

Cartografía geológica, geomorfológica y análisis estructural de la zona de influencia de depósitos coluviales entre la Serranía La Paz y el Filo de Cruces en el municipio de Lebrija (Santander)

Alexis Duván González Jaimes

Camilo Alexis Guzmán Plata

Trabajo de Grado para Optar al Título de Geólogo

Directora

María Alejandra Cetina Tarazona

Geóloga, MEng Civil

Codirector

Oscar Fabian Sánchez Ortiz

Ingeniero Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2022

Dedicatoria

Este título está dedicado principalmente a mi madre Florinda Jaimes Cespedes, quien ha estado siempre a mi lado, es pilar en este proceso y a quien estaré eternamente agradecido por el amor y apoyo brindado a lo largo de mi carrera y mi vida, además, dedico este título a mi padre quien me ha brindado la oportunidad de continuar adelante con mis estudios e impulsado positivamente sin importar los percances presentados, a mis hermanos quienes uno a uno me ayudaron en todo este tiempo de estudio y siempre me apoyaron y motivaron a continuar adelante, a María Corina Vargas una gran persona que me apoyó en la última etapa de mi carrera y fue un factor imprescindible en el éxito de este logro alcanzado y a mi compañero y gran amigo Camilo Alexis Guzmán Plata, quien fue fundamental para el desarrollo y culminación de este proceso de formación como geólogo.

Alexis Duvan Gonzalez Jaimes

A mi madre María Isabel Plata Díaz, padre Jesús Alirio Guzmán García y hermano Jesús Alirio Guzmán Plata, quienes trabajaron arduamente para brindarme educación de calidad.

A mis compañeros de geología, hoy colegas y amigos de vida.

Camilo Alexis Guzmán Plata

Agradecimientos

A nuestra directora y amiga María Cetina, por su inmensa paciencia, apoyo y críticas constructivas. Mucha gratitud por siempre.

Profesor Francisco Velandia, por brindarnos su ayuda siempre que lo necesitamos.

Profesor Jesús Mendoza, además de los conocimientos impartidos, el carácter que forjó en nosotros será fundamental en nuestra vida personal y profesional.

A todos los estudiantes y personas que han luchado por una educación pública, gratuita y de calidad. Para que hijos de campesinos y clases menos favorecidas sean los futuros profesionales del país y se disminuya la brecha de desigualdad.

Alexis y Camilo.

Tabla de contenido

	Pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. Objetivos	17
1.1. Objetivo General	17
1.2. Objetivos Específicos.....	17
2. Generalidades	18
2.1. Localización área de estudio	18
2.2. Antecedentes	18
3. Marco teórico	21
4. Marco geológico	29
4.1. Geología regional	29
4.2. Unidades litoestratigráficas	32
4.3. Geología estructural	36
4.4. Geomorfología	38
5. Metodología	41
6. Resultados	45
6.1. Cartografía geológica.....	45
6.2. Estratigrafía	46
6.2.1. Sistema Cretácico.....	47
6.2.2. Sistema Paleógeno	56
6.2.3. Depósitos cuaternarios	62

6.3. Geología Estructural.....	64
6.3.1. Fallas inversas.....	65
6.3.2. Falla Normal.....	66
6.3.3. Falla de rumbo dextral	67
6.3.4. Estructuras plegadas.....	67
6.3.5. Patrones de fracturamiento.....	69
6.4. Geomorfología	70
6.4.1. Factores morfométricos y morfológicos	71
6.4.2. Factores morfodinámicos	73
6.4.3. Factores morfogenéticos	78
6.5. Propuesta del modelo evolutivo área de estudio	88
7. Discusión.....	96
8. Conclusiones	99
9. Recomendaciones.....	100
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Índices de contraste de relieve</i>	25
Tabla 2 <i>Clasificación y descripción de rangos de pendientes (°)</i>	26
Tabla 3 <i>Índices de Longitud de la ladera</i>	26
Tabla 4 <i>Formas de la Ladera</i>	27
Tabla 5 <i>Fotografías vuelos IGAC que se usaron en el proyecto.</i>	42
Tabla 6 <i>Rangos de pendientes y su distribución porcentual</i>	71
Tabla 7 <i>Resumen principales características morfológicas y morfométricas de las subunidades</i>	73

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Localización y vías de acceso en el área de estudio, municipio de Lebrija, Santander, Colombia.</i>	19
Figura 2 <i>(a) Falla normal. (b) Falla inversa. (c) Falla de rumbo. (d) Falla vertical, baja bloque oriental. (e) Falla vertical, baja bloque occidental. (f) Falla con rechazo oblicuo, sinestral normal. (g) Falla con rechazo oblicuo, sinestral inverso.</i>	22
Figura 3 <i>Esquema de jerarquización geomorfológica.</i>	24
Figura 4 <i>Clasificación de movimientos en masa.</i>	28
Figura 5. <i>Geología regional del VMM en la zona de estudio</i>	31
Figura 6 <i>Ubicación de la zona de estudio en el mapa geomorfológico aplicado a movimientos en masa escala 1:100.000 plancha 109 Rionegro.</i>	40
Figura 7 <i>Metodología propuesta para la realización del proyecto.</i>	41
Figura 8 <i>Mapa de estaciones de campo.</i>	46
Figura 9 <i>Mapa Geológico y corte geológico A-A' de la zona de estudio.</i>	48
Figura 10 <i>Columna estratigráfica generalizada del área de estudio</i>	49
Figura 11 <i>Afloramiento Formación la Luna, (A) Calizas y liditas (B) Nódulos calcáreos</i>	50
Figura 12 <i>Calizas de tipo mudstone con esporádicas intercalaciones de paquetes laminados discontinuos de calizas con presencia de terrígenos de color gris oscuro.</i>	51
Figura 13 <i>capas de calizas tipo Wackestone de aproximadamente 10 cm de espesor, con desarrollo de laminación, espesores de 2 a 5 mm y contactos netos planos.</i>	52

Figura 14 <i>Afloramiento de la Formación Umir (A) con intercalaciones de láminas y capas muy delgadas de arcillolitas, areniscas de grano muy fino a fino y láminas de carbón (B), estación RELL-34.</i>	53
Figura 15 <i>Intercalación de arcillolitas y areniscas pertenecientes a la Fm. Umir.</i>	54
Figura 16 <i>A) Capas de arcillolita con capas de arenisca. B) presencia de materia orgánica (M.O) dispuesta sobre planos de laminación.</i>	55
Figura 17 <i>Areniscas de grano fino con lentes de arcilla, pertenecientes a la Formación Lisama, segmento inferior.</i>	57
Figura 18 <i>Afloramiento de areniscas con estratificación cruzada de la Fm. Lisama segmento inferior ubicado en inmediaciones del sinclinal El Naranjo.</i>	58
Figura 19 <i>Capas medianas y gruesas intercaladas con capas muy delgadas de limolitas, pertenecientes a la Fm. Lisama segmento medio.</i>	59
Figura 20 <i>Intercalación de capas gruesas de arcillolitas moteadas con capas medias de areniscas de grano medio de la Fm. Lisama segmento superior.</i>	60
Figura 21 <i>Afloramiento de areniscas intercaladas con arcillolitas de la Fm. Lisama segmento superior en el Cerro El Naranjo.</i>	61
Figura 22 <i>Expresión morfológica de las formaciones Lisama, La Paz y Esmeraldas en el área de estudio.</i>	62
Figura 23 <i>Depósitos coluviales de clastos heterométricos y matriz areno arcillosa distribuidos en el área de estudio.</i>	63
Figura 24 <i>Depósitos aluviales.</i>	64
Figura 25 <i>Panorámica de la Falla Cútiga, Lomo de Falla y deposito coluvial (Qc).</i>	67
Figura 26 <i>Mapa estructural del área de estudio.</i>	68

Figura 27 <i>Diagrama rosa y tendencias principales de los planos de diaclasas medidos en el área de estudio.</i>	69
Figura 28 <i>Mapa Geomorfológico del área de estudio.</i>	70
Figura 29 <i>Mapa de pendientes del área de estudio.</i>	72
Figura 30 <i>Movimiento tipo deslizamiento ocurrido en la Fm. Umir</i>	74
Figura 31 <i>Movimiento tipo flujo sobre la Formación Umir.</i>	75
Figura 32 <i>Movimiento tipo caída de rocas presentado en laderas de alta pendiente de la Fm. La Luna.</i>	76
Figura 33 <i>Procesos de reptación sobre laderas residuales de la Fm. Umir.</i>	77
Figura 34 <i>Mapa de inventario morfodinámico</i>	78
Figura 35 <i>Distribución porcentual de los ambientes morfogenéticos presentes en el área de estudio.</i>	79
Figura 36 <i>Ladera erosiva (Dle) desarrollada en la Formación Umir.</i>	80
Figura 37 <i>Distribución porcentual de las subunidades geomorfológicas de origen denudacional.</i>	81
Figura 38 <i>Ladera de contrapendiente de espinazo (Selc)</i>	82
Figura 39 <i>Ladera estructural de espinazo (Sel) presente en el costado W de la Serranía de La Paz.</i>	83
Figura 40 <i>Escarpe de contrapendiente de colina sinclinal (Scsec) y Ladera estructural de sierra sinclinal (Sssle) presentes en el Cerro La Aurora.</i>	84
Figura 41 <i>Ladera estructural de colina anticlinal y ladera de contrapendiente de sierra anticlinal</i>	85
Figura 42 <i>Distribución porcentual de las subunidades geomorfológicas de origen estructural.</i>	86

Figura 43 *Planicie aluvial (Fpa) presente inmediaciones del costado SE del cerro El Naranjo.* 87

Figura 44 *Superficie explanada (Ase) realizada para la construcción de obras de ingeniería en el área de estudio.* 88

Figura 45 *Esquema de la depositación de las formaciones:(A) Tablazo y Simití (B) Formación la Luna.* 90

Figura 46 *Esquema de la depositación de las formaciones: (A) Umir (B) Lisama.* 91

Figura 47 *Esquema de la depositación de la Formación La Paz* 93

Figura 48 *Plegamiento y fallamiento de la secuencia sedimentaria del área de estudio* 94

Figura 49 *Modelo de formación de los depósitos coluviales* 95

Figura 50 *Corte 3D del área de estudio donde se evidencian las principales estructuras y la distribución de los depósitos coluviales.* 96

Resumen

Título: Cartografía geológica, geomorfológica y análisis estructural de la zona de influencia de depósitos coluviales entre la Serranía la Paz y el Filo de Cruces en el municipio de Lebrija (Santander)*

Autor: Camilo Alexis Guzmán Plata**, Alexis Duvan Gonzalez Jaimes**

Palabras Clave: Tensor de esfuerzo, diaclasa, transgresión, regresión, nivel eustático, reptación.

Descripción: En la zona comprendida entre la Serranía La Paz y el Filo de Cruces, del municipio de Lebrija (Santander) se realiza el detalle de la cartografía geológica y geomorfológica a escala 1:25000, tomando como punto de partida el cuadrángulo H12-Bucaramanga y el mapa geomorfológico aplicado a movimientos en masa de la plancha 109-Rio Negro, departamento de Santander. Mediante el análisis de fotografías aéreas, imágenes de satélite y adquisición de datos en campo se genera el mapa de subunidades geomorfológicas, representado principalmente por ambientes estructurales (55.85 %) y ambientes denudacionales (43.44 %) y la cartografía de los depósitos coluviales, los cuales se encuentran distribuidos a lo largo de la zona de estudio abarcando cerca de 9% del área. Se realiza el análisis estructural en la zona de estudio, donde se detalla la cartografía y cinemática de las fallas geológicas y se definen 2 patrones de fracturamiento en sentido SSW-NNE y NW-SE que coinciden con las principales estructuras geológicas. Se determina que la actual distribución de los depósitos coluviales se encuentra directamente relacionados con las estructuras geológicas y los procesos geomorfológicos. Los depósitos se encuentran limitados por altos topográficos que son producto de fallamiento de tipo inverso (fallas La Putana, Cristal-Canoas, Río Sucio y El Naranjo), donde el fracturamiento y la composición de las rocas favoreció la intensidad de los procesos morfodinámicos y propiciaron fenómenos de remoción en masa que fueron depositados principalmente en superficies de pendiente plana a semiplana, correspondiente a laderas erosivas de la Formación Umir.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías fisicoquímicas. Escuela de Geología. Director: María Alejandra Cetina Tarazona. Codirector: Oscar Fabian Sanchez Ortiz.

Abstract

Title: Geological, geomorphological mapping and structural analysis of the influence zone of colluvial deposits between the Serranía La Paz and the Filo de Cruces in the municipality of Lebrija (Santander)*

Author(s): Camilo Alexis Guzmán Plata**, Alexis Duvan Gonzalez Jaimes**

Key Words: Stress tensor, joint, transgression, regression, eustatic level, creep.

Description: In the area between the Serranía La Paz and the Filo de Cruces, municipality of Lebrija (Santander), a detail of the geological and geomorphological cartography is carried out at scale 1:25000, taking as a starting point the quadrangle H12-Bucaramanga and the Geomorphological map applied to mass movements of plate 109–Rio Negro, department of Santander. Through the analysis of aerial photographs, satellite images, and data acquisition in the field, the geomorphological subunits map is generated, represented mainly by structural environments (55.85 %) and denudational environments (43.44 %) and the cartography of colluvial deposits, which are distributed throughout the study area, covering about 9% of the area. The structural analysis is carried out in the study area, where the cartography and kinematics of the geological faults are detailed and 2 fracturing patterns are defined in the SSW-NNE and NW-SE direction that coincides with the main geological structures. It is determined that the current distribution of colluvial deposits is directly related to the geological structures and geomorphological processes, which are limited by high topographic faulting product, mainly of reverse (thrust) type (La Putana, Cristal-Canoas, Río Sucio and El Naranjo faults), where the fracturing and composition of the rocks favored the intensity of morphodynamic processes and led to mass removal phenomena that were deposited mainly on surfaces with flat to semi-flat slopes, corresponding to erosive slopes of the Umir Formation.

* Degree Work

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Geology. Director: María Alejandra Cetina Tarazona. Co-director: Oscar Fabian Sanchez Ortiz.

INTRODUCCIÓN

La distribución de los depósitos coluviales presentes en una zona determinada se encuentra directamente relacionada con la evolución espacio temporal de las rocas, las geoformas y las estructuras geológicas. La zona comprendida entre la serranía la Paz y el Filo de Cruces (Lebrija) se caracteriza por presentar una distribución heterogénea de depósitos coluviales en la mayor parte de su área (Ward *et al.*, 1973). En la zona de estudio, cerca del 70% de la vía Bucaramanga-Barrancabermeja se construyó sobre depósitos coluviales, los cuales han presentado importantes movimientos en masa (deslizamientos) en épocas recientes, causantes de los desplomes de los puentes ubicados sobre las quebradas Mata de Cacao y Caño Seco en los años 2012 y 2018, respectivamente, así como el desplome del puente de La Molinilla en el año 2019 (Suárez, 2019).

El área de interés carece de estudios suficientes que se centren en los depósitos cuaternarios y de información detallada relacionada con la geología, geomorfología y geología estructural, que permitan definir el papel de las estructuras geológicas, que afectan las rocas de la zona, en la evolución del relieve y en la distribución actual de los depósitos. Si bien se han adelantado estudios geológicos en la zona, estos han sido de carácter regional o principalmente geotécnicos y se encuentran restringidos por empresas que adelantan obras de construcción vial. Dado el alto interés turístico y comercial que representa la zona y la presencia de múltiples depósitos coluviales, se presenta el siguiente trabajo de grado en modalidad ‘investigación’ que busca responder la siguiente pregunta: ¿Cuáles son los factores y mecanismos que condicionan la distribución de los depósitos coluviales en la zona de estudio?

Teniendo en cuenta esto, los depósitos coluviales se definen como la acumulación de material muy cerca de su sitio origen, que proviene de las rocas adyacentes y se acomodan de tal manera que rellenan o suturan las paleoformas (García, 2014). La presencia de estos depósitos está directamente relacionada con procesos erosivos sobre laderas y determinados principalmente por la gravedad (Parrilla & Palacios 1995).

Colombia es un país que presenta escenarios geológicos muy complejos, donde se presentan debilidades estructurales, precipitaciones intensas, fluctuaciones de la temperatura, terremotos, actividad volcánica y acción humana que configuran los detonantes en la formación de los depósitos coluviales.

El departamento de Santander, a lo largo de muchos años se ha catalogado como un escenario turístico de gran importancia, donde en los últimos 5 años este ha aumentado principalmente en las zonas comprendidas entre Bucaramanga, Barrancabermeja y San Vicente de Chucurí, relacionado con la construcción del embalse y puesta en marcha de la represa Topocoro. Debido a esta mega obra se han adelantado otras obras como la pavimentación de la vía San Vicente de Chucurí – Sector Lisboa y parte de la vía Barrancabermeja – Bucaramanga. Todas estas obras impulsadas por la construcción de la represa y demás obras de infraestructuras aledañas han presentado múltiples problemas de inestabilidad, especialmente por movimientos del terreno en zonas donde se encuentran coluviones. Según Suárez, (2019) los pilotes del puente sobre la quebrada Mata de Cacao vía Bucaramanga – Barrancabermeja, se terminaron de construir en el 2012 y en tan solo un mes se generó el deslizamiento del coluvión, que deformó los pilotes y en dos meses los arrancó en su totalidad. Caso similar ocurrió con el puente sobre la quebrada Caño Seco, el cual se terminó de construir en el año 2013. Un estudio realizado por la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI) en el 2018 reportó que este puente se encontraba

sobre un depósito coluvial de aproximadamente 20 m de espesor, registrándose un agrietamiento en la superficie con un desplazamiento de 25 cm debido al movimiento del coluvión sobre la base del puente (Suárez, 2019). Otro caso similar es el ocurrido con el puente de La Molinilla sobre la vía que construyó ISAGEN hacia el municipio de San Vicente de Chucurí, el cual se construyó sobre depósitos coluviales, el puente sufrió desplazamiento de varios metros y agrietamientos considerables, finalmente, el puente tuvo que ser demolido en el año 2019 (Suárez, 2019).

La presencia de depósitos coluviales a lo largo de la zona de estudio fue reportada por Ward *et al.*, (1973), sin embargo, este corresponde a un estudio de carácter regional, otros estudios más locales están relacionados con la construcción de las vías Bucaramanga – Barrancabermeja y San Vicente de chucuri, a cargo de ISAGEN, o la construcción de la doble calzada Bucaramanga – Barrancabermeja correspondiente a la Ruta del Cacao. Estos estudios se encuentran restringidos por ser empresas de carácter privado. La identificación y caracterización de estos depósitos es fundamental en todos los estudios geotécnicos, puesto que la construcción sobre estos implica poner en riesgo la integridad de las obras y de la comunidad, es por esto que, radica la importancia de determinar su ubicación espacio temporal y entender los factores y mecanismos que condicionaron su distribución.

Con el fin de determinar lo anteriormente expuesto, se emplea la información adquirida en el municipio de Lebrija y suministrada por el grupo de Investigación en Geomática y optimización de sistemas en el proyecto de convenio interadministrativo No. 000132 de 2019 entre la Universidad Industrial de Santander (UIS) y el área metropolitana de Bucaramanga (AMB), disponiendo de autorización para el uso de dicha información.

Si bien, se cuenta con información geológica, geomorfológica y estructural tomada en campo, es importante tener en cuenta que la integración coherente de estos aspectos permite identificar mediante la cartografía geológica procesos evolutivos que conllevaron a la disposición actual de las rocas y depósitos cuaternarios. Basados en esta información de campo se identifican múltiples fallas, estructuras plegadas y depósitos coluviales que generan zonas de inestabilidad geológica. Actualmente no se han realizado trabajos que relacionen la distribución de los depósitos por su proveniencia y evolución espacio temporal, convirtiéndolo en un escenario de interés para el desarrollo del presente trabajo de investigación.

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Analizar la relación entre las estructuras geológicas y los procesos geomorfológicos en la distribución de los depósitos coluviales presentes en el área de estudio.

1.2. Objetivos Específicos

- Realizar un análisis, interpretación y síntesis de la información geológica y geomorfológica existente de la zona.
- Generar la cartografía de los depósitos coluviales a escala 1:25.000.
- Generar el mapa de subunidades geomorfológicas (SGMF) de la zona de estudio a escala 1:25.000.
- Analizar las principales estructuras geológicas que afectan las rocas que afloran el área de estudio.
- Proponer un modelo de evolución geológica local mediante bloques diagramas.

2. Generalidades

2.1. Localización área de estudio

El área de estudio (**Figura 1**) se ubica en las estribaciones occidentales de la Cordillera Oriental, departamento de Santander, entre la serranía La Paz y el Filo de Cruces, al NW del casco urbano del municipio de Lebrija; su área total es de 78.87 km² (7887 Has) y abarca parte de las veredas Uribe Uribe, El Tesoro, Centenario, La Girona, Canoas, El Líbano, La Floresta, Cútiga, Cristal, Río Sucio Bajo, Angelinos, Lisboa, Portugal, Río Sucio Alto y Cerro la Aurora. Geológicamente, el área de estudio hace parte del flanco Oriental del Sinclinal Nuevo Mundo, en la cuenca del Valle Medio del Magdalena (VMM), donde afloran rocas del Cretácico al Eoceno y depósitos del cuaternario. El polígono de estudio se encuentra limitado por las coordenadas planas $X_1= 1'088.248,224$, $X_2= 1'080.083,958$, $Y_1= 1'282.699,061$, $Y_2=1'293.297,287$, Datum Magna Sirgas origen central. La topografía base se tomó del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) a escala 1:25000 que comprende las planchas 109IIIB y 109IIID.

2.2. Antecedentes

Como información temática base se cuenta con el mapa geológico del Cuadrangulo-H12 Bucaramanga a escala 1:100.000 realizada por Ward et al., (1977), donde se muestra que el área de estudio hace parte del flanco oriental del Sinclinal de Nuevo Mundo, en el centro-oeste del mapa.

