar, los lineamientos muestran una longitud relativamente similar con un promedio de 531 metros, a lo largo de toda la zona de estudio.

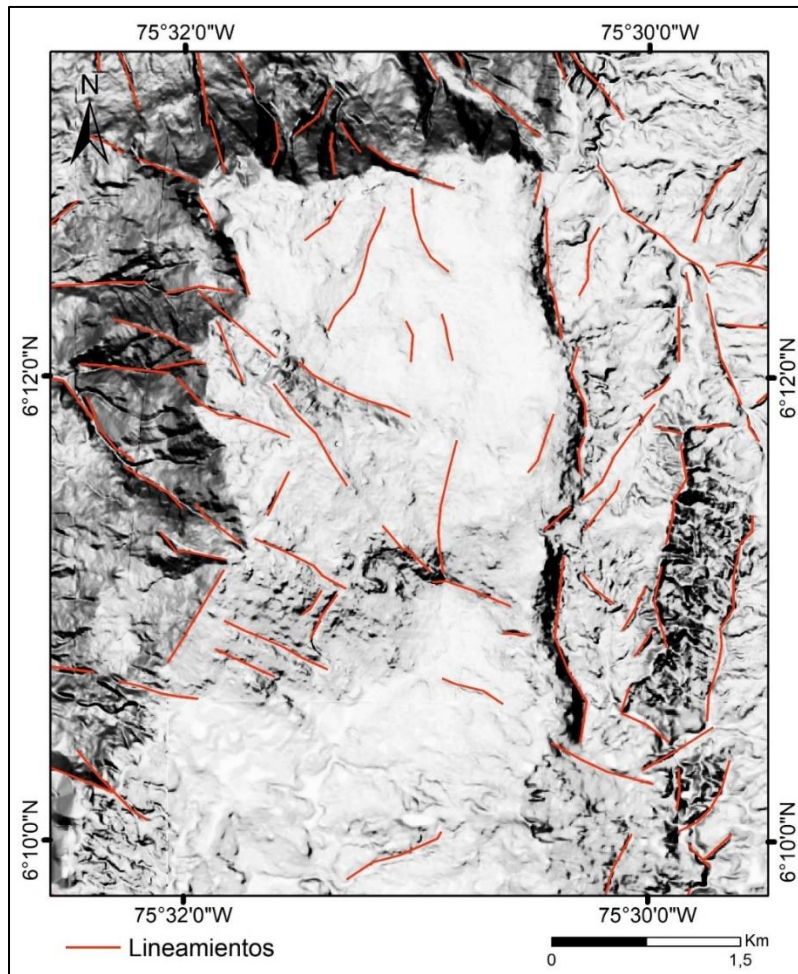


Figura 19. Mapa de sombras multidireccional junto con los lineamientos depurados de la DM.

Según la figura 20, los lineamientos de la DM no reflejan un patrón estructural muy marcado, sin embargo, se logra apreciar una tendencia N-S, específicamente en el rango de azimut 000-010°, que concentra más del 8% de los datos. También se observa una tendencia poco definida en la orientación NW-SE, donde se concentran más del 45% de los datos. Finalmente, existe una tendencia menor en la orientación NE-SW, específicamente en el rango de azimut 020-040°, con un porcentaje de población un poco mayor al 10%.

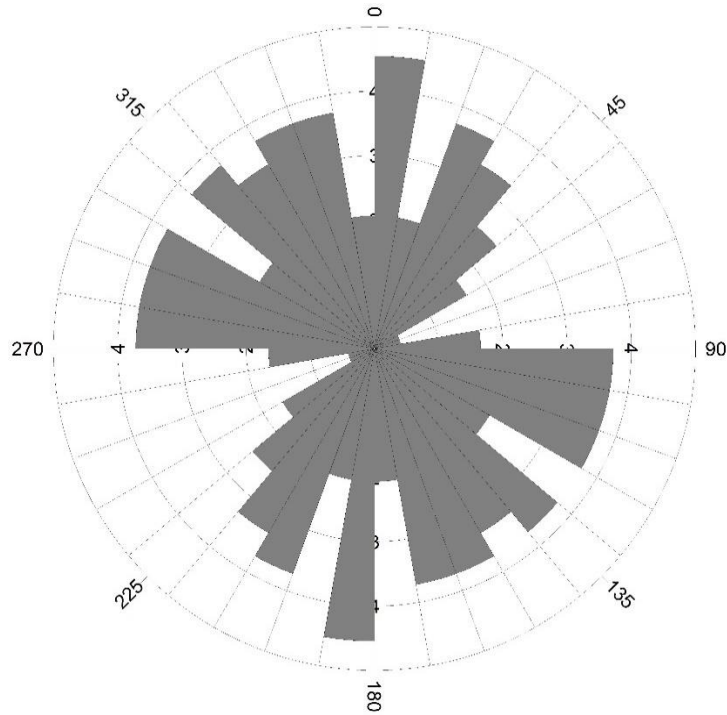


Figura 20. Diagrama de rosas de los lineamiento extraídos automáticamente y depurados de la DM.

Visualización de resultados

De acuerdo con la figura 21, los lineamientos presentes en la zona W del mapa, muestran una orientación preferencial E-W con un componente menor NW-SE. En la zona W se observa mayor diversidad en las orientaciones, no obstante, la mayor parte están orientadas N-S, NNE-SSW y NE-SW. Adicionalmente, existe un componente menor en la orientación NNW-SSE. Los lineamientos en la zona S muestran dos tendencias al NE- SW y NW-SE en las orientaciones. Asimismo, la zona central (El Plan) presenta estas mismas orientaciones con un componen mayor en la orientación NW-SE. Además, existe algunos lineamientos con orientación N-S y NNE-SSW. Para finalizar, la zona N exhibe una fuerte tendencia en las orientaciones N-S, NNW-SSE y NW-SE.