Información estratigráfica

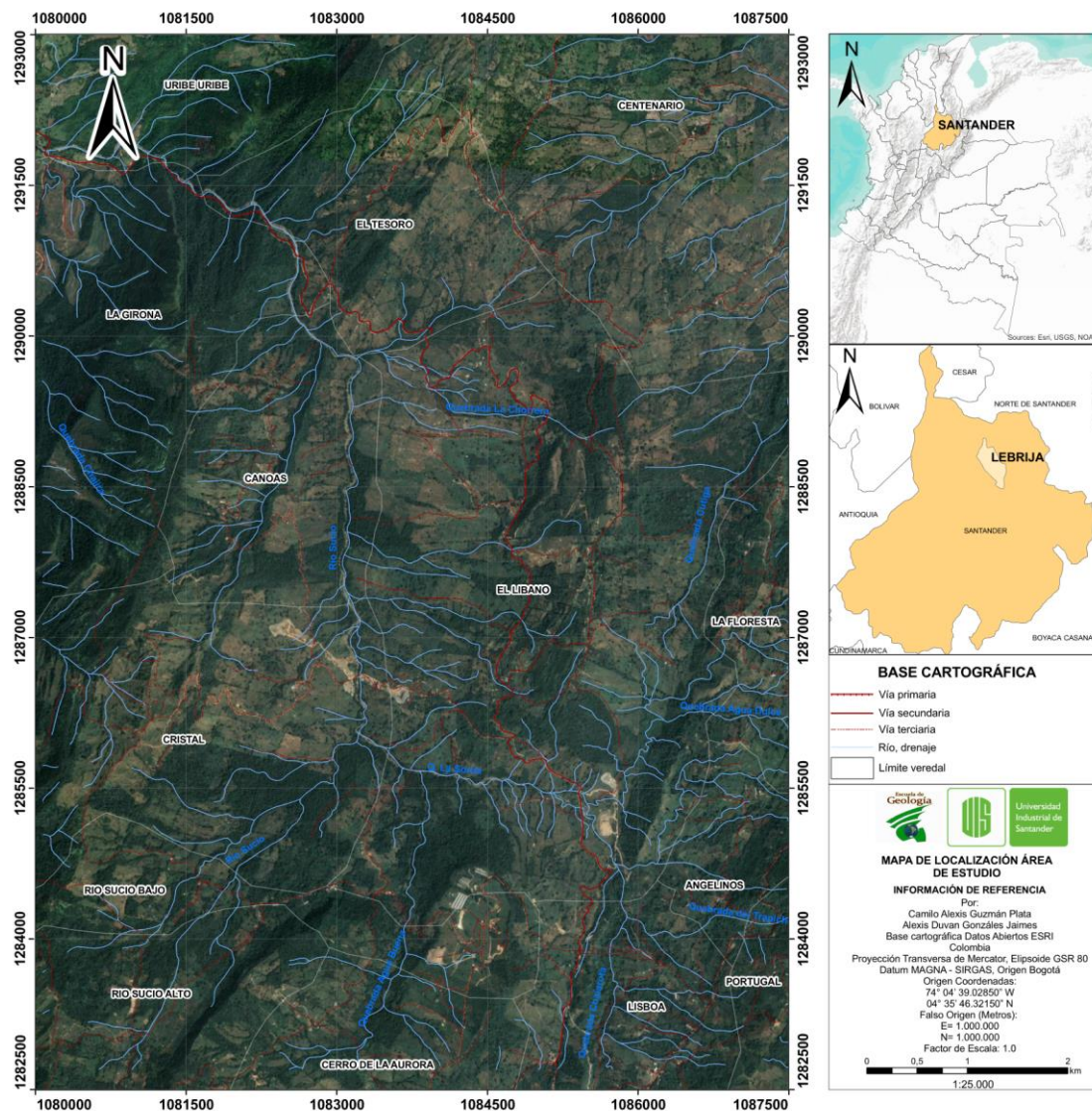
Ward et al. (1977) en su trabajo “Geología de los Cuadrángulos H-12 Bucaramanga y H-13 Pamplona departamento de Santander” da una descripción de las rocas aflorantes en esta zona del departamento. Dentro de su trabajo abarca la cuenca del Valle Medio del Magdalena, área del

presente estudio donde afloran rocas sedimentarias del periodo Cretácico y Paleógeno, conformadas por las formaciones Tablazo, Simití, La Luna, Umir, Lisama, La Paz y Esmeraldas.

Estudios de los depósitos coluviales se reportan en los trabajos realizados del proyecto de la Ruta del Cacao (Bueno, 2014), especialmente enfocados en geotecnia; y los publicados por Suárez (2019), donde se describen los elementos que intervienen en la formación de los depósitos coluviales.

Figura 1

Localización y vías de acceso en el área de estudio, municipio de Lebrija, Santander, Colombia.



Información estructural

La información estructural del área de estudio fue abordada inicialmente por Ward et al. (1977) quien en su trabajo “Geología de los Cuadrángulos H-12 Bucaramanga y H-13 Pamplona departamento de Santander” traza dos fallas inferidas, sin asignarles nombre, ubicadas al E y O del cerro El Naranjo, en sentido NNE-SSO afectando las formaciones Umir y Lisama.

Cetina y Patiño (2013) en su trabajo de grado titulado “Determinación de los tensores de esfuerzos asociados a la evolución del Flanco Oeste del Anticlinal de los Cobardes, Santander”, que más adelante es publicado en Cetina *et al.* (2019) como “Análisis de deformación al occidente del Anticlinorio de Los Yarigués-Cordillera Oriental de Colombia” realizan un análisis estructural a partir de la determinación de los tensores de esfuerzos asociados a la evolución del flanco O del anticlinal de los Yarigués, donde describen las fallas La Putana, El Naranjo y La Sorda, siendo estas dos últimas las mencionadas anteriormente como inferidas en Ward et al. (1977).

Jiménez et al. (2016) realiza un control cartográfico de la zona occidental del anticlinal de Los Yarigués y sugiere que la falla que afecta al Sinclinal de Nuevo Mundo corresponde a la Falla La Putana, determinándose como un back thrust de la Falla La Salina.

Información geomorfológica

En cuanto al contexto geomorfológico, el mapa geomorfológico aplicado a movimientos en masa plancha 109 – Rionegro, escala 1:100.000 (SGC - UIS 2014) muestra un dominio de geoformas estructurales y denudacionales. Las geoformas estructurales presentes son: Ladera de contrapendiente de Sierra sinclinal (Ssslc), Ladera estructural de sierra sinclinal (Sssle), Ladera estructural de sierra anticlinal (Ssale), Espinazo (Se), Cuesta (Sc). Las geoformas denudacionales

presentes son: Montículo y ondulaciones denudacionales (Dmo), Cono flujo de detritos (Dfe) y Cono o lóbulo coluvial y de solifluxión (Dco).

3. Marco teórico

El presente trabajo aborda conceptos relacionados con geología estructural y geomorfología, por lo que se hace necesario definir los términos más relevantes de cada disciplina.

Fallas

Según Niemeyer (1999) una falla es una fractura planar a lo largo de la cual la roca se ha desplazado según una dirección que es generalmente paralela al plano de ruptura, como consecuencia de la aplicación de un esfuerzo.

La clasificación en el dominio frágil basada en su desplazamiento o rechazo (movimiento relativo, a lo largo del plano de falla, de dos puntos que originalmente se encontraban adyacentes). se divide en fallas traslacionales y fallas rotacionales. En las primeras la magnitud y orientación del rechazo es el mismo en todas sus partes, y en las segundas, el rechazo cambia según la porción del plano que se considere (Niemeyer, H. 1999).

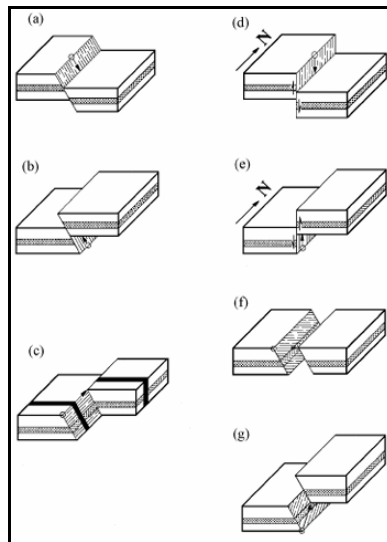
Las fallas se clasifican como fallas traslacionales y rotacionales. Las fallas traslacionales se clasifican, de acuerdo con su rechazo, en cuatro tipos principales: fallas normales, fallas inversas, fallas de rumbo y fallas con rechazo oblicuo (Figura 2). En los dos primeros tipos el movimiento se realiza según la dirección del buzamiento, en el tercero, como su nombre lo indica, el movimiento es paralelo al rumbo de la falla. Las fallas con rechazo oblicuo presentan movimiento compuesto, con componente según el buzamiento y según el rumbo.

Figura 2

(a) *Falla normal.* (b) *Falla inversa.* (c) *Falla de rumbo.* (d) *Falla vertical, baja bloque oriental.*

(e) *Falla vertical, baja bloque occidental.* (f) *Falla con rechazo oblicuo, sinistral normal.* (g)

Falla con rechazo oblicuo, sinistral inverso



Nota. Tomado de Niemeyer, H. (1999).

Las fallas rotacionales implican, como su nombre lo indica, una rotación de los bloques involucrados en la falla. Cuando la rotación se realiza dentro del plano de falla, se distinguen fallas con rotación a favor de los punteros del reloj y fallas con rotación en contra de los punteros del reloj. Las estrías de una falla rotacional son curvas. El sentido de movimiento de una falla rotacional se determina imaginando que el observador se encuentra parado en uno de los bloques, frente a la falla, mirando cómo gira el otro bloque, según un eje perpendicular al plano de falla. Es frecuente, en muchas fallas, observar estrías que indican movimientos alternantes translacionales y rotacionales, lo cual proporciona la posibilidad de establecer la historia estructural de un determinado terreno (Niemeyer, H. 1999).

Geomorfología

La geomorfología es la ciencia que trata de la descripción y es el estudio de la génesis, clasificación, procesos y evolución de las formas antiguas y actuales del terreno (tanto terrestres como submarinas) y su relación con las estructuras infrayacentes. Está enfocada al análisis de la superficie de la tierra, donde interactúan la litosfera, la hidrosfera, la atmósfera y la biosfera. Igualmente, las geoformas por definición son la expresión superficial del terreno, de la interacción dependiente de los materiales que las constituyen y su disposición estructural, de los procesos geomórficos que interactúan según el ambiente morfogenético específico donde se desarrollan, y el tiempo de duración de la acción de los mencionados procesos (Gregory, 1978)

La geomorfología a escala 1:25000 se trabaja a nivel de subunidades geomorfológicas tal como se establece en el esquema de jerarquización planteado en Carvajal (2012) (**Figura 3**). Esta categoría está establecida por los rasgos del relieve (escarpes naturales o antrópicos, relieves internos de laderas o flancos, crestas, formas de valle), definidos en sitios puntuales y determinados por la morfometría detallada del terreno en una subunidad geomorfológica. Estos elementos geomorfológicos son identificados con base en el levantamiento topográfico realizado para este fin, trabajo de campo y la interpretación del modelo digital del terreno (MDT).

Morfometría y Morfología

De acuerdo con Zuidam (1985), la morfometría trata de los aspectos cuantitativos de las geoformas: medidas, dimensiones y valores, mientras que la morfología trata de la apariencia y forma del relieve en general.

Figura 3

Esquema de jerarquización geomorfológica.



Nota. Tomado de Carvajal (2012)

Para el análisis morfométrico se tienen en cuenta los parámetros cuantitativos del terreno como la altura (a través de índices de contraste del relieve), pendiente de las laderas y longitud de estas, entre otros. A continuación, se describen dichos parámetros:

Índices de contraste del relieve. El relieve relativo presenta la diferencia de altitud de la geoforma, independientemente de su altura absoluta o nivel del mar. Ella se mide por la diferencia de alturas entre la parte más baja y alta, llámese colina, montaña, meseta, terraza. Para su aplicación a la Ingeniería Geológica, se definen las siguientes categorías; de muy bajo, moderadamente alto, alto y extremadamente alto.

Este atributo da una idea cualitativa general de los materiales constitutivos de las geoformas presentes en el área de estudio, a la vez que es un indicador de la energía potencial de un sistema de drenaje. La **Tabla 1**, muestra los rangos de contraste del relieve, tomados de Zuidam (1986) y la relación cualitativa de la resistencia de los materiales asociados. Este insumo es importante para evaluar la resistencia relativa de las rocas presentes en el área de estudio, por

lo que, dependiendo del intervalo de altura, se tendría una aproximación de la intensidad de los procesos erosivos que actúan sobre las unidades, así como de su litología.

Tabla 1








Índices de contraste de relieve.

INTERVALOS DE ALTURAS	DESCRIPCIÓN DEL RELIEVE	RESISTENCIA RELATIVA DEL MATERIAL
< 50 m	Muy bajo	Materiales muy blandos y erosionados
50 – 250 m	Bajo	Blando erosionado
250 – 500 m	Moderado	Moderadamente blando y erosión alta
500 – 1000 m	Alto	Resistente y erosión moderada
1000 – 2500 m	Muy alto	Muy resistente y erosión baja
> 2500 m	Extremadamente alto	Extremadamente resistente y erosión muy baja

Nota. Tomado de Zuidam (1986)

Pendiente. La calificación por pendiente se realiza en dos dimensiones y para esta se utiliza el Modelo de Pendientes (Slope), derivado del Modelo de Elevación Digital (DEM por sus siglas en inglés). Generalmente la inclinación de la pendiente está relacionada con el tipo de material que conforma la unidad morfológica y con la susceptibilidad de dicha unidad a la formación de los movimientos en masa. En general se puede afirmar que existe una relación directa y proporcional. Aunque si es un factor dinámico importante, esta relación no siempre es correlacionable y depende principalmente del tipo de movimiento. La **Tabla 2**, muestra la clasificación y descripción de rangos de pendientes con sus respectivos colores. La generación del mapa de pendientes ayudará a la delimitación de subunidades geomorfológicas y contrastar litologías.

Tabla 2*Clasificación y descripción de rangos de pendientes (°)*

COLOR PENDIENTE	PENDIENTE	DESCRIPCIÓN PENDIENTES
	<5	Plano
	6-10	Ligeramente inclinado
	11-15	Moderadamente inclinado o moderadamente ondulado
	16-20	Fuertemente inclinado
	21-30	Ligeramente escarpado
	31-45	Moderadamente escarpado
	>45	Fuertemente escarpado

Nota. Tomado de Carvajal (2012)

Longitud de la Ladera. La longitud de la ladera (

Tabla 3) es un posible indicador de la homogeneidad del material constitutivo de las geoformas, y se puede establecer una relación entre la longitud de la ladera y la homogeneidad del material (a mayor longitud mayor homogeneidad). Igualmente, la longitud de la ladera puede determinar una mayor superficie para el desarrollo de procesos morfodinámicos. Las anteriores relaciones no siempre son válidas y se deben analizar en conjunto con otros atributos que califican la ladera.

Tabla 3*Índices de Longitud de la ladera*

LONGITUD	DESCRIPCIÓN
< 50 m	Muy corta
50 – 250 m	Corta
250 – 500 m	Moderadamente larga
500 – 1000 m	larga
1000 – 2500 m	Muy larga
> 2500 m	Extremadamente larga

Nota. Tomado de Zuidam (1986)

Para el análisis morfológico se tiene en cuenta las formas de las laderas:

Forma de la Ladera. La forma de la ladera se puede categorizar en término recto, cóncavo, convexo, ondulada, irregular ó escalonada y compleja (

Tabla 4). Esta expresión de la pendiente refleja la homogeneidad en la resistencia de los materiales, y la presencia o control de estructuras geológicas.

Las formas de la pendiente igualmente condicionan los tipos de movimientos que pueden desarrollarse en una ladera. Es común relacionar deslizamientos rotacionales a pendientes cóncavas y convexas, movimientos planares a pendientes rectas controladas estructuralmente, o movimientos complejos a pendientes irregulares.

Tabla 4

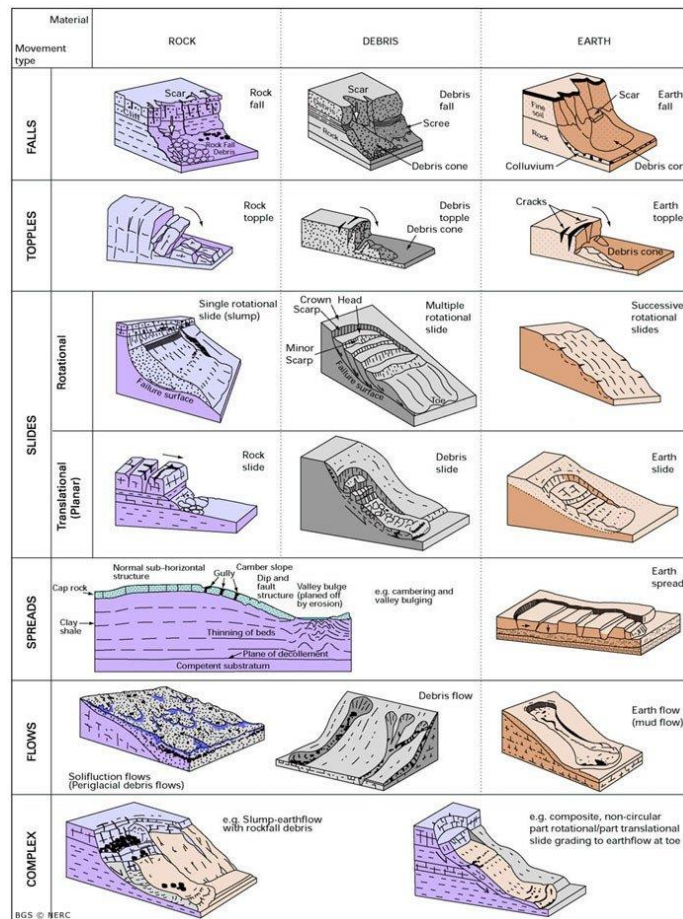
Formas de la Ladera.

CLASE	CARACTERÍSTICAS MATERIALES	FENÓMENOS DE REMISIÓN EN MASA ASOCIADOS
Recta	Alta resistencia y disposición estructural a favor de la pendiente.	Movimiento trasnacional
Cóncava	Material blando y disposición estructural no diferenciado.	Deslizamiento rotacional
Convexa	Materiales blandos y disposición estructural casi horizontal.	Predomina meteorización y erosión. Pequeños deslizamientos rotacionales
Irregular o escalonada	Materiales con resistencia variada. Disposición estructural en contra de la pendiente.	Caída de bloques. Erosión diferencial
compleja	Mezcla de materiales. Disposición estructural no definida.	Deslizamientos complejos

Nota. Tomado de Zuidam (1986).

Movimientos en masa

Los movimientos en masa serán clasificados, siguiendo lo propuesto por Varnes (1978), el esquema de clasificación es tomado de Cruden y Varnes (1996), como se observa en la **Figura 4**, y serán identificados a partir de imagen de satélite de Google Earth.

Figura 4*Clasificación de movimientos en masa*

Nota. Tomado de Cruden y Varnes (1996).

Deslizamiento. Cruden y Varnes (1996) definen este tipo de desplazamiento como un movimiento ladera abajo de una masa de suelo o roca, predominantemente a lo largo de una superficie de ruptura o de zonas relativamente delgadas sometidas a intensos esfuerzos de corte.

Según estos autores, la superficie de ruptura no se desarrolla de manera simultánea a lo largo de la masa que va a ser desplazada, sino que se inicia por agrietamientos en el terreno en la parte superior de la ladera, donde más tarde se conforma la corona del deslizamiento. En la parte inferior de la masa desplazada se conforma la pata del deslizamiento, la cual puede ser rebasada por la masa movilizada.

Flujo. El término flujo se refiere a movimientos espacialmente continuos con superficies de corte efímeras y estrechamente espaciadas, las cuales por lo general no se preservan. La distribución de velocidades en la masa desplazada se asemeja a la de un líquido viscoso. Su límite inferior puede ser una superficie a lo largo de la cual se ha presentado un movimiento diferencial apreciable o una zona espesa de cizallamiento distribuido.

Caída. Separación de una masa de roca o suelo desde un talud empinado, a lo largo de una superficie sobre la cual se puede presentar o no desplazamiento por cortante. Una vez ocurrido el desprendimiento, el material desciende a través del aire, principalmente en caída libre, rebotando o rodando (Cruden y Varnes 1996). La caída es un tipo de movimiento muy rápido a extremadamente rápido. Exceptuando el caso de que la masa haya sido desestabilizada por eliminación de soporte inferior por excavación o erosión por ejemplo, la caída puede estar precedida de pequeño deslizamiento o volcamiento que separa la masa desplazada del material in situ no perturbado.

4. Marco geológico

A continuación, se expone el marco geológico del área de estudio teniendo en cuenta la geología regional, estratigrafía, geología estructural y geomorfología.

4.1. Geología regional

Durante los periodos del Triásico Tardío y Jurásico se inicia a nivel mundial el rompimiento y fracturamiento del supercontinente Pangea, seguido por una extensión tipo back-arc afectando zonas del territorio actual colombiano, lo que generó en el paleo-relieve del VMM un evento de rifting acompañado por un vulcanismo explosivo generador del espacio de acomodación sobre el que se depositarían varios miles de metros de secuencias de origen continental y causante de esfuerzos transtensionales/tensionales, generando un estiramiento

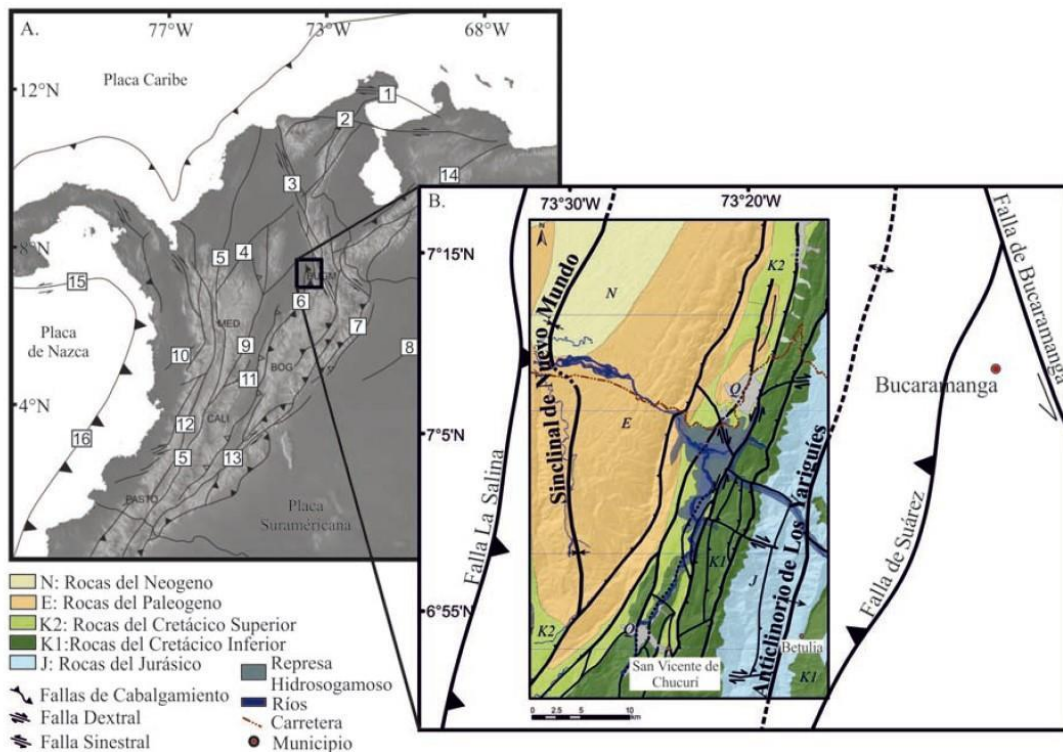
litosférico dando origen a cuencas tipo graben de hasta 150 km de amplitud en el VMM y el flanco oeste de la Cordillera Oriental (Subcuenca Tablazo-Magdalena) (Sarmiento-Rojas, 2001; Sarmiento-Rojas *et al.*, 2006). Estas cuencas extensionales, posteriormente en el Cretácico Inferior evolucionaron a sistemas de cuencas half-rift, caracterizados por ser asimétricos y de mayor extensión que los generados en el Triásico-Jurásico y cuyo origen se asocia a un posible efecto de estiramientos asociados a un back-arc (Cooper *et al.*, 1995; Sarmiento, 2011). Estas cuencas cretácicas están caracterizadas inicialmente por una sedimentación continental que para el Cretácico Inferior comenzaron a ser inundadas gradualmente por un mar epicontinental que ingresó por el occidente inundando en primer lugar la cuenca de Cundinamarca y posteriormente las subcuencas Tablazo-Magdalena y Cocuy (Etayo-Serna *et al.*, 1969). El registro sedimentario fue diverso a lo largo del Cretácico inferior con facies asociadas desde ambientes transicionales como costas y deltas; hasta ambientes marinos como plataforma interna, media y externa, abanicos submarinos (Cáceres *et al.*, 2003). Dicho mar epicontinental alcanza su máximo nivel de extensión a finales del Cretácico Inferior (Aptiano-Albiano) inundando el Valle Superior del Magdalena, sectores de las cuencas Cesar-Ranchería, la Sierra Nevada del Cocuy y se establece conexión con cuencas en territorio venezolano (Etayo-Serna *et al.*, 1969) y generando una sedimentación marina marcada por abundantes niveles de rocas de grano fino y calizas, las cuales se depositaron en fondos anóxicos (Villamil & Arango, 1998). Las rocas cretáceas representan un ciclo transgresivo-regresivo importante con una superficie de inundación máxima cerca del límite Cenomaniano-Turoniano, que corresponde al nivel eustático Mesozoico máximo (Fabre, 1985; Villamil, 1993). Superpuesto a esta tendencia a gran escala, existen varios ciclos transgresivos-regresivos más pequeños, lo que sugiere un nivel tectono-eustático relativo oscilante (Sarmiento-Rojas *et al.*, 2006).

Durante el Maastrichtiano al Paleoceno el levantamiento de la Cordillera Central junto con esfuerzos compresivos dieron origen a una cuenca de ante-arco involucrando las cuencas de la Cordillera Oriental, Llanos y VMM (Lozano y Zamora, 2014). Durante el Eoceno Tardío y Oligoceno Temprano la inversión tectónica y el levantamiento de la Cordillera Oriental se generó una sedimentación sintectónica principalmente continental relacionadas a sistemas de ríos meándricos hasta abanicos aluviales (Caballero *et al.*,2010). El cuaternario está caracterizado por depósitos heterogéneos relacionados con coluviones, taludes, terrazas y aluviones (Ward *et al.*, 1973) que se han generado por el desarrollo de pendientes y variaciones climáticas.

La (**Figura 5**) muestra la geología regional del Valle Medio del Magdalena, sobre el área de estudio.

Figura 5.

Geología regional del VMM en la zona de estudio



Nota. Tomado de Cetina *et al.* (2019).

4.2. Unidades litoestratigráficas

Las unidades litoestratigráficas pertenecientes a la cuenca del VMM que afloran en el área de estudio son las siguientes:

Formación Tablazo

La unidad está conformada por calizas grises a negras, fosilíferas, localmente glauconíticas y arcillosas de color negro, con niveles intercalados de arcillolitas calcáreas, fosilíferas de color gris a gris azulado, en capas medianas a gruesas, con intercalaciones capas delgadas de areniscas grises arcillosas, levemente calcáreas, grano fino a medio, espesor 275 m; de edad del Aptiano superior – Albiano inferior según su posición estratigráfica. Etayo (1968), mediante fauna colectada en la región entre Sáchica y Puente Samacá, la considera de edad Aptiano Superior – Albiano Inferior. El contacto inferior es concordante y gradacional con la Formación La Paja y concordante con la suprayacente Formación Simití (Ward *et al.*, 1973).

Formación Simití

La Formación Simití fue descrita por geólogos de Intercol (Morales 1958), su localidad tipo se encuentra en la orilla sur de la Ciénaga de Simití, Bolívar, La unidad consta de shale carbonoso gris a negro, levemente calcáreo, con concreciones calcáreas hasta de 3 m y con intercalaciones de capas delgadas de areniscas y calizas grises, localmente arcillosas y fosilíferas; su espesor es de 410 m en la sección expuesta a lo largo de la orilla sur de la Ciénaga de Simití, en el departamento de Bolívar (Ward *et al.*, 1973). Según Moreno y Sarmiento (2002 en Morales *et al.*, 2010), quienes realizaron la sección estratigráfica correspondiente a la Formación Simití levantada al suroeste de San Gil, midieron en esta formación un espesor de 266 m, sin encontrar la unidad suprayacente. Se le ha asignado una edad Albiano inferior, medio y superior basada en su registro fósil.

Formación La Luna

Definida inicialmente por Garner (1926) en una quebrada homónima en el Perijá venezolano como “La Luna Limestone”. Hedberg y Sass (1937 en Morales 1958) realizan una descripción detallada y le asignan el rango estratigráfico de Formación. Posteriormente, Notestein *et al.* (1944 en Ward *et al.*, 1973) por medio de estudios realizados en la Concesión Barco, extienden este término a Colombia debido a la similitud con las rocas aflorantes. Morales (1958) amplió este término en la descripción de los depósitos de la cuenca del (VMM) y dividió la Formación en tres miembros: Salada, Pujamana y Galembo. El miembro Salada (inferior) está compuesto por shales negros calcáreos de estratificación delgada, duros y algunos niveles de calizas negras interestratificadas. Su espesor aproximado es de 50 a 100 m. El miembro Pujamana está compuesto por shale de estratificación delgada, calcáreo lodolitas fósiles calcáreas y el miembro superior o miembro Galembo constituido de lutita negra dura y calcárea con capas delgadas de chert negro, concreciones de caliza y capas fosfáticas y espesor aproximado de 200 m.

Aunque las interpretaciones cronoestratigráficas y paleoambientales observadas en Colombia concuerdan en gran medida con las descritas para Venezuela, el uso del término Formación La Luna en zonas como el VMM no ha estado exento de discusión (Patarroyo *et al.*, 2021). Por ejemplo, Terraza-Melo (2019) en un trabajo reciente realizado en la región del embalse del río Sogamoso aboga por el abandono de la Formación La Luna *sensu stricto* y eleva a unidades formacionales los miembros Salada, Pujamana y Galembo, siguiendo la propuesta original de Wheeler (1929). De igual forma, propone una nueva unidad litoestratigráfica para el segmento más superior, compuesto principalmente de niveles fosfáticos (Formación La Renta).

Formación Umir

De acuerdo con Taboada (1965) el que primero usó el termino Umir fue Huntley (1917), para referirse a los shales expuestos en el lado occidental de Cerro del Umir, incluyendo lo que se conoce actualmente como formación Lisama, de acuerdo con Morales (1958) esta unidad fue redefinida por Link (1925), quien separo ambas unidades, limitando la formación Umir solo a la sección cretácea. Royero y Clavijo (2001) describen esta unidad como shales grises a negros, carbonosos, micáceos, con concreciones ferruginosas, arcillolitas y lodolitas carbonosas, con nódulos ferruginosos e intercalaciones de areniscas y limolitas, con presencia de capas de carbón entre 0,60 a 5,00 m de espesor. Su contacto inferior con la Formación La Luna es inconforme y su contacto superior con la Formación Lisama es conforme (Ward *et al.*, 1973). El espesor varía de 1000 a 1400 m su edad es Campaniano a Maestrichtiano.

Formación Lisama

De acuerdo con Morales (1958) esta unidad fue descrita por primera vez por Link (1925) con un espesor de 1.090 m a 1.225 m sobre la quebrada Lisama, afluente del río Sogamoso, y con una variación de espesor en el Sinclinal de Nuevo Mundo con 530 m (Caballero *et al.*, 2010). Aflora al occidente de Santander y su sección tipo se ubica en la quebrada Lisama. litológicamente está compuesta por limolitas abigarradas con intercalaciones de areniscas verdes y pardas, hacia el tope presenta algunas capas delgadas de carbón (Royero y Clavijo, 2001; Caballero *et al.*, 2010). Según Moreno *et al.* (2011) la base está compuesta por areniscas de color café, con lodolitas a arcillolitas y limolitas, y hacia el tope incluye areniscas en capas gruesas con intercalaciones de lodolitas. La unidad presenta un contacto normal y transicional con la Formación Umir que la infrayace; la edad es Paleoceno de acuerdo con análisis palinológicos

(Van der Hammen, 1958). La Formación Lisama se ha interpretado como el producto de depósitos continentales, deltáicos (*Moreno et al., 2011*) y aluviales (*Caballero et al., 2010*).

Formación la Paz

La Formación La Paz fue descrita originalmente por geólogos de la Tropical Oil Company (en Morales 1958) y su sección tipo se encuentra en la angostura del río Lebrija, por la vía férrea, debajo del corregimiento de Vanegas (Lebrija). Está constituida por areniscas grises conglomeráticas, conglomerados, limolitas y grandes paquetes de lutitas grises. Su origen se asocia a un ambiente de corrientes trenzadas.

Formación Esmeraldas

La Formación Esmeraldas fue formalizada según Sarmiento *et al.*, (2015) por Morales 1958, tras la recopilación de trabajos realizados por la industria petrolera desde el inicio de la exploración de hidrocarburos en la cuenca del VMM en 1920, todas las localidades tipo están asociadas al Sinclinal de Nuevo Mundo. La Formación La Paz toma su nombre de la serranía o escarpe extendido entre el Río Sogamoso y el Río Lebrija, ríos que cortan perpendicularmente a la unidad, al igual que el Río Sucio. El contacto con la Formación Lisama es neto, erosivo, mostrando un evidente cambio litológico y por ende en los medios sedimentarios y una fuerte activación de las áreas de aporte terrígenas. El espesor es bastante variable llegando a 1.500m al sur de la localidad tipo en dirección al cierre de la estructura sinclinal (Sarmiento *et al.*, 2015). Está compuesta por intercalación de paquetes de capas de arenitas gris a gris verdoso de grano fino a medio con alto contenido de líticos y mica, gruesos niveles de arcillolitas. Las arcillolitas son varicoloreadas hacia el flanco E del SNM y grises oscuras con abundante materia orgánica (shales) hacia el flanco E del SNM donde también se intercalan localmente algunos paquetes de

arenitas de grano medio a grueso en capas gruesas hasta 8 m de espesor. Los niveles arenosos de esta unidad presentan buena continuidad lateral (Caballero *et al.*, 2010).

4.3. Geología estructural

Las estructuras geológicas regionales (Fallas y pliegues) pertenecientes a la cuenca del VMM son las siguientes:

Falla La Putana

Se identifica como una falla inversa de estilo mixto generada a partir de una falla principal, presenta un rumbo N30°E, con buzamiento WNW y vergencia ESE, con una longitud aproximada de 53 Km, su trazo presenta una expresión geomorfológica marcada por el cambio de pendiente dentro de la Formación Lisama, la cual es afectada por esta falla en todo el flanco Este del Sinclinal de Nuevo Mundo (Cetina y Patiño, 2013).

Falla El Naranjo

Es una falla inversa con rumbo N25°E, buzamiento WNW con vergencia ESE y una longitud de 45 Km. Representa una falla mixta que se desprende en retro-cabalgamiento de la Falla de San Vicente a profundidad. Su expresión geomorfológica está caracterizada por cerros levantados y alineados. La estructura limita el oeste del Sinclinal Naranjos (Cetina y Patiño, 2013).

Falla Cútiga

En Cetina y Patiño (2013) la Falla Cútiga es nombrada como la Falla La Sorda, sin embargo, en el presente trabajo se sigue la nomenclatura propuesta por Suárez, (2019), ya que la estructura sigue mayoritariamente el rumbo de la quebrada Cútiga. La estructura presenta un comportamiento inverso con rumbo NNE-SSW y vergencia al este y hace parte de las fallas que

se desprenden a profundidad de la Falla de San Vicente. Su expresión geomorfológica está caracterizada por el cambio de pendiente que se observa en el terreno (Cetina y Patiño, 2013).

Falla La Parroquia

Esta falla presenta un comportamiento de rumbo sinistral con un leve movimiento inverso y una tendencia NNE, de igual manera se desprende a profundidad de la Falla de San Vicente (Cetina y Patiño, 2013).

Falla Portugal

Corresponde a una falla con cinemática inversa, buzamiento WNW, vergencia ESE y una longitud aproximada de 43 Km; su azimut de rumbo es subparalelo a la Falla de San Vicente y se identifica como un retro-cabalgamiento asociado a dicha falla principal. Afecta a las formaciones Rosa Blanca, Los Santos y Girón (Cetina y Patiño, 2013).

Falla Pujamanes

La cinemática es tipo inversa con componente dextral, tiene rumbo de N60°E, buzamiento NW, vergencia al SE y una longitud aproximada de 6 Km (Cetina y Patiño, 2013).

Falla Río Sucio

Es una falla inversa, que comienza en el extremo sur del eje del anticlinal de Río Sucio, atravesando las formaciones Umir y Lisama en la ladera occidental del Cerro La Aurora, siendo la prolongación del eje de este anticlinal y continuándose hacia el sur, hasta el municipio de Girón. Según el proyecto de consultoría desarrollado por la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI) en el año 2015, esta falla atraviesa parte de la cabecera del Río Sucio, pero sólo es evidente en la ladera occidental del Cerro La Aurora, ya que el resto de la misma es parcialmente cubierta por un espeso coluvión que se presenta en el área.

Sinclinal Naranjo

Conforma una depresión estructural que afecta las unidades litológicas que muestran el cambio del Cretácico al Triásico. Su eje se dispone en dirección nordeste y se origina en El Cerro La Aurora, continuándose en el Cerro Los Naranjos, hasta terminar en la cabecera de la quebrada Palo Blanco; la estructura sinclinal se encuentra limitada al oeste y este por fallas paralelas y se muestra atravesando dos franjas alargadas de la formación Lisama. Los buzamientos de los estratos en cercanías al eje de este anticlinal son suaves y consolidan una topografía de moderada inclinación. Este sinclinal es cortado por una la quebrada La Sorda o Chafacota, localizada sobre el flanco occidental del cerro La Aurora (ANI, 2015).

Anticlinal de Río Sucio

Se presenta a lo largo de la cabecera del Río Sucio, desde donde se proyecta con una dirección noreste. Su eje está dispuesto a lo largo de la formación Umir; en donde afloran franjas alargadas de la formación Lisama, que sobresalen con gruesos estratos de areniscas que suprayacen la formación Umir, estas franjas aisladas tienen un buzamiento hacia el oeste evidenciando que el eje del anticlinal ha sido erodado, lo que promueve la generación de amplios depósitos coluviales que cubren gran parte de la zona; el extremo sur del eje de este anticlinal termina en una falla de tipo inverso que se identifica como la falla Río Sucio (ANI, 2015).

4.4. Geomorfología

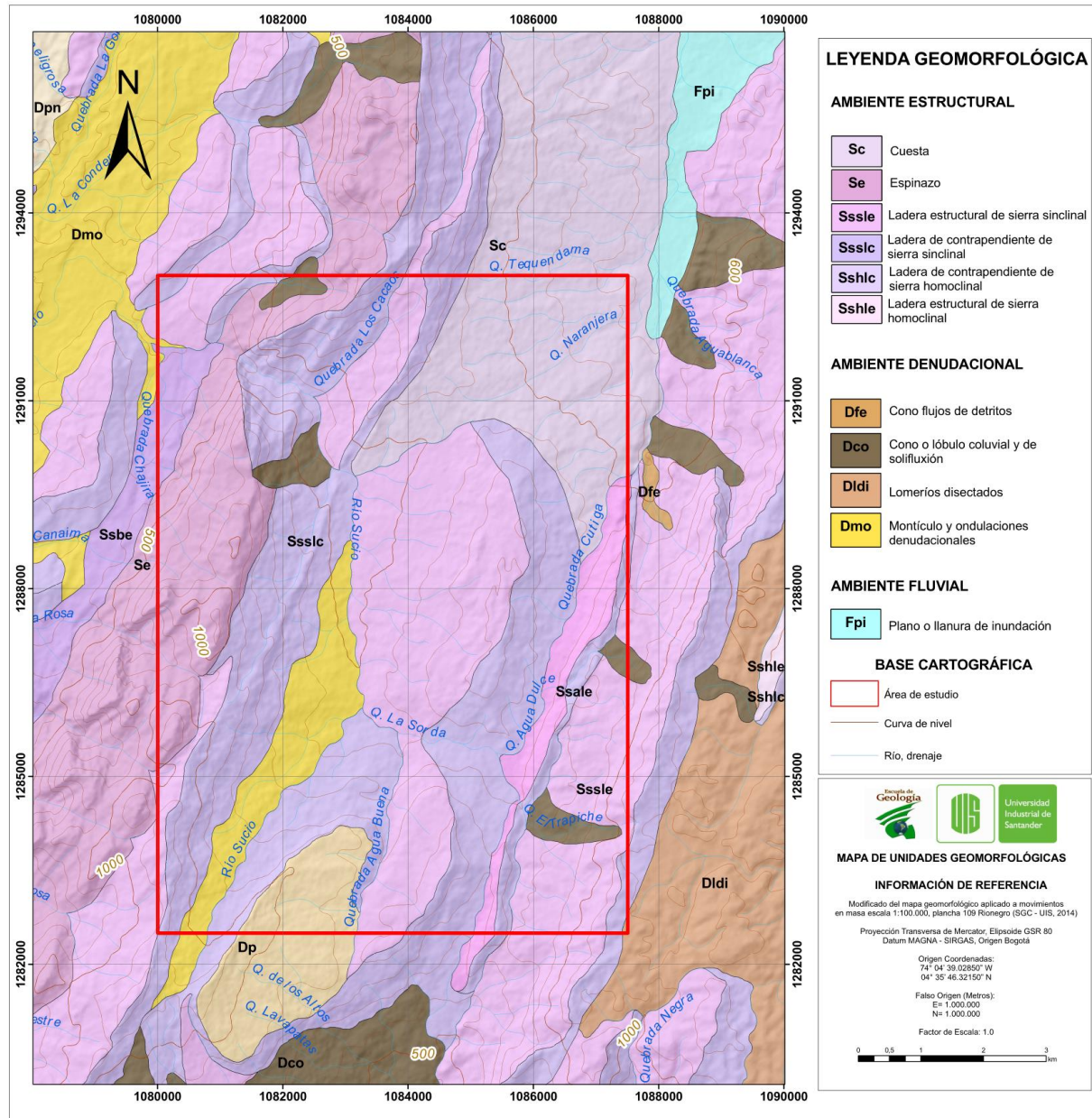
El territorio colombiano presenta gran diversidad de ambientes geomorfológicos que están asociados a procesos endógenos y exógenos, con degradación y agradación del relieve. El departamento de Santander se encuentra ubicado en la geomorfoestructura denominada Sistema Orogénico Andino. la cual está dividida en tres provincias: provincia Cordillera Oriental al este,

Cordillera Central al oeste y Valle Interandino del Magdalena al centro (SGC - UIS, 2014). El área de estudio se ubica sobre la provincia cordillera oriental.

Las unidades geomorfológicas presentes en la zona de estudio (**Figura 6**) son de origen estructural y denudacional, principalmente. Estas son descritas en la memoria explicativa del mapa geomorfológico aplicado a movimientos en masa escala 1:100.000. Plancha 109 Rionegro, departamento de Santander (SGC - UIS, 2014). Las unidades de origen estructural dentro del área de estudio son: Ladera de contrapendiente de sierra sinclinal (Ssslc), ladera estructural de sierra sinclinal (Sssl), ladera estructural de sierra anticlinal (Ssal), Cuesta (Sc) y Espinazo (Se). Las unidades de origen denudacional dentro del área de estudio son: Montículo y ondulaciones denudacionales (Dmo), cono o lóbulo coluvial y de soliflucción (Dco), Planicie (Dp) y Lomeríos disectados (Dldi).

Figura 6

Ubicación de la zona de estudio en el mapa geomorfológico aplicado a movimientos en masa escala 1:100.000 plancha 109 Rionegro



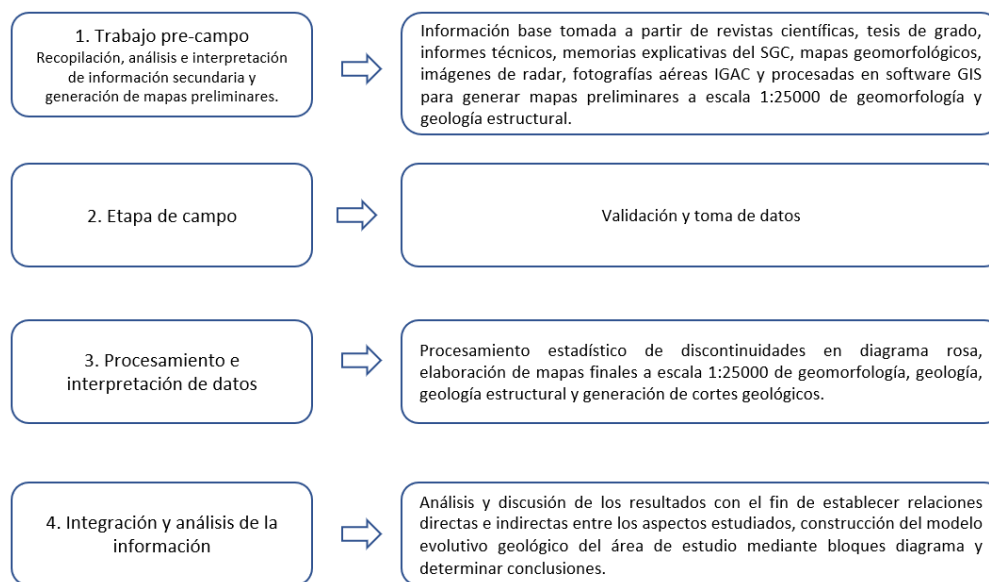
Nota. Modificado de SGC y UIS (2014).

5. Metodología

A continuación, se explica la metodología seguida por el presente trabajo (**Figura 7**), la cual consistió en el análisis de tres aspectos: geomorfología, geología y geología estructural a escala 1:25.000 respectivamente, mediante cuatro etapas: 1) Recopilación y análisis de información secundaria y generación de mapas preliminares; 2) Validación y toma de datos; 3) Procesamiento e interpretación de los datos; 4) Integración, procesamiento y análisis de resultados.

Figura 7

Metodología propuesta para la realización del proyecto.



i. Trabajo pre-campo. Recopilación, análisis e interpretación de información secundaria y generación de mapas preliminares:

La primera etapa consistió en la recopilación de información base a partir de artículos de revista, tesis de grado, informes técnicos, e insumos de geomorfología (memorias explicativas del SGC, mapa geomorfológico aplicado a movimientos en masa plancha 109 – Rionegro, escala 1:100.000; SGC - UIS, 2014). Se analizó e interpretó la información empleando los siguientes

insumos: imágenes de satélite de Google Earth, imagen de radar del satélite ALOS a través del sensor PALSAR con resolución espacial de 12,5 m obtenido a través de la página Alaska Satellite Facility (<https://search.asf.alaska.edu/#/>), procesadas en un software de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y las fotografías aéreas C-2595-005, C-2595-006, C-2595-007, C-2774-215 Y C-2774-216 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y la ortofoto levantada en el marco del proyecto (**Tabla 5**).

Tabla 5

Fotografías vuelos IGAC que se usaron en el proyecto.

VUELO	FECHA	ESCALA
C 2595 005	31-08-1996	1:41.927
C 2595 006	31-08-1996	1:41.885
C 2595 007	31-08-1996	1:42.308
C 2774 215	31-12-2005	1:45.830
C 2774 216	31-12-2005	1:45.830
C 2774 217	31-12-2005	1:45.830

Nota. El presente recurso fue adquirido por medio del proyecto UIS-AMB (2019)

El análisis de la geología estructural se desarrolló con los insumos mencionados. Este análisis se realizó enfatizando en fallas, lineamientos, diaclasas y actitud de los estratos. El Modelo Digital del Terreno (MDT), las imágenes de satélite de Google Earth y las fotografías aéreas se usaron para realizar un detalle de la cartografía de las estructuras y generar el mapa estructural del área de estudio.

Las unidades geológicas fueron delimitadas inicialmente con base al mapa geológico a escala 1:100.000 de Ward *et al.*, (1977), y reinterpretadas con las herramientas de fotointerpretación para obtener un mapa preliminar de campo.

El mapa de subunidades geomorfológicas preliminar, posteriormente usado en campo, se realizó tomando como base los insumos descritos, analizados en software SIG y siguiendo la propuesta de Carvajal (2012)

En esta primera etapa, además, se identificaron las diferentes vías de acceso (**Figura 1**) y posibles afloramientos de interés, para facilitar el desarrollo de la etapa 2.

ii. Etapa de campo

La etapa de campo se realizó en el marco del convenio interadministrativo N° 00132 de 2019 cuyo objetivo fue “*Aunar esfuerzos entre el área metropolitana de Bucaramanga y la universidad industrial de Santander, para la asesoría técnica, socioeconómica, normativa y ambiental para la definición y ubicación de un único sitio para la construcción del relleno sanitario regional*”. El trabajo de campo fue llevado a cabo en el mes de octubre del año 2019.

En la etapa de campo se realizó la validación y toma de datos, se destinaron dos días para el reconocimiento y ubicación de zonas de interés para planificar los recorridos y transectas de las siguientes salidas de campo. La medición de planos de discontinuidades se realizó usando brújula Brunton, ajustada a una declinación magnética de -8° , valor tomado de la página World Magnetic Model para la zona. Se utilizaron los siguientes instrumentos: brújula para geología, ácido clorhídrico, lupa geológica 10x, martillo geológico, tablas de tamaño de grano, cámara fotográfica, libreta de campo y GPS.