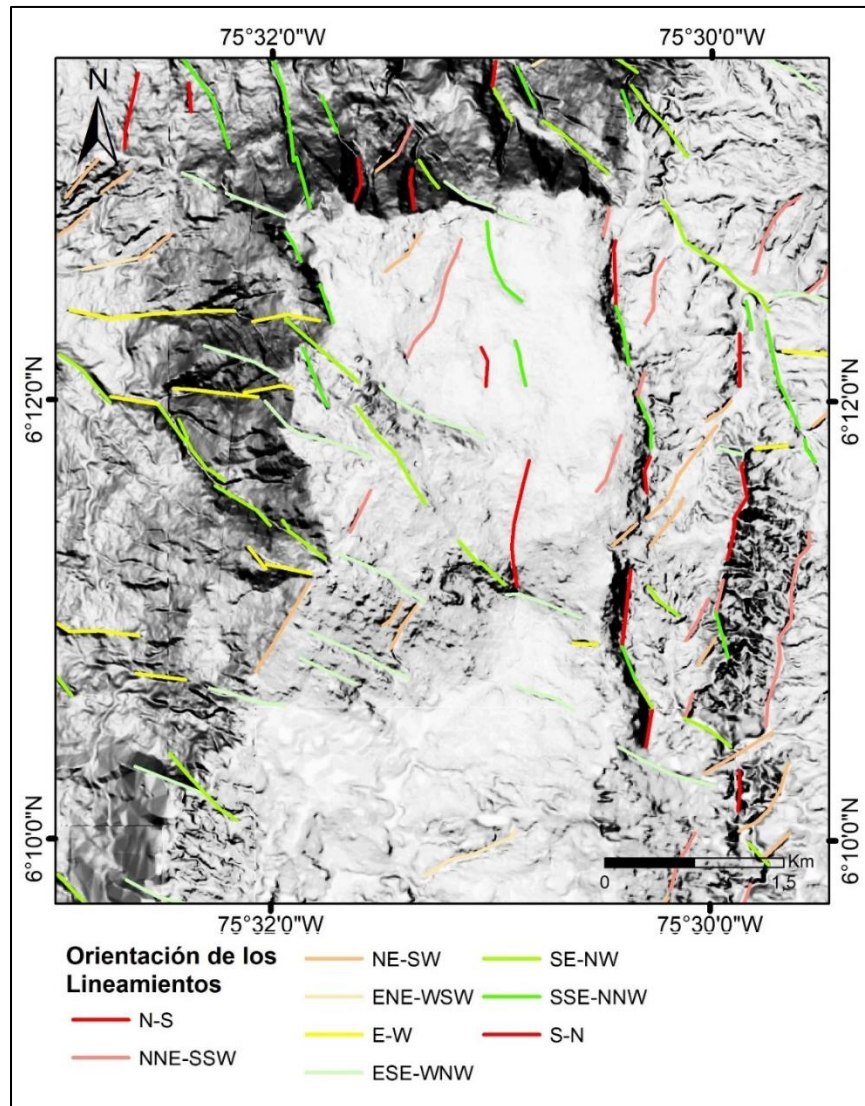


Figura 21. Mapa que representa la orientación de cada lineamiento a través de un color. Los rangos de azimut de cada color son: 000-010° (N-S), 010-030° (NNE-SSW), 030-060° (NE-SW), 060-080° (ENE-WSW), 080-100° (E-W), 100-120° (ESE-NNW), 120-150° (SE-NW), 150-170° (SSE-NNW) y 170-180° (N-S).

8. Discusión

Mapa de sombras multidireccional

Considerando que los relieves sombreados iluminados desde una sola dirección presentan una desventaja debido a su anisotropía (dependencia direccional). Lo anterior produce que las estructuras elongadas paralelas a la dirección de iluminación tengan una menor longitud de la real o sean imperceptibles (Tzvetkov, 2018). En este sentido, los relieves sombreados desde múltiples direcciones representan una ventaja respecto a los mapas iluminados desde

una dirección puesto que permiten reconocer la mayoría de las estructuras (Abdullah et al., 2010). Adicionalmente, los mapas de sombras multidireccional requieren menor tiempo a la hora de detectar lineamientos, debido a que se extraen lineamientos de una sola imagen. Por el contrario, si se usa un mapa de sombras unidireccional, se debe analizar al menos 8 imágenes para eliminar el sesgo.

Una manera sencilla de verificar la isotropía en la iluminación de los mapas de sombra multidireccional es comparando los lineamientos estructurales extraídos a partir de estos mapas, con las fallas geológicas de la zona. Lo anterior se debe a que las fallas no presentan sesgos en la dirección y existe una relación causal entre estas dos características estructurales (Singhal y Gupta, 2010; Fossen, 2016). En concreto, los lineamientos estructurales obtenidos en la RVA y CVDJ (figura 10 y 15) muestran una evidente semejanza en las tendencias de orientación. Incluso, se observa una correspondencia en el trazo la falla (figura 2 y 3) y el lineamiento (figura 9 y 14) sobre el mapa. Esta semejanza se da porque presentan una ubicación espacial contigua o una superposición entre sí (figura 16). Por otra parte, la DM también muestra una relación espacial en el trazo de los lineamientos y las fallas (figura 4 y 19). No obstante, la relación en la tendencia de orientación entre estas dos características estructurales no es tan clara (figura 18 y 20). Lo anterior se atribuye a la falta de información geológica detallada, puesto que los lineamientos están trazados a una escala local y la cartografía de las fallas tiene una escala regional (Rodríguez et al., 2005).

Teniendo en cuenta otras ventajas de extraer lineamientos a partir de los mapas de sombras, cabe resaltar que la escala de estudio se puede ajustar a la necesidad del usuario, simplemente aumentando o disminuyendo la resolución del DEM (figura 9, 14 y 19) (Gallegos et al., 2008). Además, la totalidad de los datos utilizados en este trabajo son de acceso gratuito y gran parte de estos cubren casi la totalidad de la Tierra (Dataset ASF DAAC, 2011; USGS, 2014; Alcaldía de Medellín, 2016). Por otro lado, al basarse en interferometría radar y debido a la longitud de onda utilizada, los DEM no presentan influencia de rasgos biogénicos (vegetación) o factores climáticos en su interpretación (Gallegos et al., 2008; Soliman y Han, 2019). No obstante, el mapa de sombras multidireccional realizado con un DEM de alta resolución puede revelar características antropogénicas. Como ejemplo, en la zona W del mapa de sombras de la DM (figura 19), se observa el trazo de la vía Las Palmas.

Considerando lo anterior, es importante identificar estas estructuras antrópicas a través de una imagen satelital reciente y así evitar interpretaciones erróneas.

Control de calidad

Para obtener la mejor combinación de los parámetros que controlan la extracción automática de lineamientos en el software Geomatica®, se evaluaron diez combinaciones a través de cuatro características cuantitativas de los lineamientos: longitud total, población, dirección e intersección (tabla 3, 5 y 7). De acuerdo con los resultados, las combinaciones 1, 3, 8, 9 y 10 de la tabla 2, exhibieron un balance en la calificación de la longitud total y la población de lineamientos (tabla 4, 6 y 8). Asimismo, estas combinaciones presentan valores mayores o iguales a 10 en los parámetros RADI y GTHR (tabla 2). Además, los parámetros previamente mencionados controlan la detección de bordes en la imagen, lo que ajusta el nivel de detalle que se obtendrá (PCI-Geomatica, 2005). En este sentido, los valores entre 10 y 60 en estos parámetros, generan un balance entre la población y la longitud total de lineamientos. Adicionalmente, el parámetro DTHR define la distancia máxima en pixeles para establecer una conexión entre dos líneas (PCI-Geomatica, 2005). Este parámetro contribuye con la continuidad, reflejándose en los valores relativamente altos en las combinaciones 3, 8, 9 y 10 (tabla 2). Por otra parte, la resolución del DEM puede controlar la población y la longitud total de los lineamientos (Soliman y Han, 2019). A pesar de que en este estudio se usaron diferentes resoluciones espaciales del DEM, los cambios se hicieron en distintas zonas, lo que no permite comparar esta relación debido a que las expresiones estructurales son distintas en cada lugar. Finalmente, la combinación de parámetros 3, 8 y 9 de la tabla 2, obtuvieron el valor promedio más alto en la clasificación de los filtros (tabla 4, 6 y 8). Estas tres combinaciones muestran valores similares en gran parte de los parámetros, sin embargo, el umbral de gradiente de borde (GTHR) tuvo valores muy variados (tabla 2). De acuerdo con lo anterior, el parámetro GTHR posiblemente fue determinante para crear lineamientos con menor ruido, mayor relación espacial con las fallas y una coherencia con las tendencias estructurales en las diferentes escalas en las que se aplicó.