La cartografía geológica se desarrolló a partir de transectas perpendiculares al rumbo de las capas, siguiendo las vías de acceso del área de estudio. Se hizo énfasis en delimitar y caracterizar los depósitos coluviales y se analizaron muestras de roca características de cada unidad geológica, que permitieron la identificación de las unidades aflorantes en la zona de estudio.

Se realizaron 15 días de campo en los cuales se registraron 59 estaciones de campo tal como se observa en la **Figura 8**. En total se realizaron 60 puntos de control, 44 mediciones de planos de estratificación y 69 mediciones de planos de diaclasas.

iii. Procesamiento e interpretación de datos

La información secundaria y de campo fue procesada en conjunto con el fin de generar mapas finales de geomorfología, geología y geología estructural a escala 1:25.000 y sus respectivos cortes geológicos. Toda la información fue organizada en un SIG bajo la arquitectura del programa ArcMap V. 10.6.1.

La cartografía geomorfológica se realizó en base a la propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica de Colombia de Carvajal (2012) y se describe en el apartado de marco teórico, el procesamiento estadístico de los datos de diaclasas fue a través del Software Dips 7.0, de la firma RocScience. Se generó un diagrama rosa agrupando todos los datos levantados con el fin de mostrar relaciones con las fallas regionales y unidades geológicas deformadas.

iv. Integración y análisis de la información

Se realizó el análisis de la información producto de las etapas anteriores. Se tuvo en cuenta los mapas generados (geológico, geomorfológico), datos estructurales y demás datos. Toda la información generada fue analizada y discutida individualmente y en conjunto, con el fin de establecer relaciones directas e indirectas entre los aspectos estudiados, que permiten sacar conclusiones de los objetivos planteados y realizar la integración de los resultados para generar como producto final este informe con los resultados del proyecto.

El análisis estructural se enfocó en establecer las fallas y pliegues menores y realizar análisis estadísticos de diaclasas con diagrama rosa para establecer patrones de fracturamiento.

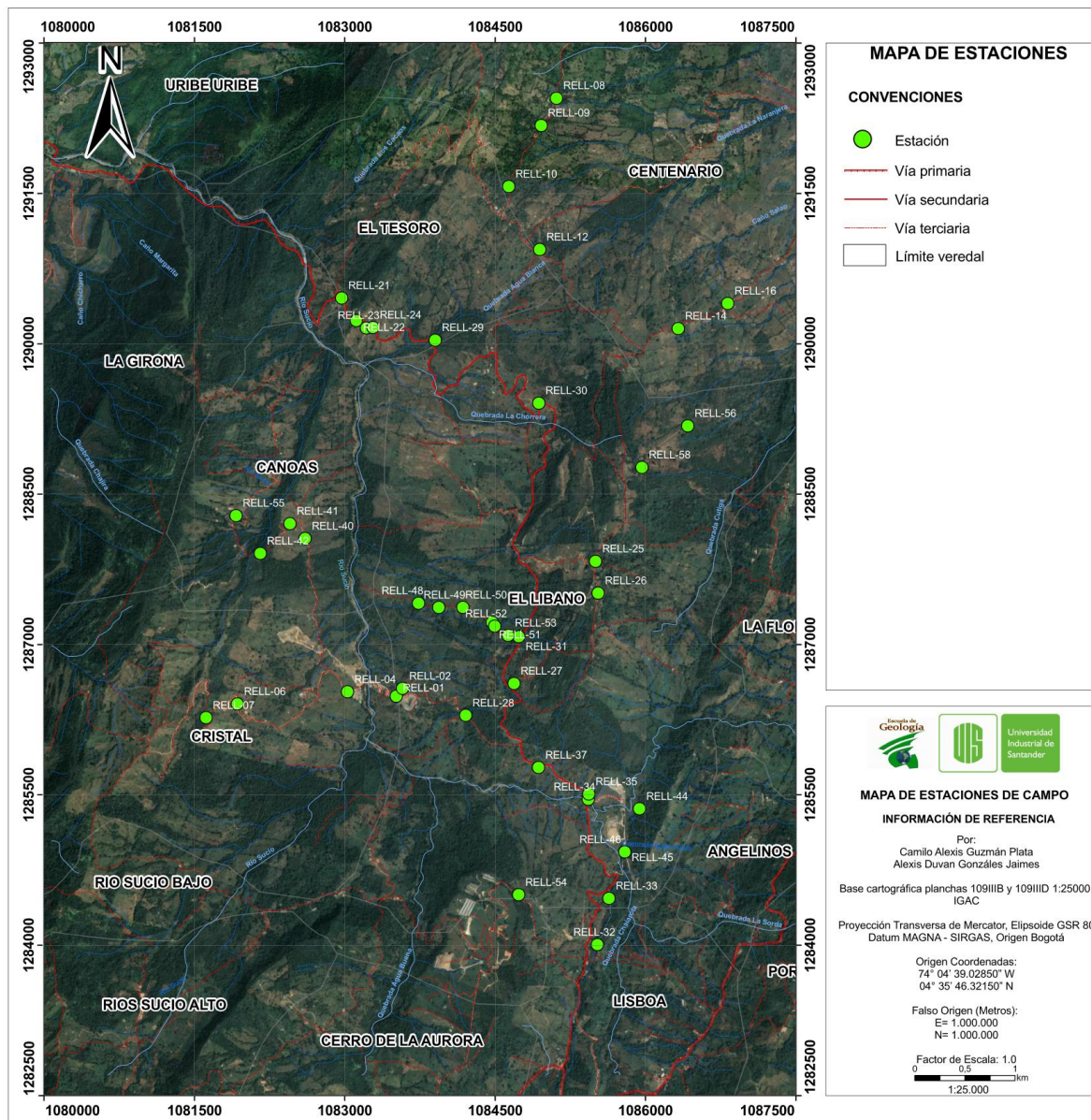
6. Resultados

A continuación, se exponen los resultados del presente trabajo que abarcan la cartografía geológica, estratigrafía, geología estructural, geomorfología y propuesta del modelo evolutivo de la zona de estudio.

6.1. Cartografía geológica

El total de estaciones de campo realizadas se plasman a continuación en la **Figura 8**. Teniendo en cuenta lo anterior, se realizó el mapa geológico (**Figura 9**). Las formaciones geológicas que afloran en la zona corresponden a las rocas sedimentarias de las formaciones Tablazo, Simití, La Luna, Umir, Lisama, La Paz y Esmeraldas. De las formaciones Tablazo Simití, La Paz y Esmeraldas no hubo registro en campo, por lo que se describen con base en información secundaria.

Por otra parte, la Formación Lisama pudo ser dividida en tres segmentos llamados, segmento inferior, medio y superior debido a diferencias texturales y su expresión geomorfológica evidenciadas en el trabajo de campo. Finalmente, se cartografiaron los ejes del Sinclinal El Naranjo y El Anticlinal Rio Sucio y los trazos de las fallas de cabalgamiento La Floresta, Cútiga, El Naranjo, Rio Sucio, Cristal-Canoas y La Putana; la Falla normal La Sorda, la Falla de rumbo dextral El Libano y diferentes fallas sin definición de su movimiento en dirección noreste. Cada una de las unidades geológicas son descritas en el capítulo de estratigrafía y cada una de las estructuras geológicas en el capítulo de geología estructural.

Figura 8*Mapa de estaciones de campo.*

6.2. Estratigrafía

En el área de estudio afloran rocas sedimentarias y depósitos no consolidados, que reportan edades desde Cretácico Superior hasta el Eoceno superior y Cuaternario. Su registro representa una secuencia normal de descapotamiento que contiene información sobre la historia de exhumación de las Cordilleras Central y Oriental de Colombia (Caballero, 2010).

Los depósitos del sistema Cretácico el cual muestra asociación de litofacies sedimentarias ricas en materia orgánica representada por un ambiente de transgresión marina, mientras que los depósitos siliciclásticos de Paleógeno muestran asociaciones de litofacies sedimentarias que representan una transición de sistemas marinos marginales a meandros mixtos y sistemas fluviales trenzados en el Valle Magdalena Medio (Moreno *et al.*, 2011).

La (**Figura 10**) muestra la columna generalizada del área de estudio.

6.2.1. Sistema Cretácico

El sistema Cretácico que aflora en el área de estudio, y en sus inmediaciones, corresponde a las formaciones con nomenclatura del Valle Medio del Magdalena Tablazo, Simití, La Luna y Umir. En el trabajo de campo realizado en el presente estudio no se cuenta con registro de las formaciones Tablazo y Simití, motivo por el cual se toma como referencia la información expuesta en el marco geológico.

Formación La Luna. Se encuentra al este del área de estudio en estratos de mediano a alto buzamiento que constituyen el margen W del Filo de Cruces, se encuentra en contacto fallado en algunas zonas y cerca de una falla con la suprayacente Formación Umir (Falla Cútiga). En el área de estudio, la unidad presenta calizas y liditas (**Figura 11**). La Formación La Luna fue abarcada en las estaciones RELL-32, RELL-33 y RELL-45.

Sobre el área de estudio afloran los miembros de la Formación La Luna (Galembo, Pujamana y Salada) siguiendo la clasificación de Morales (1958), sin embargo, el estudio reciente de Terraza-Melo (2019), introduce una nueva unidad, la cual no se discriminó en el presente trabajo.

Figura 9

Mapa Geológico y corte geológico A-A' de la zona de estudio.

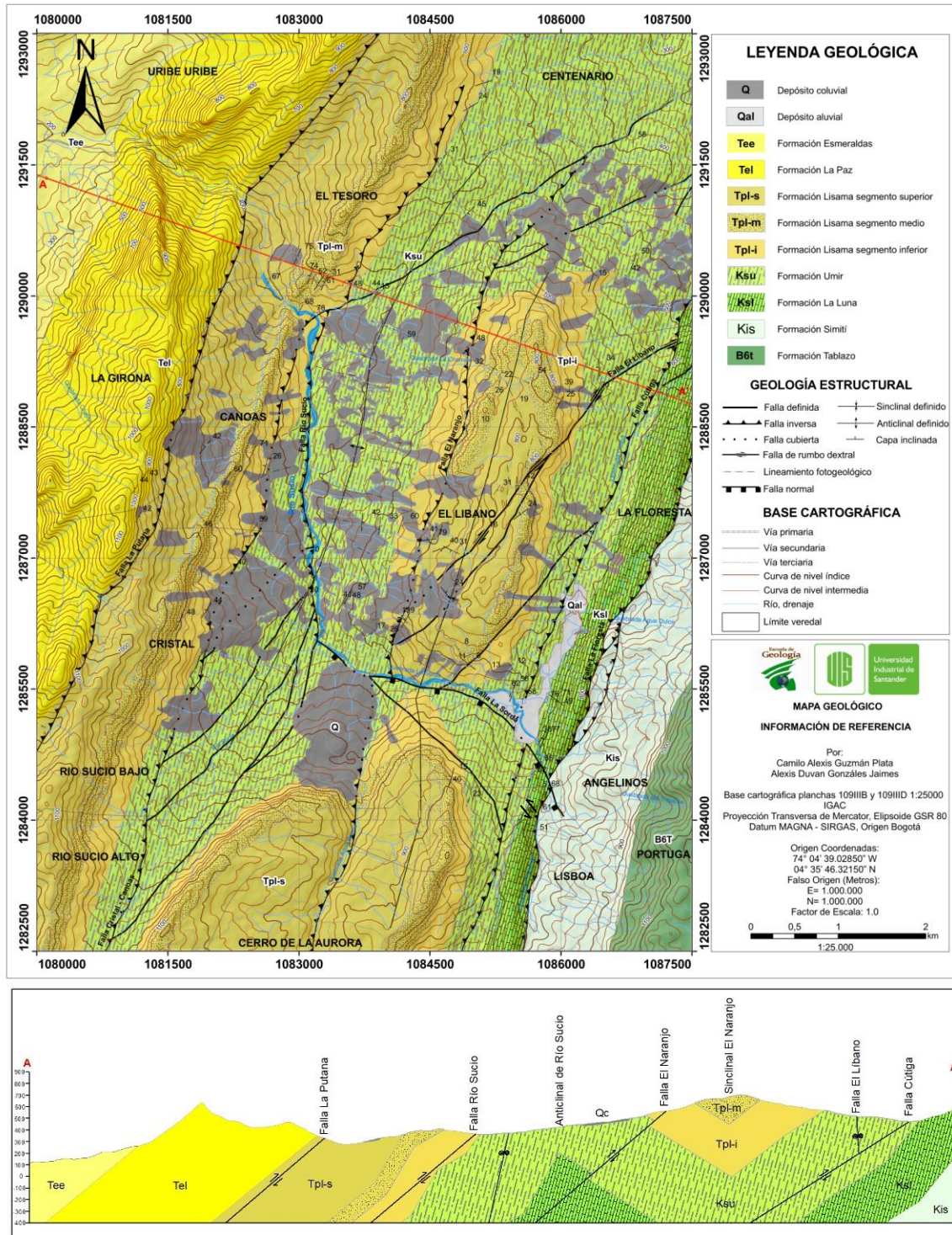


Figura 10

Columna estratigráfica generalizada del área de estudio

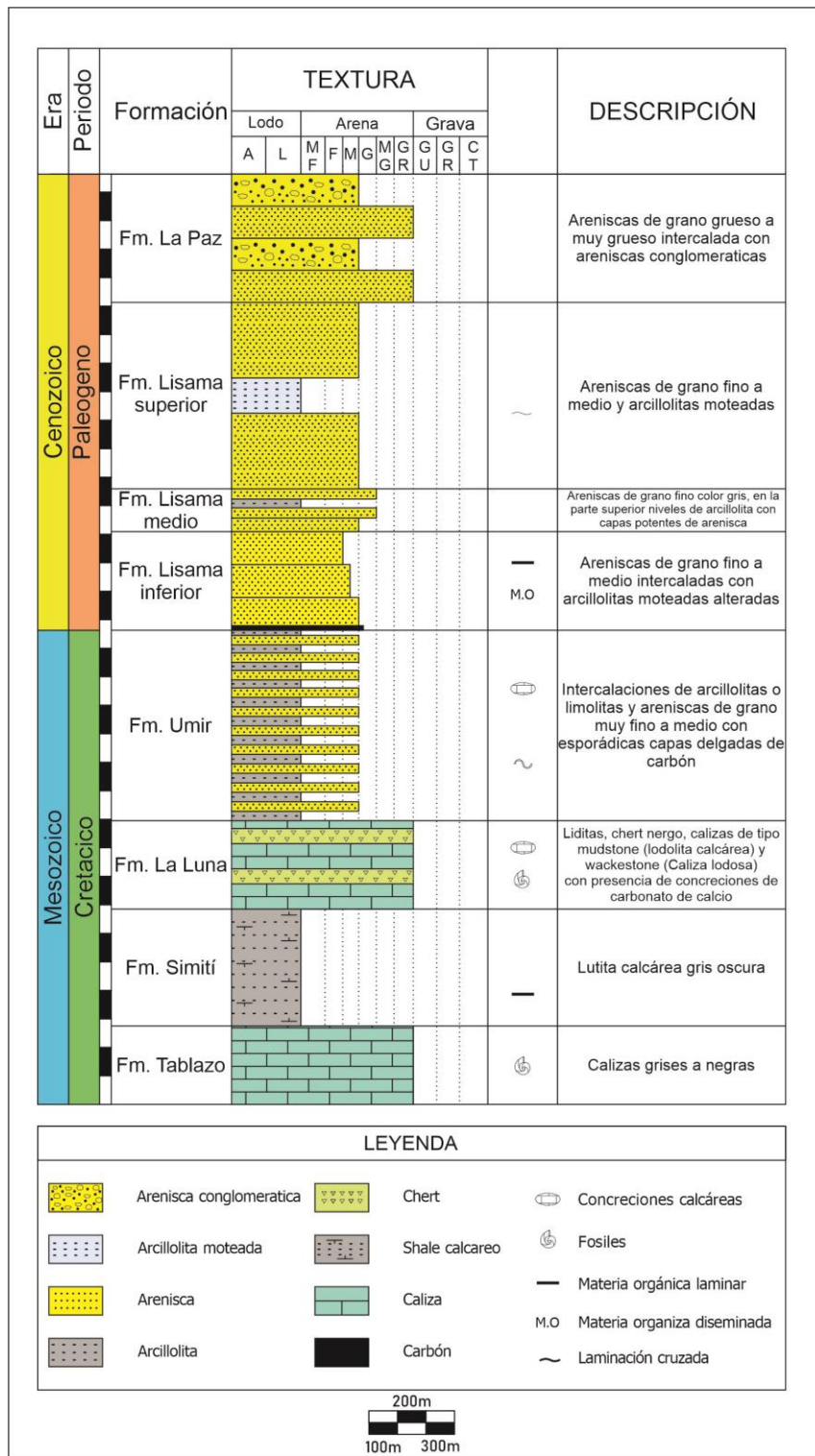
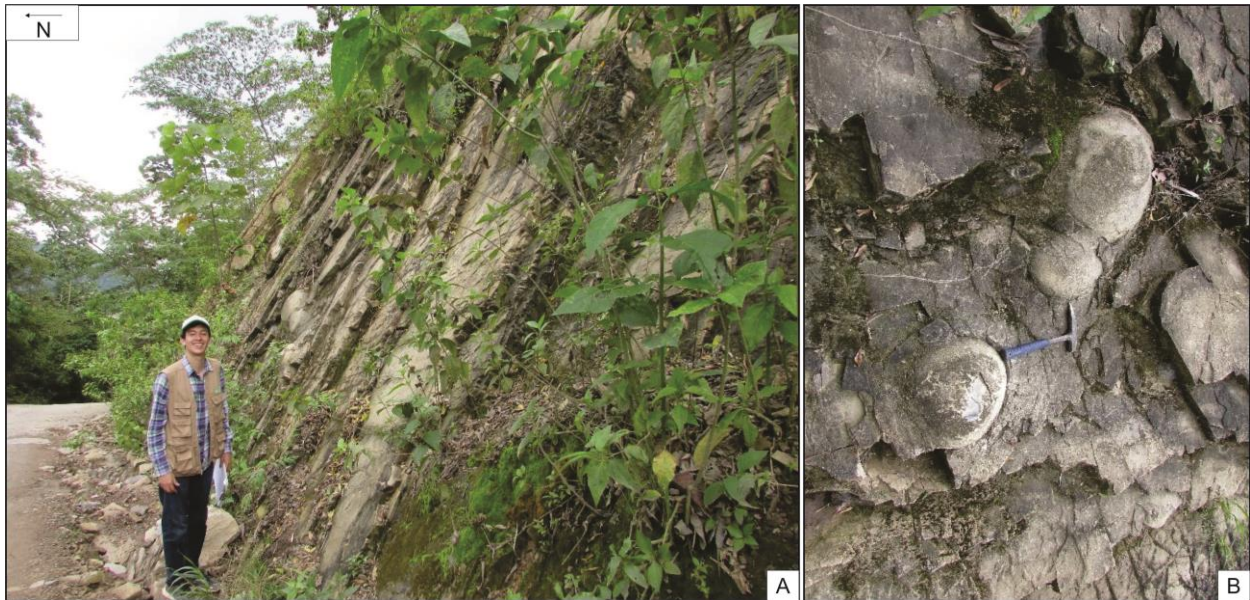


Figura 11

Afloramiento Formación la Luna, (A) Calizas y liditas (B) Nódulos calcáreos



En el margen este de la Falla Cútiga, sobre la zona más sureste del área de estudio, en la estación de campo RELL-32, la unidad se compone por capas delgadas (hasta 23 cm) de geometría tabular a lenticular, en contacto neto plano y ondulado, composicionalmente son liditas, chert negro y calizas de tipo mudstone (según la clasificación de Dunham, 1962), presencia de concreciones elipsoidales silíceas de hasta 1 m de diámetro compactas, con intercalaciones de láminas muy delgadas de arcillolitas fósiles (**Figura 12**), hacia el techo de la unidad, en la estación RELL-45 (**Figura 13**), presenta capas delgadas de aproximadamente 10 cm de espesor, con desarrollo de laminación con espesores de 2 a 5 mm, con contactos netos planos de calizas tipo Wackestone (según la clasificación de Dunham, 1962) de color negro a gris oscuro, altamente diaclasadas.

Figura 12

Calizas de tipo mudstone con esporádicas intercalaciones de paquetes laminados discontinuos de calizas con presencia de terrígenos de color gris oscuro.



El tope de la formación se puede observar en la estación RELL-33 donde afloran capas con espesores de 4 a 13 cm y geometría tabular de calizas de tipo mudstone (según la clasificación de Dunham, 1962), con esporádicas intercalaciones de paquetes laminados discontinuos de calizas con presencia de terrígenos de color gris oscuro. Se evidencia la presencia de concreciones de carbonato de calcio con un diámetro de 12 a 15 cm y otras con diámetros que superan los 100 cm. La presencia de estas concreciones da como resultado contactos ondulados entre capas.

Figura 13

capas de calizas tipo Wackestone de aproximadamente 10 cm de espesor, con desarrollo de laminación, espesores de 2 a 5 mm y contactos netos planos.



A partir del corte geológico del área potencial se calculó un espesor de 308 ± 15 m para la Formación La Luna. Debido a su composición y disposición estructural, la unidad desarrolla lomos altos con laderas de alta pendiente.

Formación Umir. Abarca la faja central del área de estudio y rodea el cerro El Naranjo, desarrolla un relieve suavizado de baja pendiente, en general, se encuentra cubierta por suelo residual de hasta 3 m de espesor y depósitos coluviales. Esta unidad se compone principalmente de intercalaciones de arcillolitas, lutitas y areniscas en menor proporción, en general, las arcillolitas son de color gris oscuro, con restos de planta, ligeramente micáceas, fósiles, levemente efervescentes al HCl, y las areniscas son de color marrón amarillento pálido, sus granos son finos, subesféricos a esféricos, bien calibrados, con 5% de cemento, su dureza es blanda.

Hacia la base de la unidad (estación RELL-034) presenta paquetes gruesos de arcillolitas arenosas de color gris oscuro, arcillolitas oxidadas, intercaladas con láminas de areniscas de grano muy fino de color gris claro, con presencia de micas y materia orgánica en los planos de estratificación, también se presentan esporádicas láminas de carbón (**Figura 14**).

Figura 14

Afloramiento de la Formación Umir (A) con intercalaciones de láminas y capas muy delgadas de arcillolitas, areniscas de grano muy fino a fino y láminas de carbón (B), estación RELL-34.



Nota. Tomado de UIS y AMB (2019).

Hacia la parte media de la unidad (estación RELL-12) presenta capas tabulares de areniscas de grano fino, que varían entre 6 a 7 cm de espesor, seguidas de paquetes con intercalaciones de láminas de areniscas de grano muy fino de tonalidad naranja y limolitas, las cuales tienen contactos ondulados e irregulares, estas areniscas composicionalmente se clasifican como sub-litoarenitas y presentan intraclastos de lodolitas oxidadas de hasta 5 mm de longitud. Las limolitas en general suelen presentar restos de plantas y micas en sus planos de

estratificación (**Figura 15**) y se disponen en estratos irregulares de 15 a 20 cm de espesor y laminación interna de 2 mm hasta 1 cm (**Figura 16**).

Figura 15

Intercalación de arcillolitas y areniscas pertenecientes a la Fm. Umir.



Nota. Tomado de UIS y AMB (2019).

Hacia el techo de la unidad, presenta intercalaciones de láminas de arcillolitas con láminas de arenisca de grano muy fino y láminas de materia orgánica de 1 mm (estación RELL-10), en la (**Figura 16**), se puede observar capas de arenisca y arcillolita encontradas en la estación (RELL-001)

Figura 16

A) Capas de arcillolita con capas de arenisca. B) presencia de materia orgánica (M.O) dispuesta sobre planos de laminación.



Nota. Tomado de UIS y AMB (2019).

A partir del corte geológico del área potencial se calculó un espesor de 668 ± 15 m para la Formación La Umir. Sus laderas suelen presentar procesos de reptación, deslizamientos y erosión laminar.

6.2.2. Sistema Paleógeno

El sistema paleógeno que aflora en el área de estudio, y en sus inmediaciones, corresponde a las formaciones con nomenclatura del Valle Medio del Magdalena Lisama, La Paz y Esmeraldas.

En el trabajo de campo realizado en el presente estudio no se cuenta con registro de la Formación Esmeraldas, motivo por el cual se toma como referencia la información expuesta en el marco geológico.

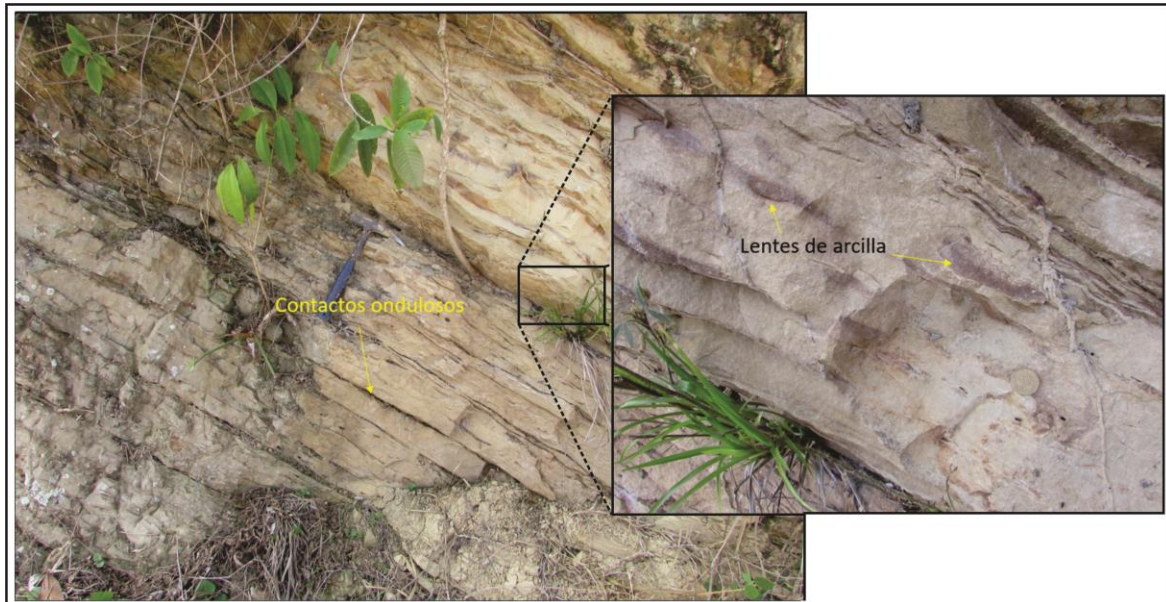
Formación Lisama. Aflora en la franja centro-oeste del área de estudio y en los cerros El Naranjo y La Aurora, con base en sus características litológicas y geomorfológicas, esta unidad es dividida en 3 segmentos: segmento inferior, medio y superior.

Formación Lisama Segmento Inferior. Se compone principalmente de areniscas de grano fino color gris claro, con desarrollo de niveles oxidados entre los planos de estratificación. En la estación RELL-40, se presenta en capas muy delgadas, delgadas y medias (hasta 22 cm de espesor), tabulares, con laminación interna ondulosa discontinua a ondulosa paralela. Se constituyen principalmente de cuarzo, micas esporádicas y materia orgánica diseminada, con intraclastos oxidados que siguen una orientación preferencial paralela a la estratificación. El techo de esta unidad se observa en la estación RELL-41, donde presenta capas delgadas a medias de areniscas de grano muy fino a fino, compuestas de cuarzo, líticos constituidos por minerales oxidados, micas y materia orgánica diseminada (**Figura 17**).

A partir del corte geológico realizado en el presente trabajo, se calculó un espesor de 346 \pm 15 m para este segmento.

Figura 17

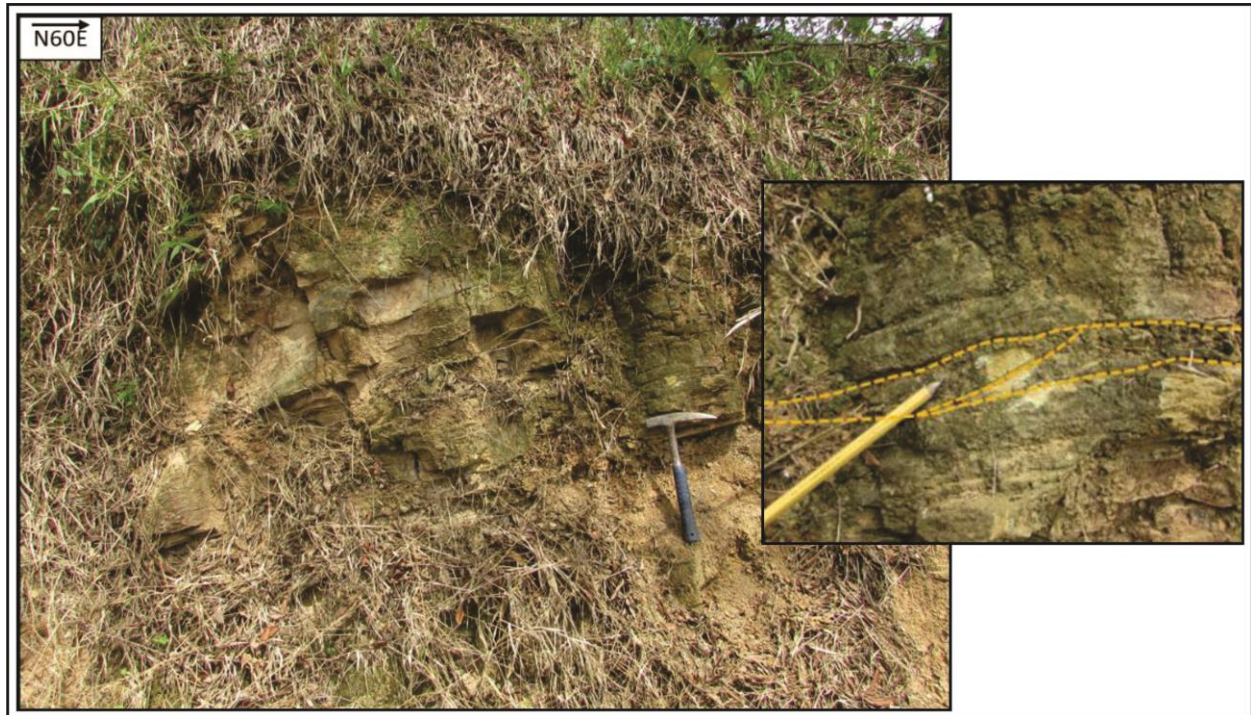
Areniscas de grano fino con lentes de arcilla, pertenecientes a la Formación Lisama, segmento inferior.



Hacia el sector del sinclinal el naranjo, presenta capas tabulares delgadas y medianas de areniscas de grano fino a muy fino color gris amarillento, de 4 a 20 cm de espesor, con contactos ondulados a irregulares entre capas, desarrollo de laminación cruzada y estructuras lenticulares. Composicionalmente, se encuentra constituida en un 10% de líticos, 2% de líticos oscuros, proporciones menores de micas y materia orgánica. Hacia la base se observan paquetes de intercalaciones laminares, de 1 a 2 mm de espesor, de areniscas de grano muy fino de tonalidades blancuzcas, limolitas de color café y arcillolitas de color gris azulado (**Figura 18**).

Figura 18

Afloramiento de areniscas con estratificación cruzada de la Fm. Lisama segmento inferior ubicado en inmediaciones del sinclinal El Naranjo.



Nota. Tomado de UIS y AMB (2019).

Formación Lisama segmento medio. Compuestas por sublitoarenitas dispuestas en capas medias a gruesas (hasta 20 cm), cuneiformes y tabulares intercaladas con capas finas de limolitas que no superan los 2 cm, los contactos entre las capas son netos e irregulares y se caracterizan por altos contenidos de materia orgánica (**Figura 19**). Presentan tamaño de grano fino, subredondeados y subsféricos, bien calibrados, color gris claro a oscuro. Presentan grado de meteorización II según Dearman (1974), sus discontinuidades son parcialmente abiertas y muy amplias, las parcialmente abiertas tienen su superficie teñida con manchas de óxido, son rugosas y la forma de su superficie es ondulosa (**Figura 19**). Esta unidad desarrolla un relieve escarpado y sus suelos residuales son de bajo espesor (hasta 1 m).

Figura 19

Capas medianas y gruesas intercaladas con capas muy delgadas de limolitas, pertenecientes a la Fm. Lisama segmento medio.



A partir del corte geológico realizado en el presente trabajo, se calculó un espesor de 149 \pm 15 m para este segmento.

Formación Lisama segmento superior. Este segmento está conformado principalmente de capas gruesas de arcillolitas moteadas producto de alteración intercaladas con arcillolitas arenosas y areniscas de grano medio, color gris claro con tonos naranjas producto de oxidación (**Figura 20**), bien calibradas, granos sub-angulares y sub-elongados a sub-esféricos, con estratificación inclinada tangencial a la base. Las capas de areniscas son tabulares medianas, presentan lentes de arcilla, se componen de cuarzo, 7% líticos y 5% feldespatos y en menor proporción óxidos de hierro y materia orgánica.

Figura 20

Intercalación de capas gruesas de arcillolitas moteadas con capas medias de areniscas de grano medio de la Fm. Lisama segmento superior.



Hacia el sector del sinclinal el naranjo se presentan capas medias a gruesas de areniscas de grano fino a medio, de tonalidad gris claro con tonalidades naranjas producto de la meteorización de la roca, intercaladas con capas delgadas de arcillolita gris con motas rojizas, en contacto onduloso (**Figura 21**)

Figura 21

Afloramiento de areniscas intercaladas con arcillolitas de la Fm. Lisama segmento superior en el Cerro El Naranjo.



A partir del corte geológico realizado en el presente trabajo, se calculó un espesor de 654 ± 15 m para este segmento.

Formación La Paz. Se localiza en la zona W del área de estudio, como una franja que compone gran parte de la Serranía La Paz, según lo descrito en el proyecto Ruta del Cacao, está compuesta a la base por capas tabulares de 3m a 5m de arenisca de grano grueso a muy grueso, intercalada con areniscas conglomeráticas y areniscas de grano medio subarcosas. Las capas

presentan laminación ondulosa difusa y las gravas están compuestas principalmente por guijas redondeadas de cuarzo. Se destaca por su morfología escarpada (**Figura 22**).

A partir del corte geológico realizado en el presente trabajo, se calculó un espesor de 904 ± 15 m para la Formación La Paz.

Figura 22

Expresión morfológica de las formaciones Lisama, La Paz y Esmeraldas en el área de estudio.



Nota. Tomado de Moreno-Sánchez, G. (2019).

6.2.3. Depósitos cuaternarios

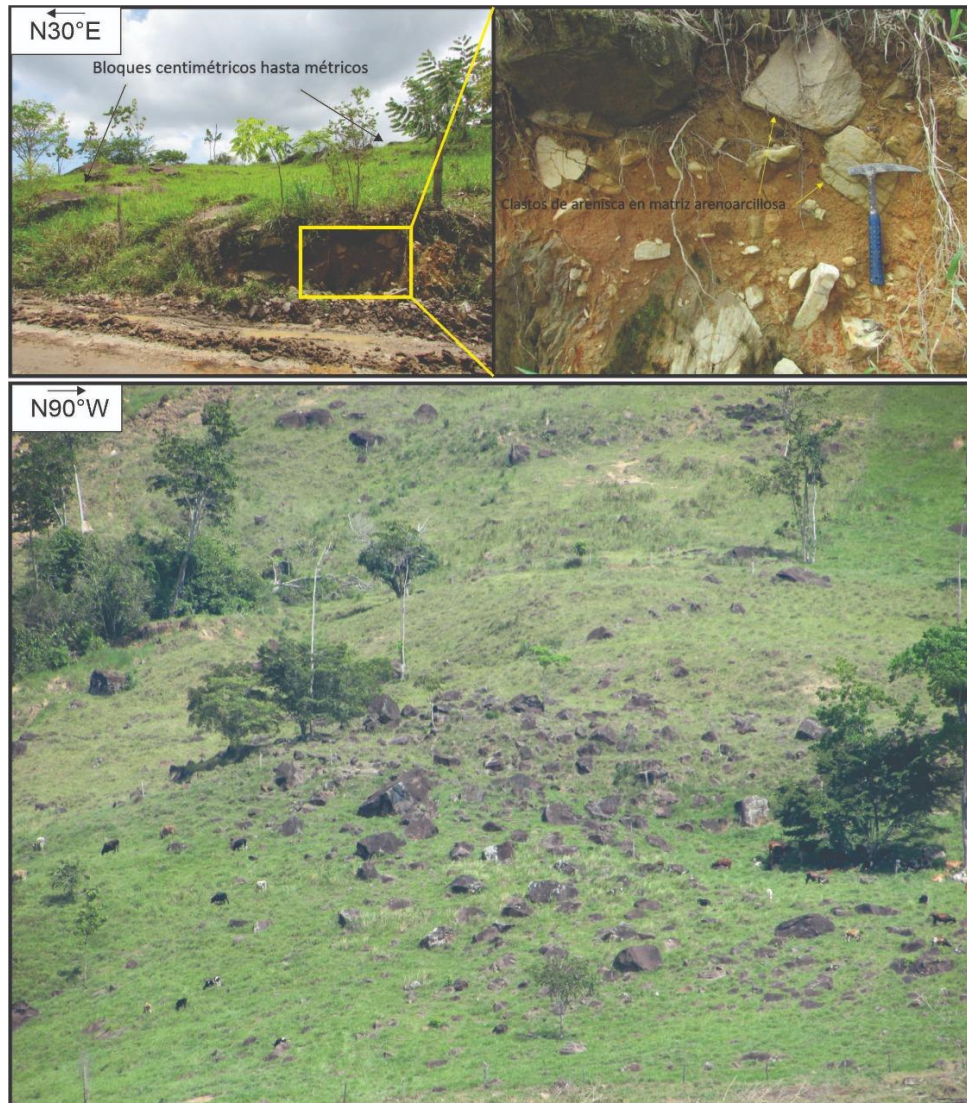
En el área de estudio se observan depósitos cuaternarios de tipo coluvial y aluvial, los cuales son descritos a continuación:

Depósitos Coluviales. Son depósitos matriz-soportados (su relación matriz-clastos generalmente es de 60%-40%, pero puede variar hasta 75%-25%), compuestos por bloques centimétricos a métricos de areniscas de grano fino a medio, de tamaños que varían entre 0,10 m y 10 m, de formas subangulares a subredondeadas, no esféricas, con meteorización débil a moderada y sin ninguna orientación preferencial. Embebidos en una matriz arcilloarenosa y limoarenosa, color naranja amarillento pálido, generalmente húmeda. (**Figura 23**). Estos depósitos se encuentran ampliamente distribuidos en la zona de estudio en sectores de mediana a baja pendiente, principalmente entre el cerro El Naranjo y la Serranía La Paz, algunos de estos

depósitos tienen longitudes de hasta 1.5 km, y espesores visibles de hasta 9 m, el origen de los clastos es atribuido a las formaciones Lisama y La Paz por su similitud textural y composicional.

Figura 23

Depósitos coluviales de clastos heterométricos y matriz arenarcillosa distribuidos en el área de estudio.

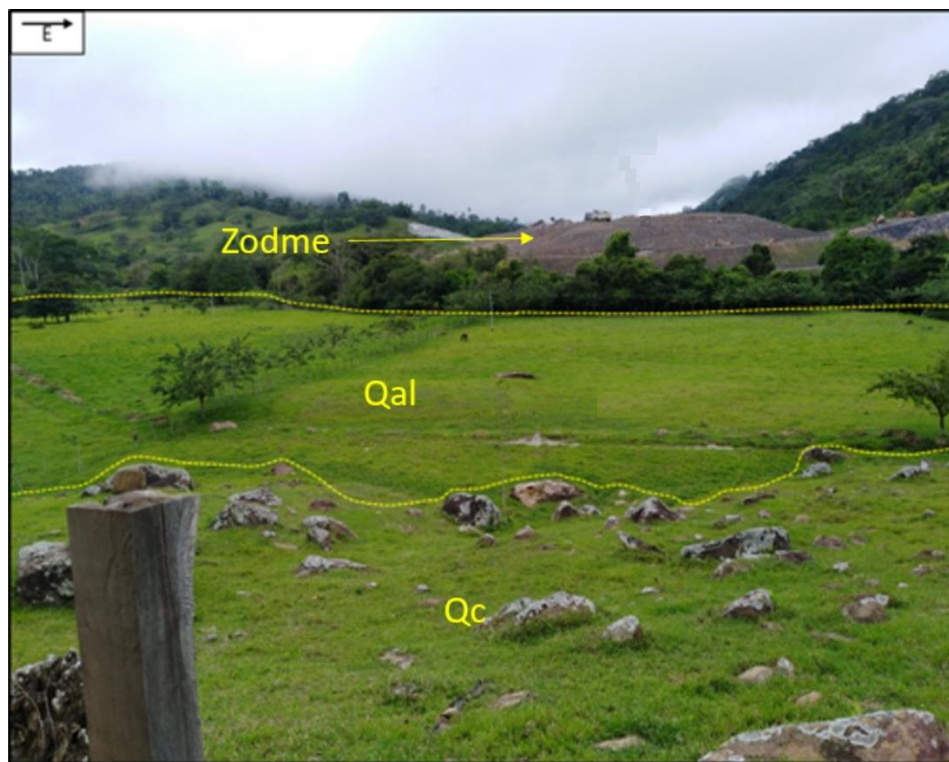


Depósitos Aluviales. Corresponden a depósitos recientes transportados por la quebrada La Sorda, son clastosoportados (relación clasto-matriz de 70-30 %), de clastos subangulares a subredondeados, correspondientes a gravas gruesas, cantos y bloques, débil a medianamente

meteorizados, embebidos en una matriz arcilloarenosa color gris claro a marrón, de consistencia blanda, poco plástica. El espesor es de hasta 1 m y reposan sobre suelos residuales y rocas de la Fm. Umir. En zonas de curvatura, estos depósitos conforman terrazas bajas de poco espesor. Se ubican en la parte inferior derecha de la zona de estudio, alrededor de las Zonas de Disposición de Material de Excavación Sobrantes (ZODMES) de la Ruta del Cacao (**Figura 24**).

Figura 24

Depósitos aluviales.



Nota. Tomado de UIS y AMB (2019).

6.3. Geología Estructural

En el área de estudio se identifican falla de tipo inverso, normal y de rumbo dextral, así como estructuras plegadas. A continuación, se describe cada una de las estructuras cartografiadas.

6.3.1. Fallas inversas

Falla Río Sucio. Falla de cabalgamiento con sentido SSE-NNW, vergencia hacia el NE, comienza en el extremo sur del eje del anticlinal de Río Sucio, atravesando las formaciones Umir y Lisama, esta falla controla el tramo del Río Sucio comprendido entre la ladera occidental del Cerro La Aurora hasta su disección con la Serranía La Paz.

Falla La Putana. Falla de cabalgamiento con sentido SSW-NNE con vergencia hacia el SE. Según Cetina y Patiño (2013), su plano de falla presenta un rumbo de N30°E con buzamiento al WNW y se desprende de una falla a profundidad, pero el desarrollo de la deformación dentro del SNM permite su propagación como una falla secundaria hacia afuera del núcleo. Estos mismos autores indican que su expresión geomorfológica es marcada por el cambio de pendiente dentro de la Formación Lisama.

Falla Cristal-Canoas. La Falla Cristal-Canoas fue cartografiada en UIS y AMB (2019) a partir de fotointerpretación, atribuyendo su nombre a las veredas El Cristal y Canoas, aledañas al trazo de ésta, describiéndola como estructura de flexura longitudinal de cabalgamiento, tiene un rumbo NNE con vergencia al SE. En la zona de estudio atraviesa las formaciones Umir y Lisama, afectando al sur a la Fm. Umir, posteriormente pone en contacto la Fm. Umir con el segmento inferior de la Fm. Lisama y hacia al norte afecta netamente a las rocas de la Fm. Lisama. En varios segmentos, esta falla es cubierta por múltiples depósitos de longitud y ladera, tal y como se observa en el mapa geológico (**Figura 9**).

Falla El Naranjo. Falla inversa con dirección N25°E, buzamiento al WNW, vergencia al ESE y longitud aproximada de 45 km (Cetina y Patiño, 2013). Estos mismos autores mencionan que esta falla es considerada una estructura mixta que en profundidad se desprende como un

retrocabalgamiento de la Falla San Vicente y en superficie presenta cerros levantados y alineados.

En el área de estudio, afecta rocas de la Fm. Umir y Lisama, hacia el sector intermedio del Cerro El Naranjo, pone en contacto el segmento inferior con el superior de la Formación Lisama. En este mismo sector gran parte de su trazo se encuentra cubierto por depósitos coluviales.

Falla Cútiga. Falla inversa con rumbo en dirección NNE, en inmediaciones de la finca La Unión, su rumbo se orienta al noroeste durante un trazo de 650 m (ANI, 2015), afecta un pequeño tramo de la quebrada La Sorda. Cetina y Patiño (2013) (denominada como Falla La Sorda) establecen un estilo mixto de retrocabalgamiento y cabalgamiento mixto, evidenciado en análisis cinemático realizado por los autores en planos estriados, que muestran un movimiento inverso con vergencia al este.

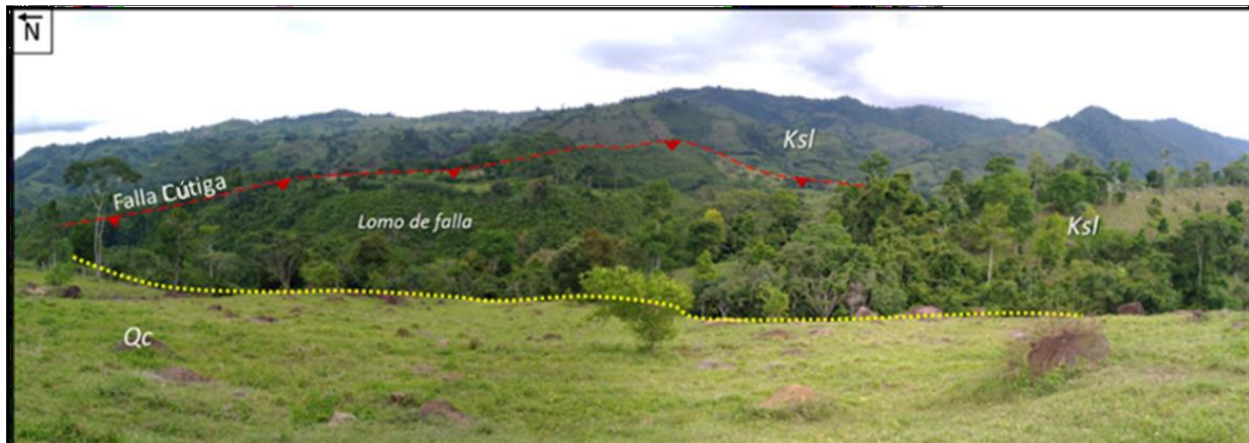
Esta falla afecta rocas de la Fm. La Luna y Fm. Umir. Al sur de su trazo afecta rocas de la Formación Umir en cercanías al contacto con la Formación La Luna, luego pone en contacto fallado estas dos unidades y al norte pasa afectar rocas de la Formación La Luna algunos tramos están cubiertos por depósitos fluviales y depósitos gravedad y ladera (**Figura 25**).

6.3.2. Falla Normal

Falla La Sorda. Identificada en UIS y AMB (2019) a partir de fotointerpretación. Es definida como falla de tipo normal con rumbo E-W, con vergencia hacia el S, su trazo controla el cauce de la Quebrada La Sorda, de la cual toma su nombre, además, presenta un componente de rumbo sinistral (Suárez, 2019). Esta estructura afecta rocas de las formaciones Simití, La Luna y Umir.

Figura 25

Panorámica de la Falla Cútiga, Lomo de Falla y deposito coluvial (Qc).



Nota. Tomado de UIS y AMB (2019).