En general, las direcciones de las capas de lineamientos de cada zona son muy similares. Esto se debe a que esta característica está controlada principalmente por el mapa de sombras multidireccional. No obstante, el filtro ATHR generan un efecto sobre esta cualidad debido

a que controla la curvatura de los lineamientos (PCI-Geomatica, 2005). Este efecto se demuestra en la tabla 3 y 5, donde las combinaciones con valores más bajos en este parámetro (2 y 4 de la tabla 2), producen mayor coincidencia entre la dirección de los lineamientos y la dirección de las fallas. Adicionalmente, se aplicó el método Nodo a Nodo para que la curvatura de las líneas no afectase la dirección de esta (Koçal, 2004). Lo anterior posiblemente produjo que la variación en los valores de este filtro fuese baja (tabla 3, 5 y 7). Además, este método evitó que la población de lineamientos aumentara ya que, si no se hubiese aplicado, se tendrían que caracterizar los diferentes segmentos del lineamiento. Finalmente, la intersección entre los lineamientos y las fallas no tuvo una dependencia sobre un parámetro en específico. Esto posiblemente se generó porque no siempre existe expresión superficial suficientemente clara en la traza de la falla o en muchos casos puede estar cubierta por depósitos (figura 2, 3 y 16) (Núñez, 2003; Rodríguez et al., 2005). En este sentido, usar lineamientos trazados manualmente en vez de fallas para realizar la intersección, puede garantizar que exista una expresión superficial a lo largo de la traza.

8.1. Zonas de estudio

Región del Valle de Aburrá

Los procesos de extracción automática de lineamientos aquí realizados permitieron identificar que el Valle de Aburrá y su área circundante presenta una principal tendencia de deformación orientada NNW-SSE a N-S (figura 10), esta tendencia estructural se asemeja a las trazas de la Falla San Gerónimo y el Sistema de Fallas Cauca-Romeral en el lado occidental del valle (zonas 1 y 2 en la figura 12). Las zonas 4 y 5 (Figura 12) parecen heredar parcialmente esta tendencia estructural, aunque están lejos de las fallas mayores, pero bajo la influencia de las fallas Rodas y La Acuarela (Fig. 2). Sin embargo, la parte central del área de estudio, que incluye las zonas de Ovejas y Altavista, la Dunita de Medellín y los depocentros de la cuenca (figura 2) identificados por Rendón (2003), corresponde a la porción más ancha del valle. (4 km de ancho). Esta zona, correspondiente a la llamada zona 3 en la figura 12, la cual se caracteriza además por tener un patrón estructural ligeramente diferente, evidenciado por su orientación preferencial de lineamientos NE-SW. La orientación de los lineamientos también es paralela al tensor de esfuerzo principal (σ_1), determinado por Mariño et al. (2020) (figura 22), lo que indica que estas estructuras

(lineamientos NE-SW) son formadas por procesos extensionales. Autores como Davis et al. (2000) y Ferrill et al. (2019) han discutido el papel de las fallas sobre la orientación del campo de esfuerzo. Cuando las fallas se disponen en la misma dirección del tensor de esfuerzo principal (σ_1) (o dentro de 0 a 13° del mismo), las fallas se comportarían como estructuras de estiramiento o híbridas, favoreciendo la cinemática extensional y por lo tanto un incremento en el espacio de acomodación (Ferrill et al., 2019).

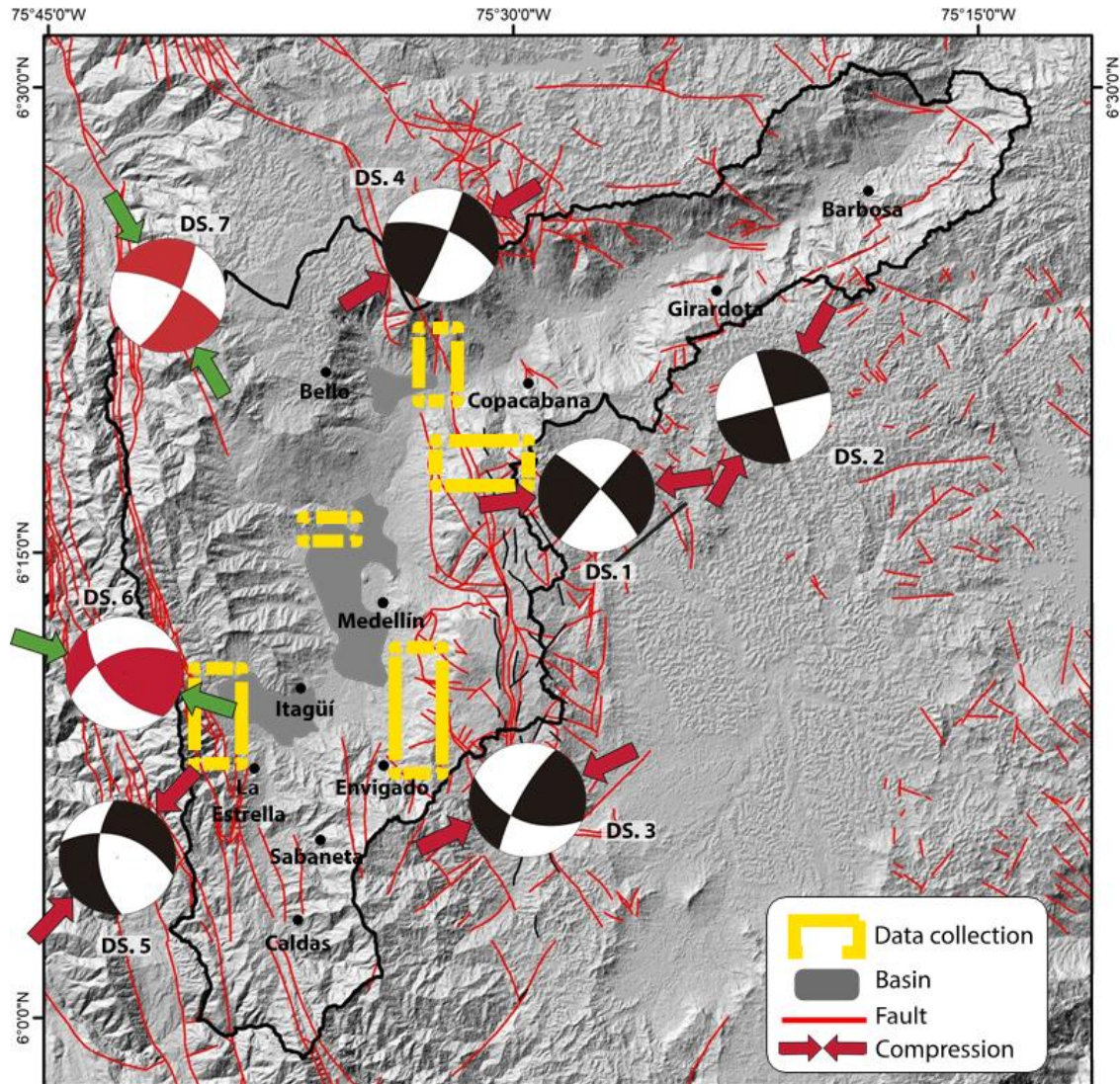


Figura 22. Mapa de tensores de esfuerzo del área de estudio y representación del tensor de compresión σ_1 (flechas roja y verde) obtenido de los diferentes conjuntos de datos de los sitios de recolección de datos medidos a lo largo del Valle de Aburrá. Tomado de Mariño et al. (2020).

De acuerdo con los tensores de esfuerzo determinados por Mariño et al. (2020) y el modelo de deformación propuesto por Rodríguez et al. (2005) para el Batolito Antioqueño, implica que el flanco oriental del Valle de Aburrá, dominada por la unidad geológica previamente mencionada, se está deformando como un gran bloque que gira en el sentido de las agujas del reloj dentro de una matriz dúctil de rocas metamórficas de la Cordillera Central (figura 2). El patrón estructural detectado en este estudio a través de los lineamientos al oriente del Valle de Aburrá, y asociado a una secuencia de bloques rígidos rotados (figura 11), soporta la dirección de un σ_1 en la orientación NE-SW y una rotación en sentido horario del Batolito Antioqueño. Puesto que las zonas de cizalla donde rotan los bloques presentan una cinemática dextral (Rodríguez et al., 2005; Mariño et al., 2020). Lo anterior implica bajo el modelo rígido de dominó, que las fallas desarrolladas entre cada bloque rotado deben tener una cinemática sinextral (figura 23) (Fossen, 2016).

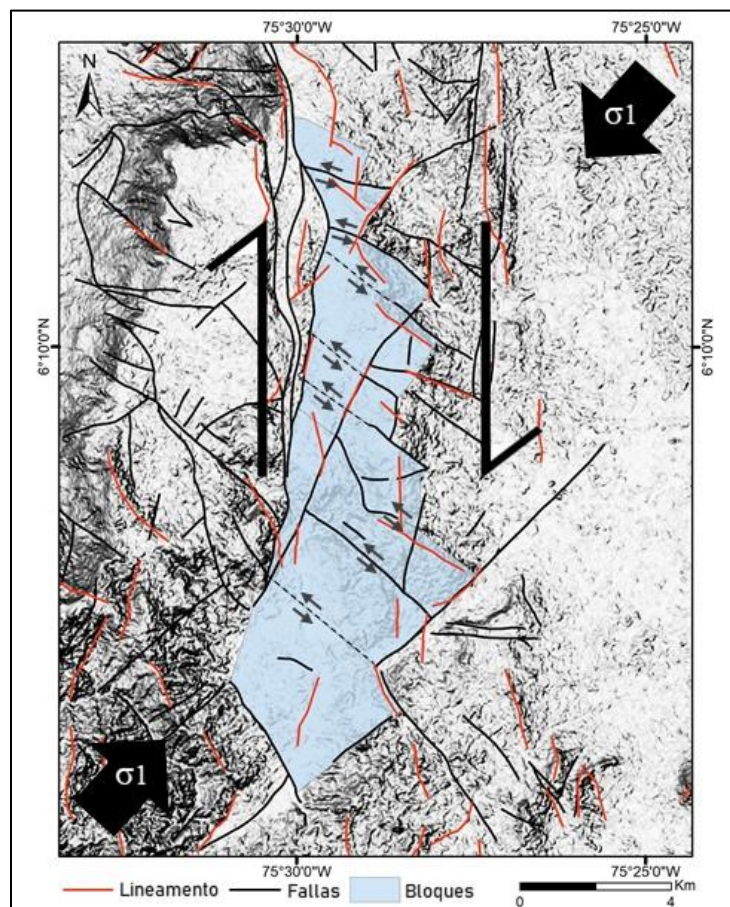


Figura 23. Bloques rotados al oriente del Valle de Aburrá, con la cinemática de las fallas que componen este modelo y la consecuente dirección del esfuerzo principal.

Complejo Volcánico Doña Juana

Los lineamientos detectados en esta zona permitieron consolidar los patrones estructurales regionales y locales identificados con trabajo de campo por Núñez (2003) y Duque et al. (2020) respectivamente. En el contexto regional, está definido por un ambiente transpresional con cinemática dextral, donde el desplazamiento de bloques rígidos y la formación de cuencas son características comunes en este tipo de entorno tectónico (McCaffrey, 1992; Monte et al., 2019; Duque et al., 2020). Como consecuencia, las fallas regionales se distinguen por ser de rumbo con cinemática lateral derecho y una tendencia NE-SW, vinculadas por fallas laterales derechas con tendencia E-W (figura 3 y 13). Curiosamente, las tendencias estructurales definidas por los lineamientos obtenidos en este estudio y las fallas que se cruzan (figura 15 y 13) definen estructuras romboédricas como el bloque de basamento identificado por Duque et al. (2020) (figura 16). Dentro de esta zona (bloque de basamento), se define el contexto local que se identifica por ser consecuente con el contexto regional respecto a las tendencias estructurales (figura 13, 15 y 17) (Duque et al., 2020). No obstante, se logran redefinir algunas de estas tendencias, permitiendo así identificar el patrón estructural asociado a la dirección de los esfuerzos (distribución de Riedel). Los lineamientos (figura 16 y 17) junto con las fallas medidas a lo largo de esta zona por Duque et al. (2020), permiten identificar que la orientación del tensor de esfuerzos principal (σ_1) es NW-SE (figura 24). Lo anterior, es coherente con los tensores de esfuerzos identificados por Duque et al. (2020), que en general, exhiben un σ_1 en la orientación previamente mencionada.

Finalmente, existe una leve discrepancia entre la orientación de los lineamientos (figura 24A) respecto a las fallas (figura 24B). Posiblemente se deba a los ángulos de iluminación del mapa de sombras multidireccional, puesto que iluminar desde 8 direcciones reduce el sesgo en una gran proporción más no lo elimina. A pesar de que se usó un mapa de pendientes para aproximar a cero la anisotropía en la iluminación, este se situó en la base de la superposición que conforma el mapa de sombras multidireccional (figura 5). Debido a esto, es posible que la incidencia de esta capa no fuese tan fuerte como para generar una isotropía en la iluminación.