6.3.3. Falla de rumbo dextral

Falla El Libano. Identificada en UIS y AMB (2019) a partir de fotointerpretación. Se define como falla de tipo rumbo dextral con rumbo NW-SW, que afecta el flanco oriental del Sinclinal El Naranjo y las formaciones Umir y Lisama.

6.3.4. Estructuras plegadas

El área de estudio se encuentra afectada por dos pliegues parásitos denominados Sinclinal El Naranjo y Anticlinal Rio Sucio.

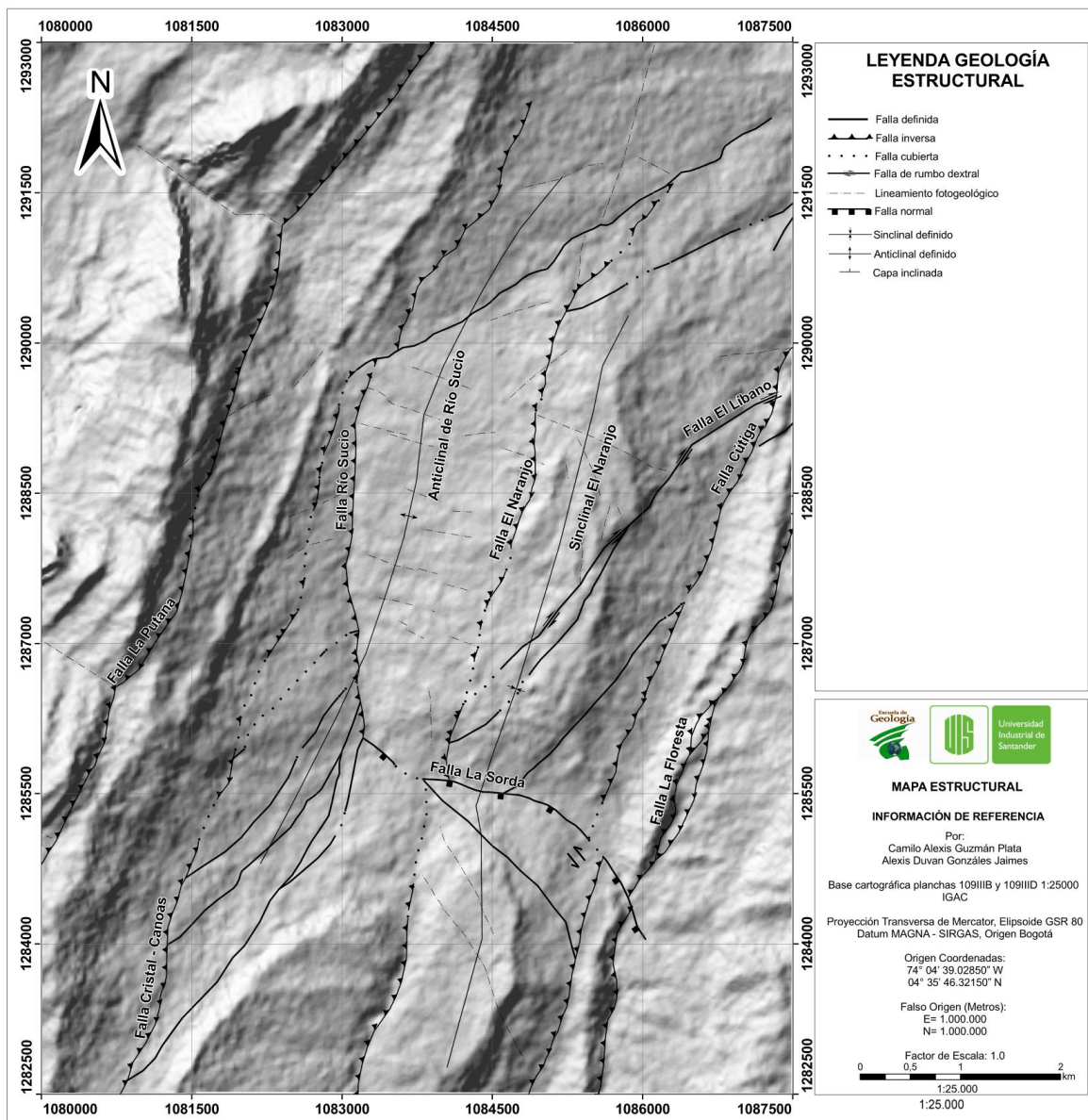
Sinclinal El Naranjo. El Sinclinal El Naranjo se localiza en el cerro El Naranjo, donde toma su nombre. Presenta un eje en dirección NNE-SSW, siguiendo la misma tendencia de las fallas longitudinales de cabalgamiento. Su núcleo está compuesto por rocas de la Formación Lisama segmento superior y sus flancos por los segmentos medio e inferior y Formación Umir y su flanco oeste se encuentra afectado por la Falla El Naranjo. En el trabajo de Cetina *et al.* (2019) se plantea que la Falla La Sorda, denominada Cútiga en el presente trabajo, a profundidad presenta un flat que es responsable de la morfología del sinclinal.

Anticlinal Rio Sucio. El Anticlinal Rio sucio se localiza al occidente del área de estudio cerca del rio Sucio, de donde toma su nombre. La estructura es controlada por datos de estratificación de la Formación Umir y sus flancos este y oeste se encuentran afectados por las fallas El Naranjo y Cristal-Canoas, respectivamente.

La (Figura 26) presenta el mapa estructural del área de estudio.

Figura 26

Mapa estructural del área de estudio

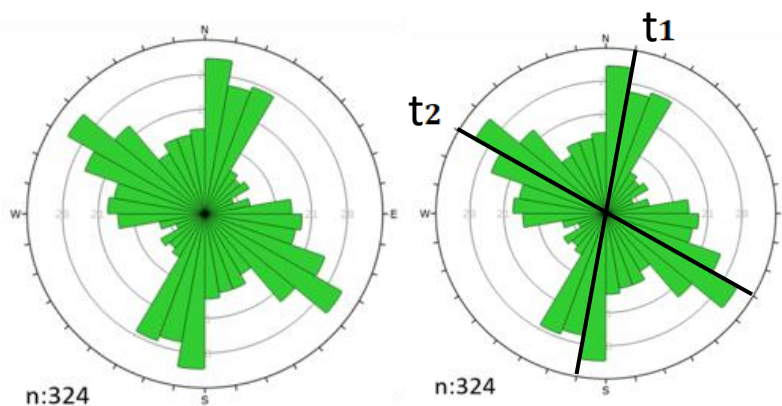


6.3.5. Patrones de fracturamiento

A partir de la medición de familias de diaclasas en el área de estudio, complementado con la información suministrada por el proyecto Ruta del Cacao (ANI, 2015) se realizó el análisis estadístico en diagrama rosa usando el software Dips 7.0, con un total de 324 datos, se establecieron dos tendencias principales tal y como se observa en la **Figura 27**, las cuales coinciden con los rumbos de las fallas de cabalgamiento que afectan las unidades del área de estudio, principalmente en el sentido NNE-SSO.

Figura 27

Diagrama rosa y tendencias principales de los planos de diaclasas medidos en el área de estudio.



Nota. Tomado de UIS y AMB (2019).

Tendencia t1. Esta tendencia predomina en el área de estudio, presenta un rumbo en sentido NNE-SSW, el cual es paralelo a las fallas de cabalgamiento longitudinales La Putana, Cristal – Canoas, El Naranjo, Cútiga y La Floresta.

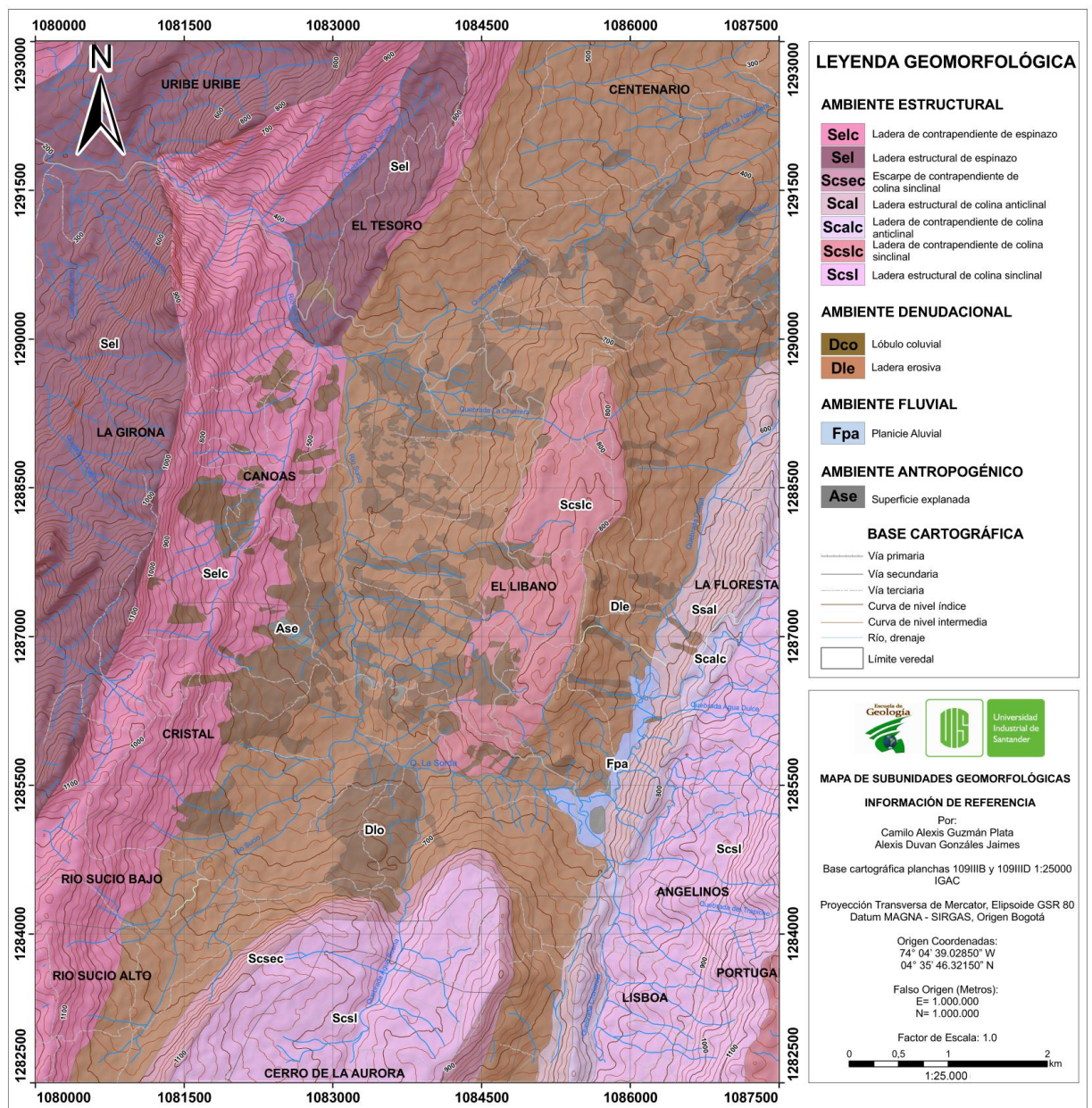
Tendencia t2. Presenta un rumbo con sentido NW-SE, se puede atribuir a planos antiriedels (R') de las fallas de cabalgamiento.

6.4. Geomorfología

Para la definición de las subunidades geomorfológicas se tomaron en cuenta factores de morfología, morfometría, morfodinámica y morfogénesis. La integración de estos aspectos da como resultado el mapa de subunidades geomorfológicas escala 1:25.000 (**Figura 28**).

Figura 28

Mapa Geomorfológico del área de estudio.










6.4.1. Factores morfométricos y morfológicos

El primer factor morfométrico determinado corresponde al mapa de pendientes del área de estudio. Con base en el procesamiento del modelo digital de elevación, se realiza el plano de pendientes presentado en la **Figura 29**. La descripción de los rangos de pendientes y su distribución porcentual es representada en la **Tabla 6**.

Tabla 6

Rangos de pendientes y su distribución porcentual.

COLOR PENDIENTE	PENDIENTE	DESCRIPCIÓN PENDIENTES	ÁREA (HA)	PORCENTAJE
	<5	Plano	516,8	6,55
	6-10	Inclinada	1846,9	23,42
	11-15	Muy inclinada	2063,3	26,16
	16-20	Abrupta	1218,1	15,44
	21-30	Muy Abrupta	1591,1	20,17
	31-45	Escarpada	602,2	7,63
	>45	Muy escarpada	48,7	0,62
TOTAL			7887,2	100

En la zona de estudio se observa un dominio de pendientes inclinadas y muy inclinadas, las cuales conforman el 49.58% del área de estudio y corresponden principalmente a laderas pertenecientes a la Formación Umir, zonas donde se ubican gran parte de los depósitos coluviales, las pendientes abruptas y muy abruptas abarcan el 35.95% del área total y se presentan principalmente en zonas con litologías competentes (Fm. Lisama y La Paz) e inclinadas por estructuras geológicas, especialmente fallas de cabalgamiento y pliegues tipo sinclinal y anticlinal.

En la **Tabla 7** se presentan los demás factores morfométricos (índice de contraste del relieve y longitud de ladera) y los factores morfológicos (tipo de relieve, forma de ladera y forma de valle) de las subunidades geomorfológicas determinadas.

Figura 29

Mapa de pendientes del área de estudio.

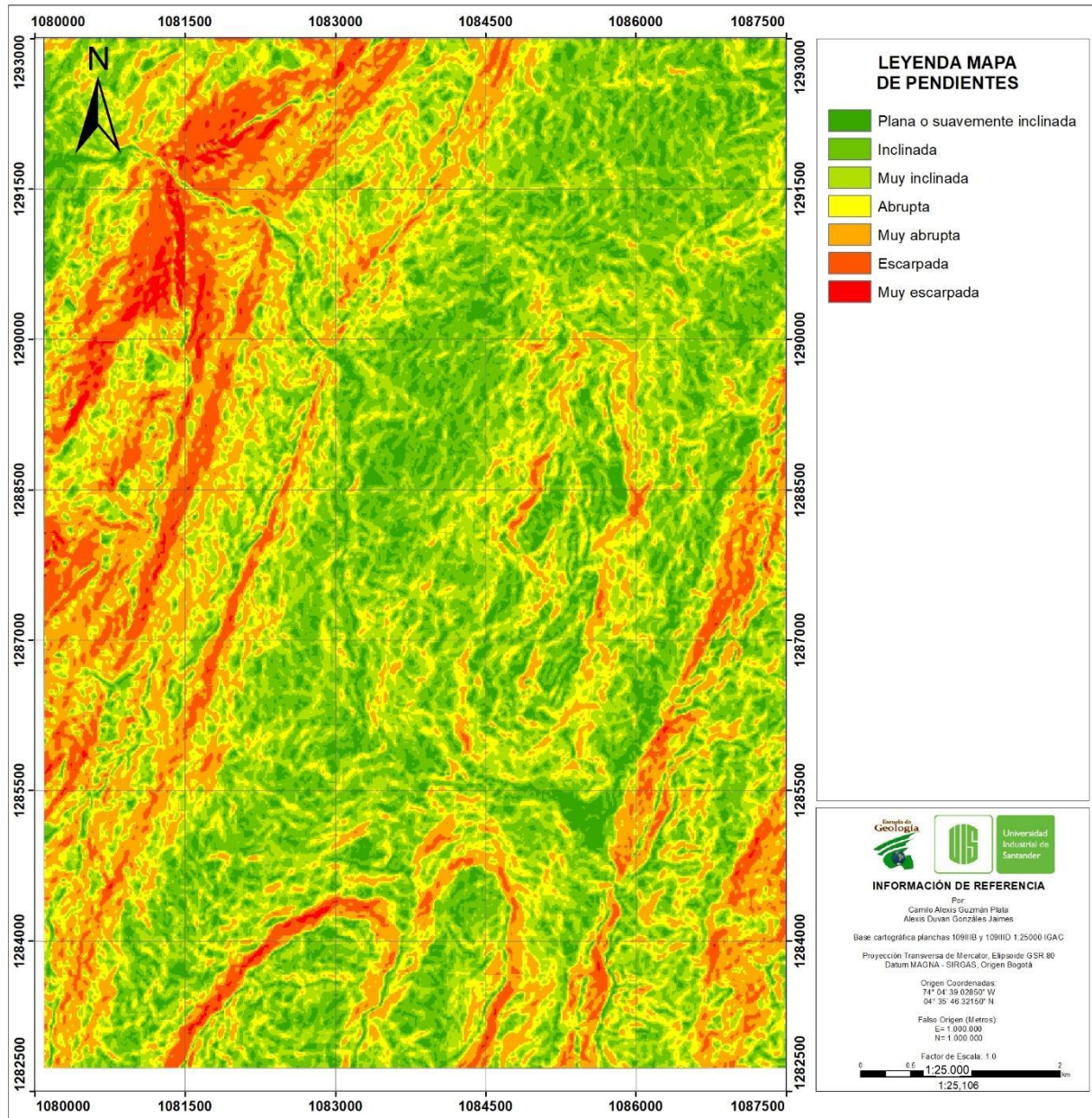


Tabla 7

Resumen principales características morfológicas y morfométricas de las subunidades

AMBIENTE GEOMORFOLÓGICO	SUBUNIDAD	CÓDIGO	TIPO DE RELIEVE	ÍNDICE DE CONTRASTE DEL RELIEVE	PENDIENTE	LONGITUD DE LADERA	FORMA DE LADERA	FORMA DE VALLE
DENUDACIONAL	Ladera erosiva	Dle	Colina	Moderado	Inclinadas o muy inclinadas	Largas a muy largas	Convexas y cóncavas	U
DENUDACIONAL	Lóbulo coluvial	Dlo	Montículos	Muy bajo	Plana a muy inclinada	Cortas a muy largas	Cóncava	U
ESTRUCTURAL	Ladera de contrapendiente de colina sinclinal	Scslc	Colina	Moderado	Inclinada a muy inclinada	Corta	Cóncava	U
ESTRUCTURAL	Ladera de contrapendiente de colina anticlinal	Scalc	Colina	Moderado	Muy abruptas a escarpadas	Corta	Recta	V
ESTRUCTURAL	Ladera de contrapendiente de espinazo	Selc	Colina	Muy alto	Ligeramente escarpadas	Muy larga	Cóncava a irregular	V
ESTRUCTURAL	Ladera estructural de espinazo	Sel	Colina	Muy alto	Moderada a fuertemente escarpadas	Muy larga	Recta escalonada	V
ESTRUCTURAL	Ladera estructural de colina anticlinal	Scal	Loma	Moderado	Muy abruptas a escarpadas	Moderada	Recta	V
ESTRUCTURAL	Escarpe de contrapendiente de colina sinclinal	Scsec	Loma	Moderado	Escarpadas a muy escarpadas	Corta	Recta	U
ESTRUCTURAL	Ladera estructural de colina sinclinal	Scsl	Colina	Moderado	Escarpadas a muy escarpadas	Muy larga	Convexas y rectas	U
FLUVIAL	Planicie aluvial	Fpa	Montículos	Muy bajo	Plana a ligeramente inclinada	Muy corta	Plana	U
ANTROPOGÉNICO	Superficie explanada	Ase	Montículos	Muy bajo	plana	Muy corta	Plana a semiplana	N/A

6.4.2. Factores morfodinámicos

Siguiendo la metodología descrita y complementado con la información levantada en el proyecto desarrollado por UIS y AMB (2019), se determinaron 143 eventos que afectan el relieve preexistente, los cuales se evidencian en el Mapa de Inventario Morfodinámico (**Figura 34**). Se destacan principalmente movimientos en masa de tipo deslizamiento (65), flujos (46), reptación (29) y caída de rocas (3). Los cuales afectan principalmente las formaciones Umir y Lisama.

Deslizamientos

Fueron cartografiados un total de 65 deslizamientos, siendo el proceso que predomina en la zona. Se distribuyen a lo largo y ancho de la zona de estudio, afectando especialmente laderas de mediana pendiente compuestas por lutitas y areniscas de la Formación Umir. En la **Figura 30** se observa un deslizamiento reciente desarrollado sobre una ladera de la Formación Umir.

Figura 30

Movimiento tipo deslizamiento ocurrido en la Fm. Umir



Flujos

Se determinó un total de 46 flujos en el área de estudio. Al igual que los deslizamientos, se distribuyen principalmente en laderas de mediana pendiente de las formaciones Umir y Lisama. Alcanzan dimensiones de más de 1 km de largo (**Figura 31**).

}

Figura 31

Movimiento tipo flujo sobre la Formación Umir.



Nota. Tomado de UIS y AMB (2019)

Caída de rocas

Estos procesos son los de menor influencia en la zona, registrándose 3 eventos en laderas escarpadas. La **Figura 32** muestra una ladera de la Formación La Luna, la cual, debido a la intersección de dos familias de diaclasas con la estratificación, sumado a una intervención antrópica, propició la caída de rocas.

Figura 32

Movimiento tipo caída de rocas presentado en laderas de alta pendiente de la Fm. La Luna.

***Reptación***

Se identificaron 29 procesos de reptación en la zona de estudio, distribuidos por toda el área de estudio, especialmente en laderas de las formaciones Umir, Lisama y en menor proporción, La Paz. La **Figura 33** muestra una ladera que presenta procesos de reptación.

Figura 33

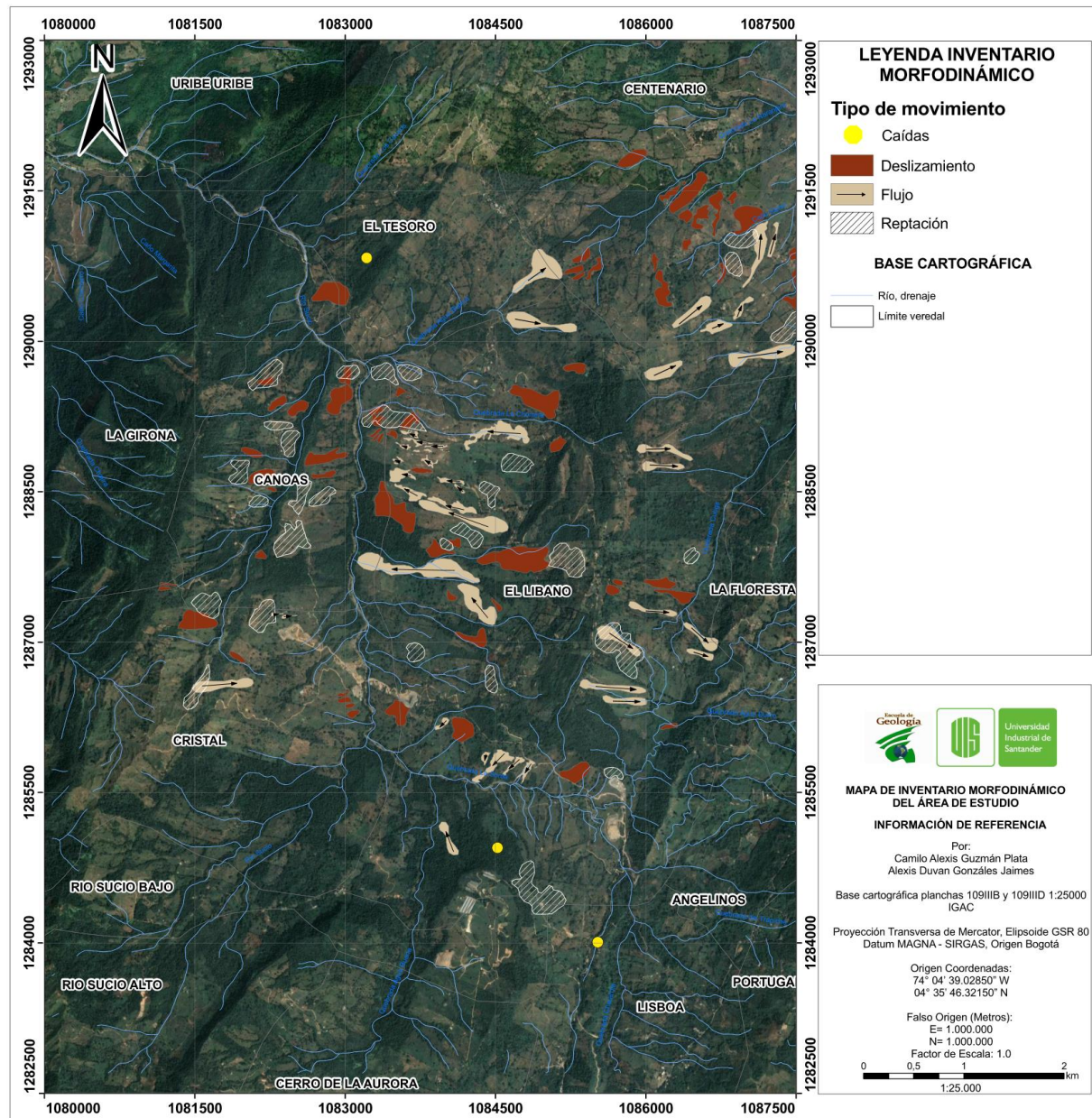
Procesos de reptación sobre laderas residuales de la Fm. Umir.



La **Figura 34** muestra la síntesis de los eventos identificados en el área de estudio, dando como resultado el mapa de inventario morfodinámico a escala 1:25.000.

Figura 34

Mapa de inventario morfoodinámico



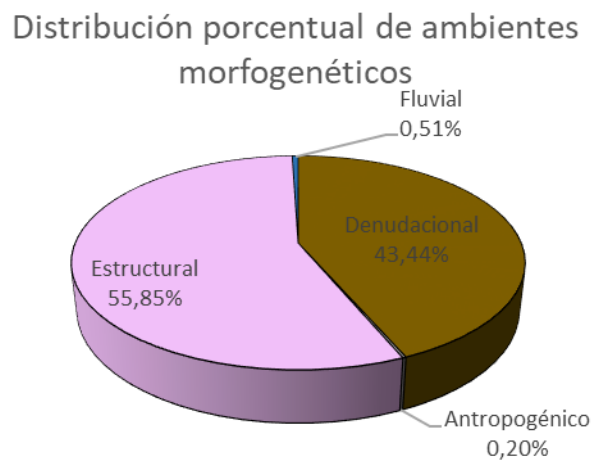
6.4.3. Factores morfogénéticos

La morfogénesis estudia la evolución de las formas del terreno, la clasificación de los elementos geomorfológicos se realiza de acuerdo con el origen o ambiente morfogénético según lo establecido por Carvajal (2012).

La **Figura 35** presenta la distribución porcentual de los ambientes morfogenéticos en la zona, donde es posible evidenciar el predominio del ambiente estructural y denudacional, abarcando el 55.85% y el 43.44%, respectivamente, y en menor proporción, el ambiente antropogénico (0.51%) y fluvial (0.20%).

Figura 35

Distribución porcentual de los ambientes morfogenéticos presentes en el área de estudio.



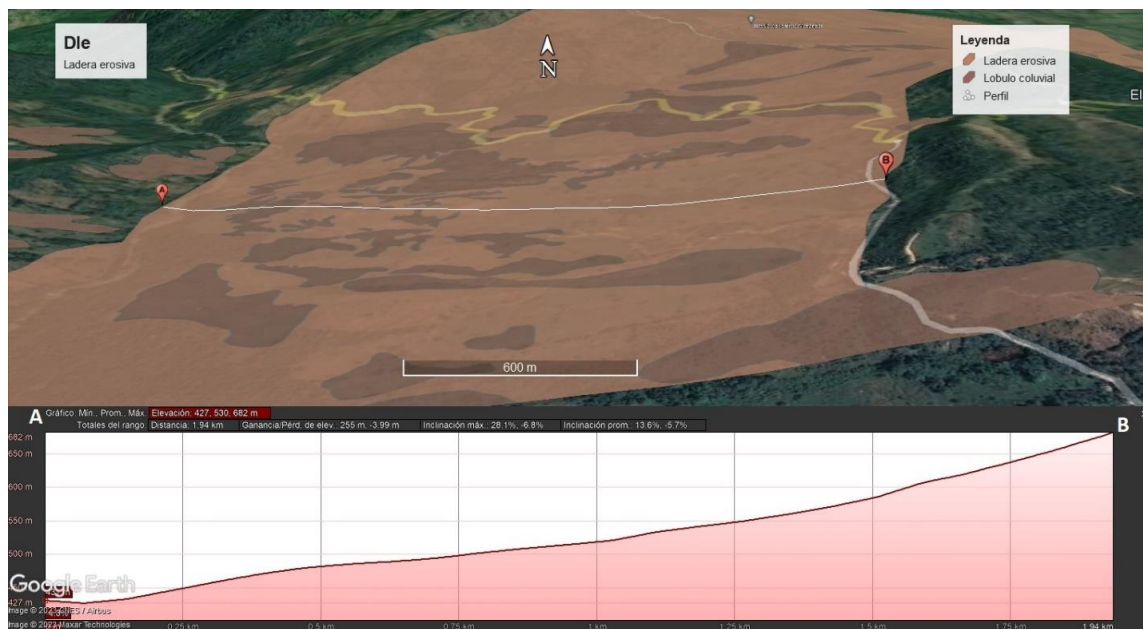
Elementos de origen denudacional

Lóbulo coluvial (Dlo). Estructura en forma de lóbulos, formados por el desprendimiento de una masa heterogénea de suelo y rocas, transportadas y depositadas sobre las laderas adyacentes, en general, presentan relieve de tipo montículo, sus pendientes son similares a la de la ladera sobre las cuales se depositan, principalmente planas a inclinadas, su índice de relieve es muy bajo, longitudes de ladera que varían desde cortas hasta muy largas, de formas cóncavas. Los drenajes que se desarrollan sobre estas subunidades son en forma de U. En el área de estudio, estas subunidades han generado problemas de inestabilidad en las distintas obras desarrolladas, se concentran principalmente entre el cerro El Naranjo y la Serranía La Paz, en las veredas el Líbano, Cristal, Canoas y al NE del cerro el Naranjo en la vereda Centenario, sus características generales son: no estratificados, muy porosos, compresibles y permeables.

Ladera erosiva (Dle). Superficies del terreno producto de la interacción de procesos exógenos (meteorización química y física) sobre las unidades más superficiales. Se caracterizan por presentar tipo relieves de tipo loma, pendientes inclinadas a muy inclinadas, de longitudes largas a muy largas, formas convexas y cóncavas, índice de contraste de relieve muy alto (**Figura 36**). Los drenajes que se desarrollan sobre estas subunidades son en forma de U, La falta de cobertura vegetal, la litología, las condiciones climáticas y las condiciones topográficas locales favorecen la intensidad de los procesos denudativos sobre este tipo de laderas. Es común encontrar formas producto de erosión superficial, especialmente surcos y cárcavas. Se encuentran principalmente aledañas al cerro la Aurora y cerro el Naranjo. En términos de estabilidad, tienden a ser inestables en zonas de mayor pendiente, esta condición de estabilidad está controlada por las características geotécnicas de los suelos residuales. Este elemento está relacionado a rocas y suelos residuales de las formaciones Umir y Lisama.

Figura 36

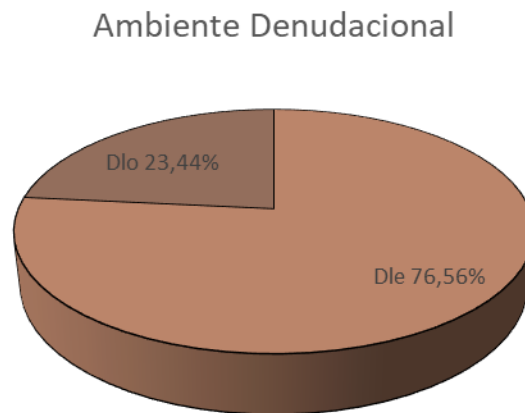
Ladera erosiva (Dle) desarrollada en la Formación Umir.



La distribución porcentual de las subunidades geomorfológicas de origen denudacional se presenta en la **Figura 37**.

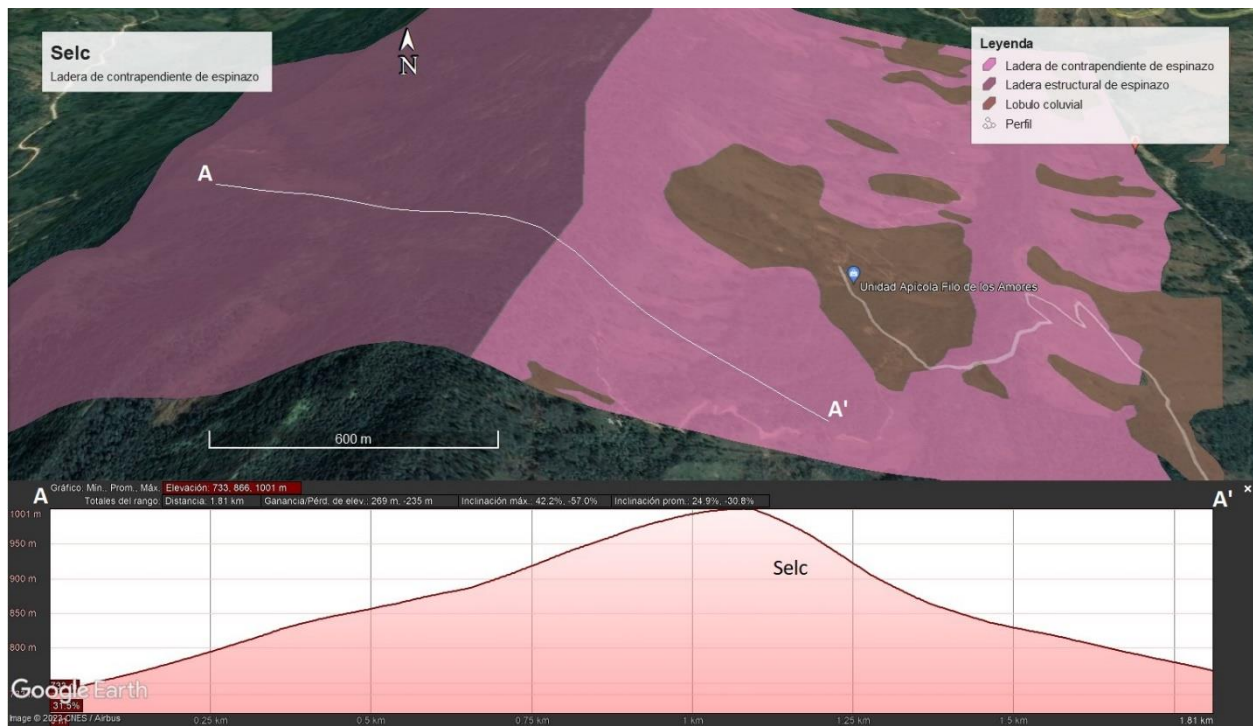
Figura 37

Distribución porcentual de las subunidades geomorfológicas de origen denudacional.



Elementos de origen estructural

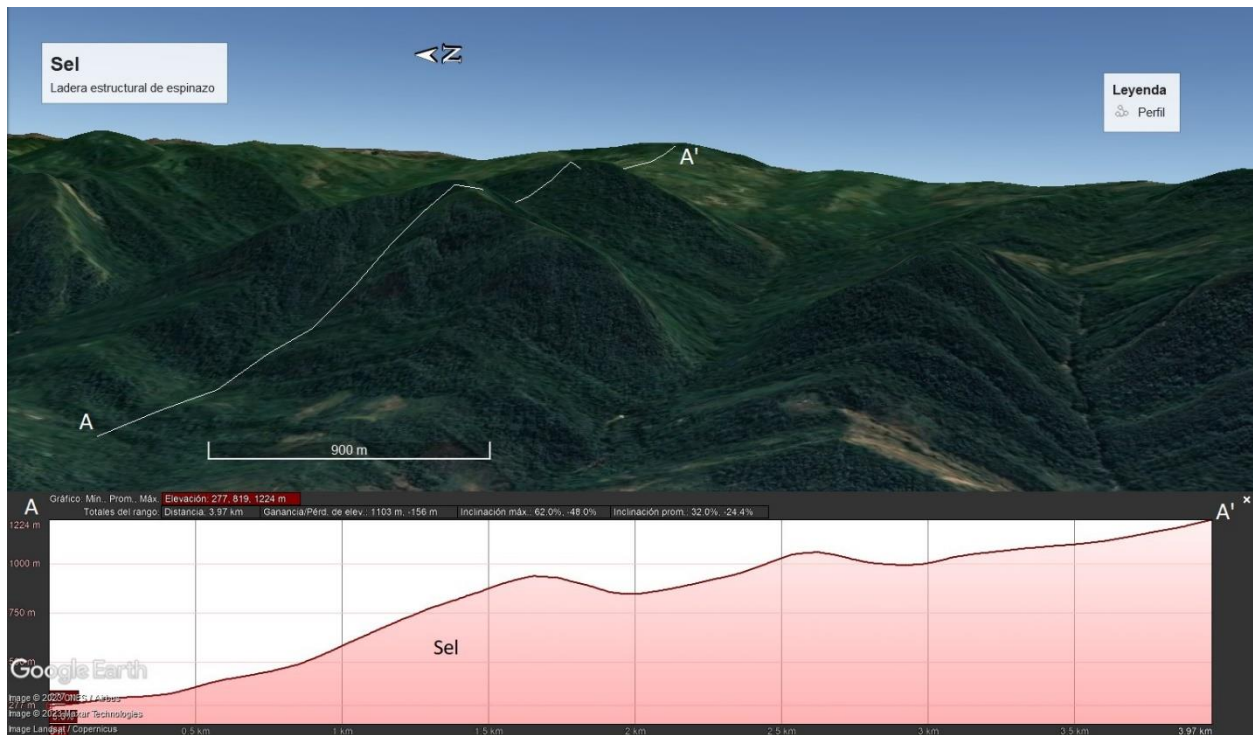
Ladera de contrapendiente de espinazo (Selc). Laderas pertenecientes al flanco E de la Serranía La Paz (**Figura 38**), sus estratos están inclinados en contra de la pendiente, forma parte de la unidad geomorfológica Espinazo, el tipo de relieve en general es montañoso, pendiente ligeramente escarpada, índice de contraste del relieve muy alto, longitud muy larga, formas cóncavas a irregulares, los drenajes formados en estas estructuras generalmente son en forma de V y generan crestas agudas. La geoforma se encuentra influenciada por el flanco oriental del sinclinal de Nuevo Mundo, está conformada por rocas sedimentarias de las formaciones La Paz y Lisama.

Figura 38*Ladera de contrapendiente de espinazo (Selc)*

Ladera estructural de espinazo (Sel). Laderas pertenecientes al flanco W de la Serranía La Paz (**Figura 39**), sus estratos están inclinados a favor de la pendiente, forma parte de la unidad geomorfológica Espinazo, el tipo de relieve en general es montañoso, pendiente moderadamente a fuertemente escarpada, índice de contraste del relieve muy alto, longitud muy larga, formas rectas escalonadas, los drenajes formados en estas estructuras generalmente son en forma de V y generan crestas agudas. La geoforma se encuentra influenciada por el flanco oriental del sinclinal de Nuevo Mundo, está conformada por rocas sedimentarias de la Formación La Paz.

Figura 39

Ladera estructural de espinazo (Sel) presente en el costado W de la Serranía de La Paz.



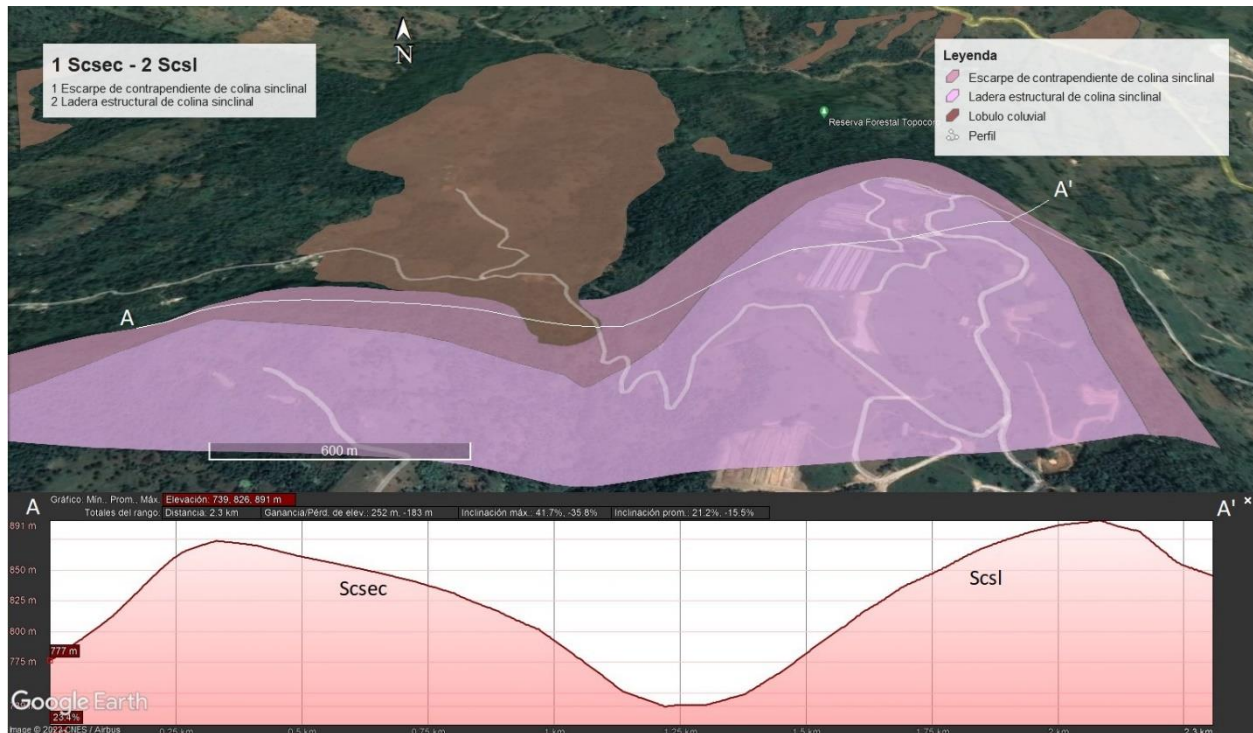
Escarpe de contrapendiente de colina sinclinal (Scsec). Corresponde a los flancos del sinclinal el Naranjo que rodean el cerro La Aurora, dispuestos en contra de la pendiente del terreno, tienen relieve de tipo colina, con inclinación de ladera escarpada a muy escarpada, índice de contraste del relieve moderado, estas laderas presentan longitudes cortas, de forma recta (**Figura 40**), la subunidad es disectada al N del cerro por la quebrada Agua Buena, en forma de U. Está compuesta por areniscas del segmento medio de la Fm. Lisama.

Ladera estructural de colina sinclinal (Scsl). Corresponde a los flancos del sinclinal el Naranjo de la parte alta del cerro La Aurora, dispuestos a favor de la pendiente del terreno, su relieve es tipo colina, con inclinación de ladera escarpada a muy escarpada, índice de contraste del relieve moderado, estas laderas presentan longitudes muy largas, de formas convexas

(Figura 40) y se tornan rectas en cuanto aumenta su cercanía a la quebrada Agua Buena, la cual disecta al N del cerro por la quebrada Agua Buena, en forma de U.

Figura 40

Escarpe de contrapendiente de colina sinclinal (Scsec) y Ladera estructural de sierra sinclinal (Ssle) presentes en el Cerro La Aurora.



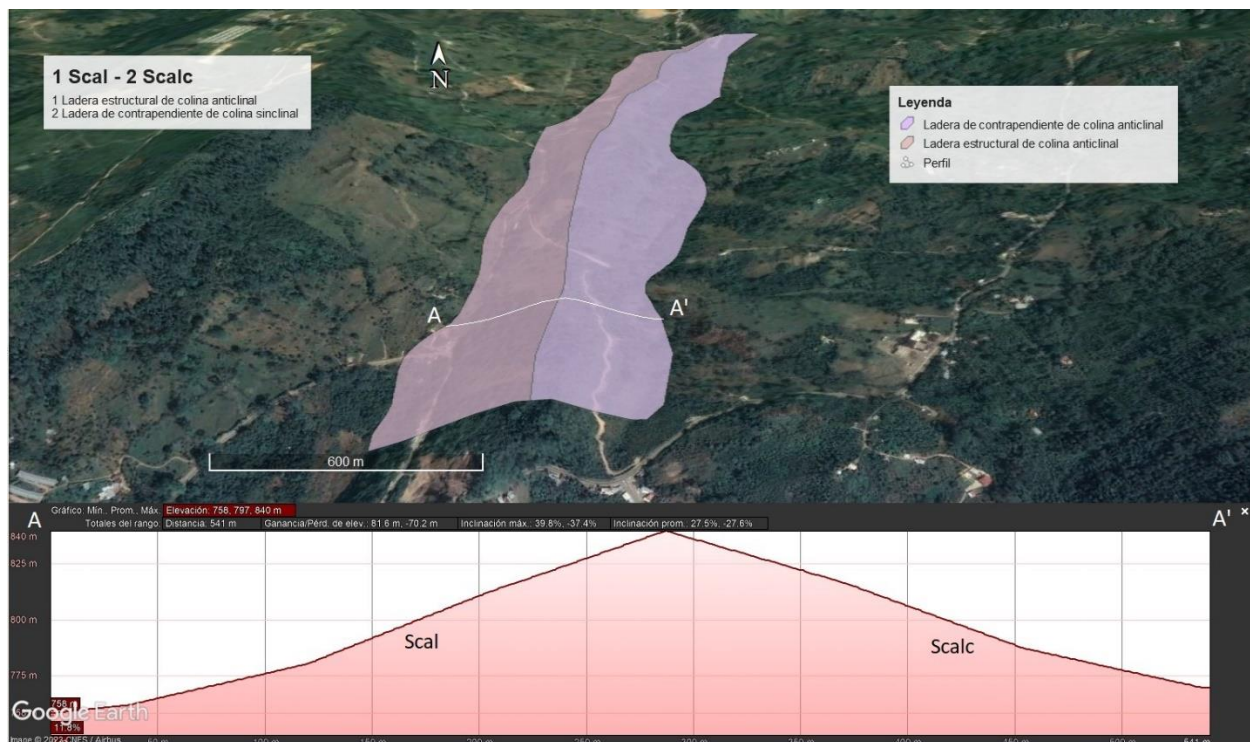
Ladera estructural de colina anticlinal (Scal). Corresponde a laderas de una sierra anticlinal, compuestas de estratos de las formaciones Luna y Umir dispuestos a favor de la pendiente, presenta relieve de tipo colina, con índice de contraste de relieve moderado, estas laderas son de forma recta y tienen pendientes muy abruptas a escarpadas, de longitud moderada (Figura 41). Sus drenajes son en forma de V, paralelos entre sí, posiblemente influenciados por el trazo de la Falla Cútiga.

Ladera de contrapendiente de colina anticlinal (Scalc). Corresponde a laderas de una sierra anticlinal, compuestas de estratos de la Formación Luna dispuestos en contra de la

pendiente, presenta relieve de tipo colina, con índice de contraste de relieve moderado, estas laderas son de forma recta y tienen pendientes muy abruptas a escarpadas, de longitud corta a moderada (**Figura 41**). Sus drenajes son en forma de V, paralelos entre sí, posiblemente influenciados por el trazo de la Falla Cútiga.