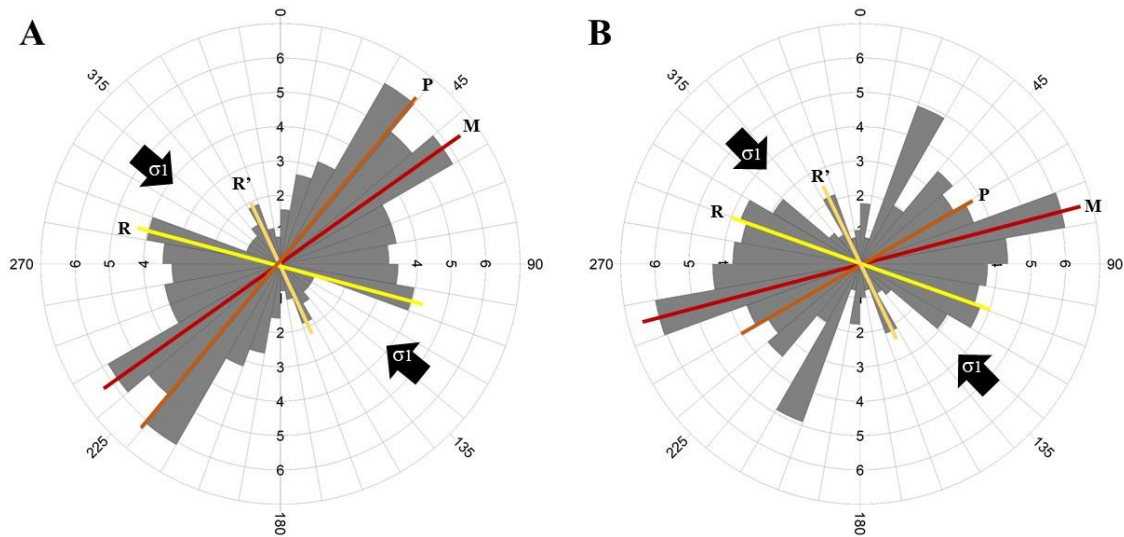


Figura 24. Distribución de Riedel con la respectiva dirección de esfuerzo principal (σ_1). (A) diagrama de rosas de los lineamientos contenidos en el bloque de basamento (figura 16). (B) diagrama de rosas de los planos de falla medidos por Duque et al. (2020).

Dunita de Medellín

Como se mencionó previamente, existe una relación poco clara entre los lineamientos (figura 20) y las fallas de la DM (figura 18), debido a la falta de información detallada. No obstante, se logra percibir la tendencia de las fallas N-S y NW-SE en los lineamientos. Por otra parte, al comparar la tendencia estructural de las fallas regionales (figura 8) con los lineamientos de la DM (figura 20), se identifica una discrepancia aún mayor. Esta diferencia con los lineamientos a escala local se debe a que la resolución del DEM permite un trazado más detallado, reflejando una mayor variación en la dirección de los lineamientos (Soliman y Han 2019). De igual forma, estos cambios pueden estar asociados al efecto de la topografía cerca de la superficie sobre los patrones de esfuerzo regional, la historia geológica y a las propiedades inherentes de las unidades geológicas (reología) (Fossen, 2016).

La mayoría de los lineamientos representan estructuras planas como fracturas y discontinuidades en general, que intersecan la superficie de la Tierra. Desde el punto de vista hidrogeológico, las fracturas y discontinuidades se encuentran entre las estructuras geológicas más importantes, debido a que la mayoría de las rocas las poseen, facilitando así el almacenamiento y el movimiento de fluidos a través de ellas (Singhal y Gupta, 2010). De esta manera, los lineamientos pueden usarse para inferir el movimiento del agua subterránea

(Yeh et al., 2009). Según Patiño et al. (2020) las diaclasas de la DM tienen una orientación principal NW-SE, lo que coincide con uno de los componentes principales en la orientación de los lineamientos (figura 20). Además, el estudio previamente mencionado dividió la DM en cuatro zonas estructurales (N, W, S y E) en donde se identificaron las tendencias de las diaclasas de cada zona (figura 25). En comparación con los lineamientos, las tendencias de las diaclasas en las zonas S y E, exhiben una correspondencia con las tendencias de los lineamientos en dichas áreas (figura 21). Por otra parte, existe una discrepancia en las tendencias de los lineamientos y diaclasas de las zonas N y W (figura 21 y 25). Esta variación posiblemente se deba a las expresiones creadas por los drenajes en superficie junto con la tendencia de las fallas regionales (figura 4 y 19). Es importante reconocer que el fluido de agua subterránea a través de una zona no saturada es controlado por la gravedad, siguiendo la dirección de buzamiento de la fractura. No obstante, el rumbo de las fracturas (reflejada en los lineamientos) en una zona saturada puede jugar un papel importante, ya que el movimiento del agua está controlado por el gradiente regional, el cual puede coincidir con el rumbo de la diaclasa (Scesi y Gattioni, 2009).

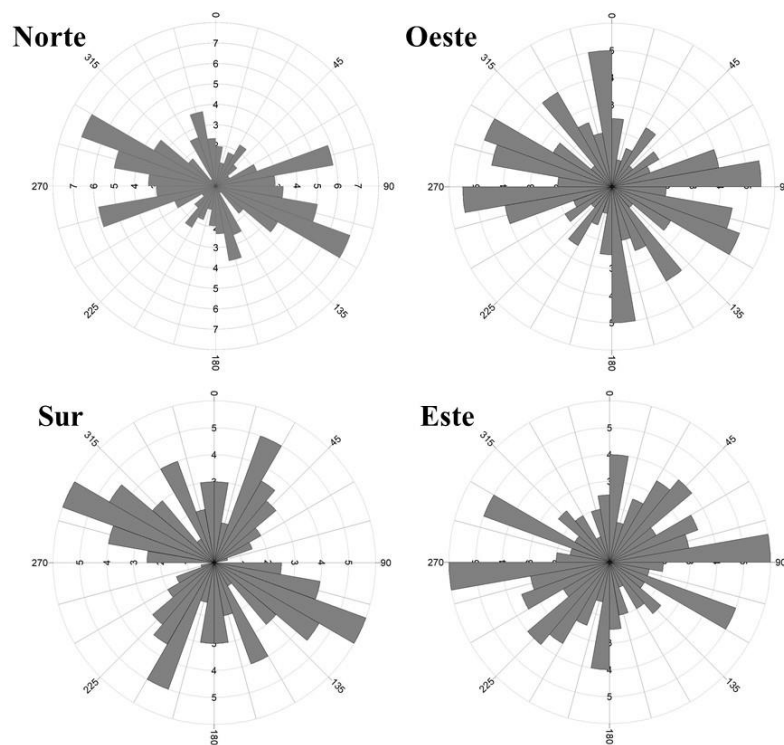


Figura 25. Diagramas de rosas de las diaclasas pertenecientes a las distintas zonas estructurales de la DM. Tomado de Patiño et al. (2020).

9. Conclusión

Según los resultados encontrados, se concluye que la combinación de parámetros número 3, 8 y 9, permiten obtener una capa de lineamientos con menor ruido, mayor relación espacial con las fallas y una coherencia con las tendencias estructurales de la zona. Por otra parte, el mapa de sombras multidireccional tiene una gran influencia sobre la orientación de los lineamientos, reduce la anisotropía de la iluminación y optimiza el proceso de extracción automática de lineamientos. Además, la expresión de la intersección entre el plano de falla y la superficie es intermitente a lo largo de la traza. En este sentido, es adecuado usar como referente para el análisis de intersección, los lineamientos de la zona trazados manualmente.

Se identificó una relación muy cercana de los lineamientos con las fallas geológicas de la región. Sin embargo, en la escala local se redefinen estas tendencias estructurales reflejando en ellas tanto la disposición de las estructuras regionales como las variaciones locales asociadas al contexto geológico local. Adicionalmente, identificar los patrones estructurales a partir de los lineamientos y relacionarlos con las fallas, permite reconocer la cinemática y la dirección de esfuerzo principal (σ_1) de una zona (NE-SW para la RVA y NW-SE para el CVDJ). A la vez, los lineamientos explican el movimiento de fluidos a través de la roca y características topográficas del área de estudio.

De manera general, el desarrollo de este proyecto representa una manera fácil y económica de obtener información geológica que contribuye al desarrollo del conocimiento en temas como geología estructural, vulcano-tectónica e hidrogeología. Además, Entender los patrones estructurales de cada zona de estudio y relacionarlos con los objetivos particulares de cada proyecto (Mariño et al., 2020; Duque et al., 2020; Patiño et al., 2020), dio cuenta de la versatilidad y complemento que representa la metodología implementada. Finalmente, identificar las características estructurales superficiales a través de los lineamientos en diferentes ambientes geológicos, muestra la estrecha relación de estos con su contexto geológico local y regional.

10. Bibliografía

Abdullah, A., Akhir, J. M., y Abdullah, I. (2010). Automatic mapping of lineaments using shaded relief images derived from digital elevation model (DEMs) in the Maran-

Sungi Lembing area, Malaysia. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 15(6), 949-958.

Abdullah, A., Nassr, S., y Ghaleeb, A. (2013). Landsat ETM-7 for lineament mapping using automatic extraction technique in the SW part of Taiz Area, Yemen. *Glob. J. Hum. - Soc. Sci. Res*, 13, 35-37.

Al-Obeidat, F., Feltrin, L., y Marir, F. (2016). Cloud-based lineament extraction of topographic lineaments from NASA shuttle radar topography mission data. *Procedia Computer Science*, 83, 1250-1255.

Alcaldía de Medellín. (2016). GEO Medellín. Retrieved 3 June 2020, from <https://www.medellin.gov.co/geomedellin/servicios.hyg?idAgrupacion=4>

Alshayef, M. S., y Javed, A. (2018). Geomatica-Based Approach for Automatic Extraction of Lineaments from ASTER-GDEM Data, in Part of Al-Rawdah, Shabwah, Southeast Yemen. In *Hydrologic Modeling* (pp. 423-434). Springer, Singapore.

Área Metropolitana del Valle de Aburrá. -AMVA- (2007). Microzonificación sísmica detallada de los municipios de Barbosa, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado. Medellín.

Bustamante, C., Cardona, A., Archanjo, C. J., Bayona, G., Lara, M., y Valencia, V. (2017). Geochemistry and isotopic signatures of Paleogene plutonic and detrital rocks of the Northern Andes of Colombia: A record of post-collisional arc magmatism. *Lithos*, 277, 199-209.

Calle, B., y González, H. (1980). Geología y geoquímica de la plancha 166, Jericó. vol. Informe N, 232.

Casas, J. D. H., y Monsalve, G. (2018). Geological inferences about the upper crustal configuration of the Medellín–Aburra Valley (Colombia) using strong motion seismic records. *Geodesy and Geodynamics*, 9(1), 67-76.

Cediel, F., Shaw, R. P., y Cáceres, C. (2003). Tectonic assembly of the northern Andean block.

- Cochrane, R., Spikings, R., Gerdes, A., Winkler, W., Ulianov, A., Mora, A., y Chiaradia, M. (2014).** Distinguishing between in-situ and accretionary growth of continents along active margins. *Lithos*, 202, 382-394.
- Cornell University. (2000).** Tutorial de Digitalización de Imagenes - Terminología básica. Preservation Tutorial. <http://preservationtutorial.library.cornell.edu/tutorial-spanish/intro/intro-04.html>
- Cortés, M. and Angelier, J. (2005).** Current state of stress in the northern Andes as indicated by focal mechanisms of earthquakes. *Tectonophysics* 403, 29-58.
- Dataset ASF DAAC (2011).** ALOS PALSAR_Radiometric_Terrain_Corrected_high_res; Includes Material ©JAXA/METI (2011). Retrieved through ASF DAAC (3/6/2020). DOI: 10.5067/Z97HFCNKR6VA
- Davis, G. H., Bump, A. P., García, P. E., y Ahlgren, S. G. (2000).** Conjugate Riedel deformation band shear zones. *Journal of Structural Geology*, 22(2), 169-190.
- Duque-Trujillo, J., Bustamante, C., Solari, L., Gómez-Mafla, Á., Toro-Villegas, G., y Hoyos, S. (2019).** Reviewing the Antioquia batholith and satellite bodies: a record of Late Cretaceous to Eocene syn-to post-collisional arc magmatism in the Central Cordillera of Colombia. *Andean Geology*, 46(1), 82-101.
- Duque-Trujillo, J.F., Pardo, N., Lucchi F., Arias, M.F., Valencia, L.G., Bustos, E., Arnosio, M., Pulgarín B.A. (2020).** Structurally controlled volcanic edifices within strike-slip tectonics in the Northern Andes: Doña Juana Volcanic Complex study case. Departamento de Ciencias de la Tierra. Universidad EAFIT, Medellín.
- Ego, F., Sébrier, M., y Yepes, H. (1995).** Is the Cauca-Patia and Romeral Fault System left or rightlateral?. *Geophysical Research Letters*, 22(1), 33-36.
- Ehrich, R. W. (1977).** Detection of global edges in textured images. *IEEE Trans. Computers*, 26(6), 589-603.
- Esri. (2019).** Multiplicación—Ayuda | ArcGIS for Desktop. Multiplicación. <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/times.htm>

- Esri. (2018).** Densidad de línea—Ayuda | ArcGIS for Desktop. Recuperado 6 de junio de 2020, de <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/line-density.htm>
- Ferrill, D. A., Smart, K. J., y Morris, A. P. (2019).** Fault failure modes, deformation mechanisms, dilation tendency, slip tendency, and conduits v. seals. Geological Society, London, Special Publications, 496(1), 75-98.
- Fossen, H. (2016).** Structural geology. Cambridge University Press.
- Gallegos, E., Dopico, C. I. M., y Berbeglia, Y. (2008).** Mapeo de lineamientos a partir de un DEM (SRTM3): desarrollo y aplicaciones para el estudio de un área de los Andes Patagónicos Septentrionales. *Geoacta*, 33, 11-22.
- García-Delgado, H., y Velandia, F. (2020).** Tectonic geomorphology of the Serranía de San Lucas (Central Cordillera): Regional implications for active tectonics and drainage rearrangement in the Northern Andes. *Geomorphology*, 349, 106914.
- González, H. (1980).** Geología de las planchas 167 (Sonsón) y 187 (Salamina). *Boletín Geológico*, 23(1), 3-174.
- Hall, M. y Wood, C. (1985).** Volcano-tectonic segmentation of the northern Andes. *Geology* 13, 203-207
- Hashim, M., Ahmad, S., Md Johari, M.A., Pour, A.B. (2013).** Automatic lineament extraction in a heavily vegetated region using Landsat Enhanced Thematic Mapper (ETM+) imagery. *Adv. Space Res.*, 51, 874–890.
- Hermelín, M. (2007).** Valle de Aburrá: ¿Quo vadis?. *Gestión y Ambiente*, 10, 07-16.
- Hobbs, W. H. (1904).** Lineaments of the Atlantic border region. *Bulletin of the Geological Society of America*, 15(1), 483-506.
- Kellogg, J. N., Camelio, G. B. F., y Mora-Páez, H. (2019).** Cenozoic tectonic evolution of the North Andes with constraints from volcanic ages, seismic reflection, and satellite geodesy. In *Andean Tectonics* (pp. 69-102). Elsevier.

- Khalifani, F. M., Bahroudi, A., Aliyari, F., Abedi, M., Yousefi, M., y Mohammadpour, M. (2019).** Generation of an efficient structural evidence layer for mineral exploration targeting. *Journal of African Earth Sciences*, 160, 103609.
- Kobayashi, D., LaFemina, P., Geirsson, H., Chichaco, E., Abrego, A. A., Mora, H., y Camacho, E. (2014).** Kinematics of the western Caribbean: Collision of the Cocos Ridge and upper plate deformation. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15(5), 1671-1683.
- Koçal, A. (2004).** A methodology for detection and evaluation of lineaments from satellite imagery (Master's thesis).
- Koçal, A., Duzgun, H. S., y Karpuz, C. (2004).** Discontinuity mapping with automatic lineament extraction from high resolution satellite imagery. *ISPRS XX, Istanbul*, 12-23.
- Lachaine, G. (1999).** Structures géologiques et linéaments, Beauce (Québec): apport de la télédétection. In: *Memory Presented in Faculty of Humanities. University of Sherbrooke Québec, Canada.*
- MacDonald, W. D., Estrada, J. J., Sierra, G. M., y González, H. (1996).** Late Cenozoic tectonics and paleomagnetism of North Cauca Basin intrusions, Colombian Andes: dual rotation modes. *Tectonophysics*, 261(4), 277-289.
- Mallast, U., Gloaguen, R., Geyer, S., Rödiger, T., y Siebert, C. (2011).** Derivation of groundwater flow-paths based on semi-automatic extraction of lineaments from remote sensing data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(8), 2665.
- Mariño, O., Duque, J.F., Arias, M.F. (2020).** Kinematic modelling for a transtensive intra-cordilleran valley in the Northern Andes. The Aburrá Valley case study. *Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad EAFIT, Medellín.*
- Martens, U., Restrepo, J. J., Ordóñez-Carmona, O., y Correa-Martínez, A. M. (2014).** The Tahamí and Anacona terranes of the Colombian Andes: missing links between the South American and Mexican Gondwana margins. *The Journal of Geology*, 122(5), 507-530.

- Masoud, A., y Koike, K. (2006).** Tectonic architecture through Landsat-7 ETM+/SRTM DEM-derived lineaments and relationship to the hydrogeologic setting in Siwa region, NW Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 45(4-5), 467-477.
- Masoud, A. A., y Koike, K. (2011).** Auto-detection and integration of tectonically significant lineaments from SRTM DEM and remotely-sensed geophysical data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(6), 818-832.
- Masoud, A., y Koike, K. (2017).** Applicability of computer-aided comprehensive tool (LINDA: Lineament Detection and Analysis) and shaded digital elevation model for characterizing and interpreting morphotectonic features from lineaments. *Computers y Geosciences*, 106, 89-100.
- McCaffrey, R. (1992).** Oblique plate convergence, slip vectors, and forearc deformation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 97(B6), 8905-8915.
- Mejía, M. (1984).** Geología y geoquímica de la plancha 130 ‘Santa Fe de Antioquia y 146 ‘Medellín Occidental’. Informe Interno.
- Meshkani, S.A., Mehrabi, B., Yaghubpur, A., Sadeghi, M. (2013).** Recognition of the regional lineaments of Iran: using geospatial data and their implications for exploration of metallic ore deposits. *Ore Geol. Rev.* 55, 48–63.
- Montes, C., Rodríguez-Corcho, A., Bayona, G., Hoyos, N., Zapata, S., Cardona, A. (2019).** Continental margin response to multiple arc-continent collisions: The northern Andes-Caribbean margin. *Earth-Science Rev*, 198: 102903, doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102903
- Mora-Páez, H., Kellogg, J. N., Freymueller, J. T., Mencin, D., Fernandes, R. M., Diederix, H., y Díaz-Mila, F. (2019).** Crustal deformation in the northern Andes–A new GPS velocity field. *Journal of South American Earth Sciences*, 89, 76-91.
- Murcia, A., y Cepeda, H. (1991).** Mapa Geológico de la Plancha 410-La Unión (Departamento de Narino). Memoria Explicativa. Ingeominas, Bogotá. Escala, 1(100,000), 22.

- Murcia, A., y Cepeda, H. (1991b).** Mapa geológico de la Plancha 429-Pasto; Escala 1: 100.000. Ingeominas, Bogotá.
- Nelson, J., (2020).** Kandy-Kolored Multidirectional Streamlined Hillshade. [online] ArcGIS Blog. Available at: <<https://www.esri.com/arcgis-blog/products/arcgis-pro/mapping/kandy-kolored-multidirectional-streamlined-hillshade/>> [Accessed 30 May 2020].
- Nivia, A, Albarracín R., Rodríguez G., Sepúlveda O., Gómez JF, Zapata G., Salazar G. (2011).** Memoria explicativa del mapa geológico de la plancha 131 Santa Rosa de Osos. Informe interno.
- Núñez, A. (2003).** Reconocimiento geológico regional de las planchas 411 La Cruz, 412 San Juan de Villalobos, 430 Mocoa, 431 Piamonte, 448 Monopamba, 449 Fiorito y 465 Churuyaco. Memoria explicativa, escala, 1(100.000).
- O’Leary DW, Friedman JD, Pohn HA (1976)** Lineament, linear, lineation some proposed new standards for old terms. Geol Soc Amer Bull 87:1463–1469
- Ordoñez, O., Marín, M. V., Iregui, H. G., Herrera, E. C., Ruiz., C., Rendón-Ramírez, A. P., and Ríos, C. (2005).** Generalidades del Sistema de Fallas de Romeral en las cercanías a Medellín. X Congreso Colombiano de Geología, Bogotá, Colombia.
- Orrego, A., París, G., Ibañez, D., y Vásquez, E. (1996).** Geología y geoquímica de la Plancha 387–Bolívar. Publicaciones Especiales de Ingeominas, 22, 55-114.
- PCI-Geomatica (2005).** Focus User Guide 10.0. PCI Inc, Ontario, Canada.
- Pardo, N., Pulgarín, B., Betancourt, V., Lucchi, F., Valencia, L. (2018).** Facing geological mapping at low-latitude volcanoes: The Doña Juana Volcanic Complex study-case, SW Colombia. J Volcanol. Geotherm. Res., (In Press), doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.04.016
- Patiño, S., Arias, M. F., Espinosa, C. A., Jaramillo, M. (2020).** Determination of the preferential directions of groundwater flow in the pseudokárstico aquifer of Dunita de Medellín-Colombia, from a hydrostructural analysis. Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad EAFIT, Medellín.

- Pulido, N. (2003).** Seismotectonics of the northern Andes (Colombia) and the development of seismic networks. *Bulletin of the International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Special Edition*, 69-76.
- Raghavan, V., Wadatsumi, K., y Masumoto, S. (1993).** Automatic extraction of lineament information from satellite images using digital elevation data. *Nonrenewable Resources*, 2(2), 148-155.
- Rendón, D. A. (2003).** Tectonic and sedimentary evolution of the upper Aburrá Valley, northern Colombian Andes. Master thesis Shimane University. Japan.
- Restrepo, D., Bielak, J., Serrano, R., Gómez, J., y Jaramillo, J. (2016).** Effects of realistic topography on the ground motion of the Colombian Andes—A case study at the Aburrá Valley, Antioquia. *Geophysical Journal International*, 204(3), 1801-1816.
- Restrepo, J. J., and Toussaint, J. F. (1984).** Unidades litológicas de los alrededores de Medellín. I conf. de riesgos geol. del Valle de Aburrá. Medellín, Colombia, pp. 26
- Riedel, W. (1929).** Zur mechanik geologischer brucherscheinungen. *Zentralblatt für Mineralogie, Geologie und Paleontologie B*, 354± 368 (Abhandlung).
- RockWorks17 [Software]. (2019).** Golden CO USA: RockWare, Inc. Available from 876 <https://www.rockware.com/product/rockworks>
- Rodríguez, G., González, H., and Zapata, G. (2005).** Geología de la plancha 147 Medellín Oriental. Ingeominas, Bogotá.
- Ruiz, S. (2002).** Geología de la plancha 386 Mercaderes. Ingeominas, Bogotá.
- Salui, C. L. (2018).** Methodological validation for automated lineament extraction by LINE method in PCI Geomatica and MATLAB based Hough transformation. *Journal of the Geological Society of India*, 92(3), 321-328.
- Scesi, L., y Gattinoni, P. (2009).** Water circulation in rocks. Springer Science y Business Media.
- Singhal, B. B. S., y Gupta, R. P. (2010).** Applied hydrogeology of fractured rocks. Springer Science y Business Media.

- Šilhavý, J., Minár, J., Mentlík, P., y Sládek, J. (2016).** A new artefacts resistant method for automatic lineament extraction using Multi-Hillshade Hierarchic Clustering (MHHC). *Computers y Geosciences*, 92, 9-20.
- Soliman, A., Han, L. (2019).** Effects of vertical accuracy of digital elevation model (DEM) data on automatic lineaments extraction from shaded DEM. *Advances in Space Research*, 64(3), 603-622.
- Soto-Pinto, C., Arellano-Baeza, A., y Sánchez, G. (2013).** A new code for automatic detection and analysis of the lineament patterns for geophysical and geological purposes (ADALGEO). *Computers y Geosciences*, 57, 93-103.
- Taboada, A., Rivera, L. A., Fuenzalida, A., Cisternas, A., Philip, H., Bijwaard, H., Rivera, C. (2000).** Geodynamics of the northern Andes: Subductions and intracontinental deformation (Colombia). *Tectonics*, 19(5), 787–813. doi:10.1029/2000tc900004
- Thannoun, R. G. (2013).** Automatic extraction and geospatial analysis of lineaments and their tectonic significance in some areas of Northern Iraq using remote sensing techniques and GIS. *International Journal of Enhanced Research In Science Technology y Engineering Bulletin*, 2.
- Tibaldi, A., Romero-Leon, J. (2000).** Morphometry of Late Pleistocene- Holocene faulting and volcano-tectonic relationships in the southern Andes of Colombia. *Tectonics*, 19, 358-377.
- Tibaldi, A., Roviada, A., Corazzato, C. (2007).** Late Quaternary kinematics, slip-rate and segmentation of a major Cordillera-parallel transcurrent fault: the Cayambe-Afiladores-Sibundoy system, NW America. *J. Structural Geology*, 29, 664-680.
- Toro, J., F. Roure, N. Bordas-Le Floch, S. Le Cornec-Lance, and W. Sassi, (2004).** Thermal and kinematic evolution of the Eastern Cordillera fold and thrust belt, Colombia, in R. Swennen, F. Roure, and J. W. Granath, eds., *Deformation, fluid flow, and reservoir appraisal in foreland fold and thrust belts: AAPG Hedberg Series*, no. 1, p. 79– 115.

- Toro, G., y Velásquez, A. (1984).** Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas. Medellín, Antioquia.
- Tzvetkov, J. (2018).** Relief visualization techniques using free and open source GIS tools. Polish Cartographical Review, 50(2), 61-71.
- USGS. (2014).** EarthExplorer - Home. Retrieved 3 June 2020, from <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Vallejo, C., Spikings, R. A., Luzieux, L., Winkler, W., Chew, D., y Page, L. (2006).** The early interaction between the Caribbean Plateau and the NW South American Plate. Terra Nova, 18(4), 264-269.
- Vanderbrug, G. J. (1976).** Line detection in satellite imagery. IEEE Transactions on Geoscience Electronics, 14(1), 37-44.
- Velandia, F., Acosta, J., Terraza, R., Villegas, H. (2005).** The current tectonic motion of the Northern Andes along the Algeciras Fault System in SW Colombia. Tectonophysics, 399(1-4), 313-329.
- Wang, J. (1993).** LINDA—a system for automated linear feature detection and analysis. Canadian Journal of Remote Sensing, 19(1), 009-021.
- Yeh, H.F., Lee, C.H., Hsu, K.C., Chang, P.H. (2009).** GIS for the assessment of the groundwater recharge potential zone. Environ. Geol. 58, 185–195. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1504-9>