Figura 41

Ladera estructural de colina anticlinal y ladera de contrapendiente de sierra anticlinal

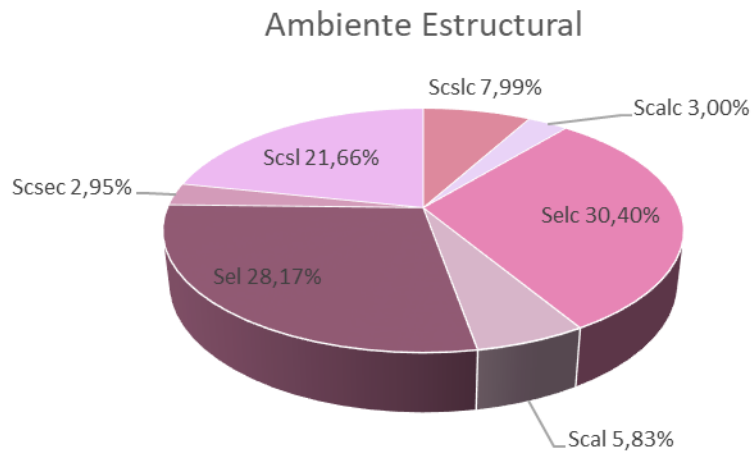


Ladera de contrapendiente de colina sinclinal (Scslc). Laderas pertenecientes la parte alta del Cerro El Naranjo, sus estratos están inclinados en contra de la pendiente, forma parte de la unidad geomorfológica Sierra Sinclinal, presenta relieve de tipo colina, pendiente inclinada a muy inclinada, índice de contraste del relieve moderado, longitud corta, formas cóncavas, los drenajes formados en estas estructuras generalmente son en forma de U y generan crestas convexas amplias. La geoforma está conformada por rocas sedimentarias de la Formación Lisama.

A continuación, la **Figura 42**, presenta la distribución porcentual de las subunidades geomorfológicas de origen estructural:

Figura 42

Distribución porcentual de las subunidades geomorfológicas de origen estructural.

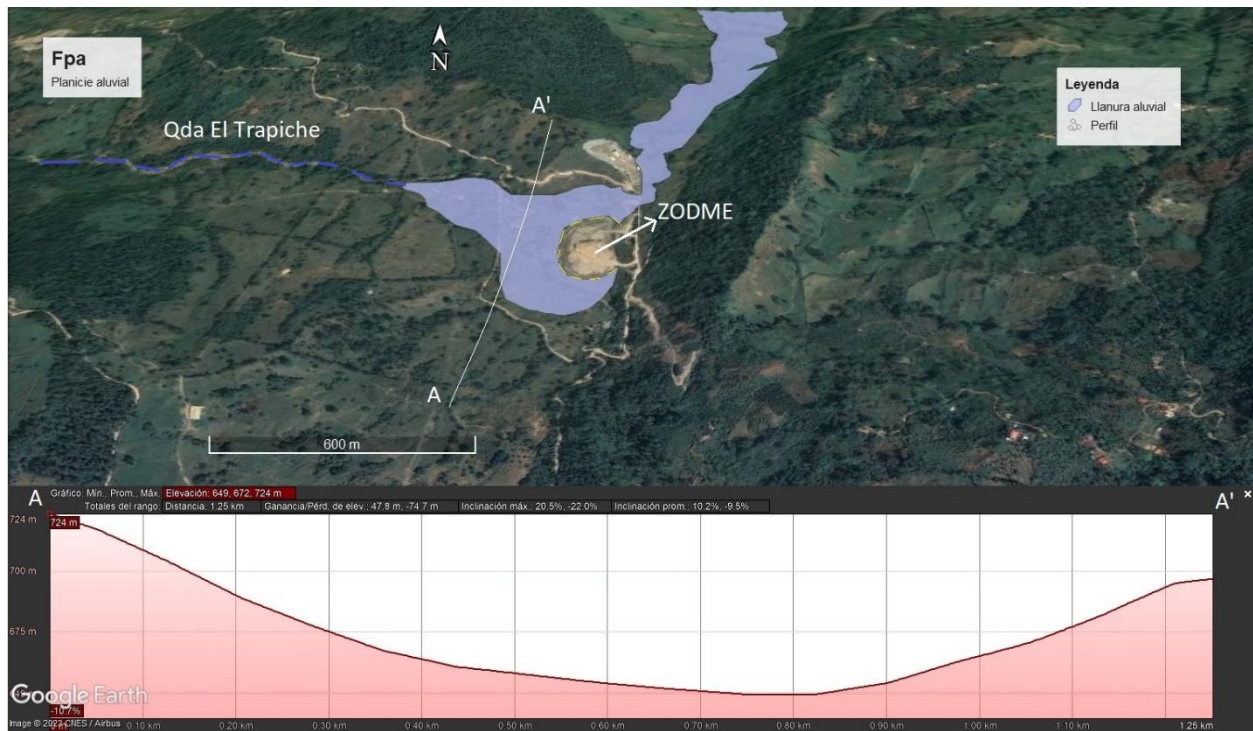


Elementos de origen Fluvial

Planicie aluvial (Fpa). Superficie natural con relieve de tipo montículo, su pendiente es plana a ligeramente inclinada, de longitud muy corta, forma plana, índice de contraste de relieve muy bajo (**Figura 43**), generadas por la depositación de sedimentos finos en épocas de inundación sobre planos topográficos ubicados a los márgenes de las quebradas La Sorda y Agua Dulce. Los materiales que componen este elemento son poco consolidados, sin embargo, por su pendiente no suele presentar inestabilidad. Las zonas de inestabilidad son generadas por procesos de socavación lateral en los escarpes de esta unidad ubicados en los márgenes de las quebradas, por lo que es común que presente movimientos en masa en estos sectores aledaños a éstas. Otros procesos denudativos comunes son erosión laminar, dando origen a surcos y cárcavas, producto de la escorrentía de aguas sobre sus materiales poco consolidados.

Figura 43

Planicie aluvial (Fpa) presente inmediaciones del costado SE del cerro El Naranjo.



Elementos de origen antrópico

Superficies explanadas (Ase). Superficie producto de cortes de explanación en laderas realizada de forma manual o con maquinaria con el fin de adecuar el terreno para construcción de infraestructura de servicios, viviendas, vías, etc.; tienen forma plana a semiplana, pendientes planas e índices contraste del terreno muy bajos. En el área de estudio, estas subunidades se asocian a los proyectos ingenieriles adelantados para la construcción de los túneles la Sorda y La Paz (**Figura 44**), así como para la ubicación del Zodme de estas obras.

Figura 44

Superficie explanada (Ase) realizada para la construcción de obras de ingeniería en el área de estudio.

**6.5. Propuesta del modelo evolutivo área de estudio**

Con base en los estudios anteriores sobre ambientes sedimentarios de las unidades geológicas de la zona de trabajo, se proponen los siguientes esquemas ilustrativos de la depositación de las mismas de manera regional y con base en los resultados expuestos en el presente trabajo, se plantea el modelo geomorfológico evolutivo del área de estudio, indicando las zonas de generación de los depósitos coluviales.

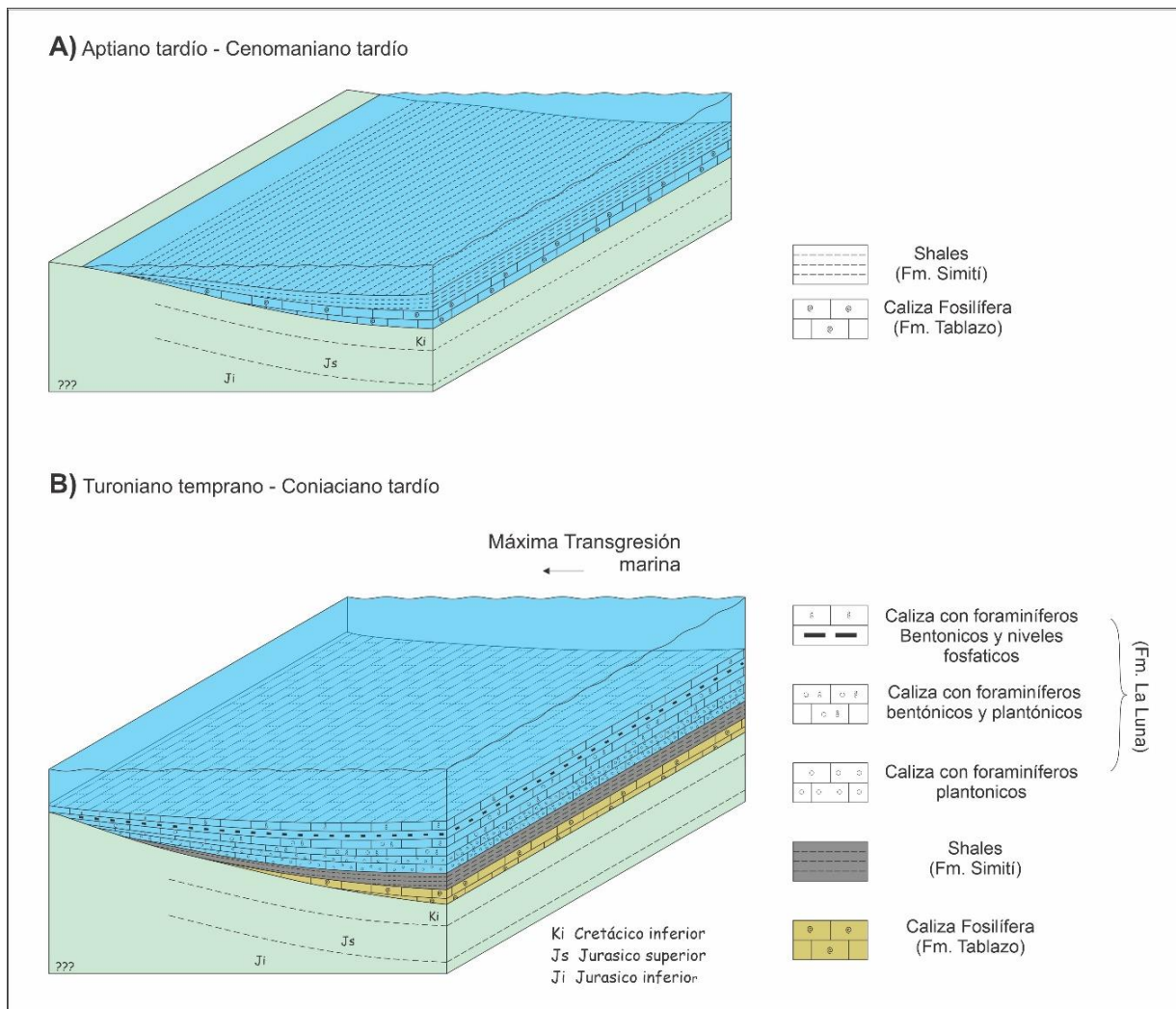
La deposición de las formaciones que integran la cuenca del VMM inicia al final de la primera parte del Mesozoico con ambientes continentales, cambiando a marinos en la segunda parte del mesozoico y finalizando con sedimentos continentales en el Cenozoico (Sarmiento-Rojas, 2001).

La secuencia calcárea bioesparítica de la Formación Tablazo se estima que se deposita entre Aptiano tardío y el Albiano temprano, por comparación con las formaciones supra e interyacentes, ya que no se reporta fauna en la localidad tipo (Sarmiento *et al.*, 2015), según Royero y Clavijo, (2001) la depositación se presenta en un ambiente nerítico poco profundo . La Formación Simití (**Figura 45A**) se deposita entre el Albiano temprano y medio, consiste en un conjunto de shales carbonosos localmente calcáreos (Sarmiento *et al.*, 2015). Su depositación tuvo lugar en un ambiente marino de aguas intermedias a profundas (Royero y Clavijo, 2001).

La Formación La Luna (**Figura 45B**) se deposita entre el Turoniano temprano y el Coniaciano tardío, representando la máxima superficie de inundación del VMM, se interpreta como una unidad transgresiva sobre una plataforma de mar abierto distal, depositando biomicritas de foraminíferos plantónicos (Miembro Salada), que progresivamente se va somerizando depositando biomicritas de foraminíferos plantónicos y bentónicos (Miembro Pujamana) hasta desarrollarse en una plataforma somera próxima costera con aporte de abundante material fosfático (Miembro Galembo) (Sarmiento *et al.*, 2015).

Figura 45

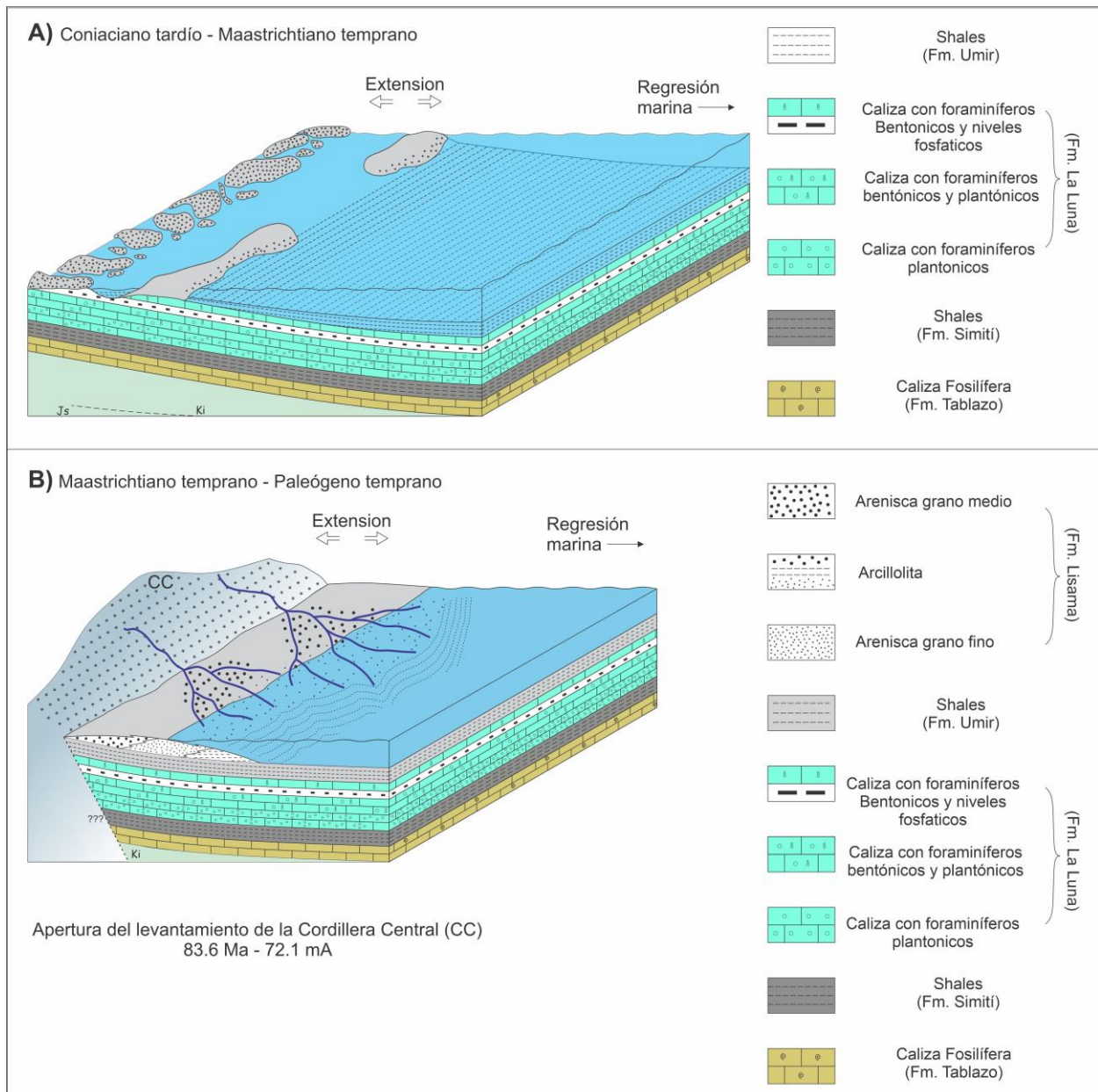
Esquema de la depositación de las formaciones: (A) *Tablazo y Simití* (B) *Formación la Luna*.



La Formación Umir (**Figura 46A**) se deposita entre el Coniaciano tardío y Maastrichtiano temprano, en un ambiente muy somero, a manera de mares restringidos con ocasionales desarrollos de áreas pantanosas con depósitos de materia orgánica indicando el aporte de terrígenos por la apertura del levantamiento de la CC, está compuesta en su mayoría por shales grises a negros, con frecuentes intercalaciones de arenisca y capas de carbón (Royero y Clavijo, 2001).

Figura 46

Esquema de la depositación de las formaciones: (A) Umir (B) Lisama.



La Formación Lisama (**Figura 46B**) se depositan entre el Maastrichtiano temprano y Paleogeno temprano, se considera como la transición de ambientes marinos someros de la Formación Umir a depósitos deltaicos y de planicies aluviales, está conformada por facies de

capas de conglomerados de intraclastos, capas de areniscas con estratificación cruzada e intercalaciones de lodolitas grises verdosas (Sarmiento *et al.*, 2015).

La Formación la Paz (**Figura 47**) descansa discordantemente sobre la formación infrayacente y un contacto concordante con la formación suprayacente (Royero y Clavijo, 2001), mostrando un evidente cambio litológico y por ende en los medios sedimentarios y una fuerte activación de las áreas de aporte terrígenas, asociado al levantamiento de la cordillera central, Las facies de esta formación de base a techo están compuestas inicialmente por un nivel conglomerático de guijos gruesos a cantos finos con presencia de capas de arenisca de grano grueso a fino, correspondiente a un ambiente de alta energía asociada a avnics aluviales canaliformes y ríos trezados, sobre esta sucesión se depositan lodolitas varicoloreadas, e intercalaciones subordinadas de arenisca conglomerática, esta facie se desarrolla en llanuras de inundación con eventuales flujos de mayor energía y por ultimo una secuencia de arenisca muy gruesa a medias con estratificación cruzada, asociado a un típico y ampliamente desarrollado sistema de ríos trezados (Sarmiento *et al.*, 2015).

Durante el Mioceno medio a tardío irrumpe (**Figura 48**) una fase de compresión mayor y los sedimentos hasta entonces depositados son plegados y fallados, Las paleo-fallas normales del sócalo formadas en la fase de distensión son reactivadas como fallas inversas (Fabre, 1983 en Tovar *et al.*, 2016).

Figura 47

Esquema de la depositación de la Formación La Paz

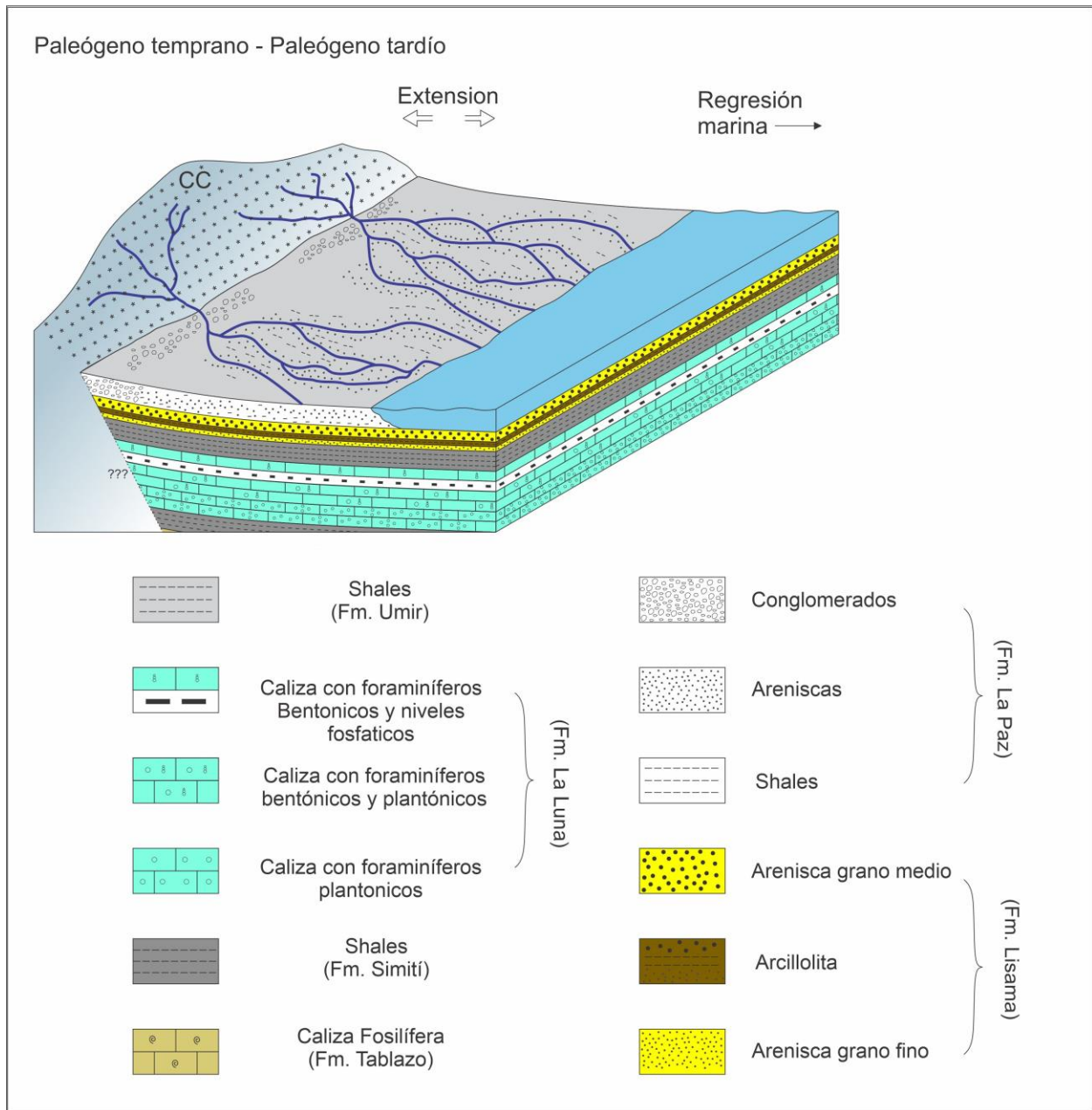
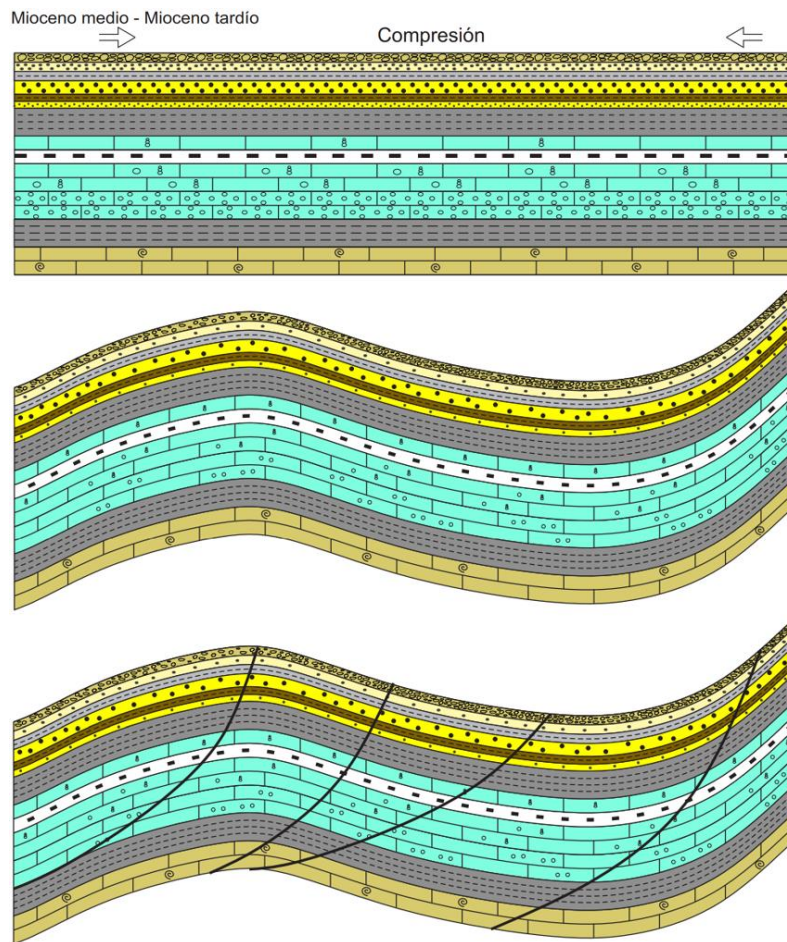
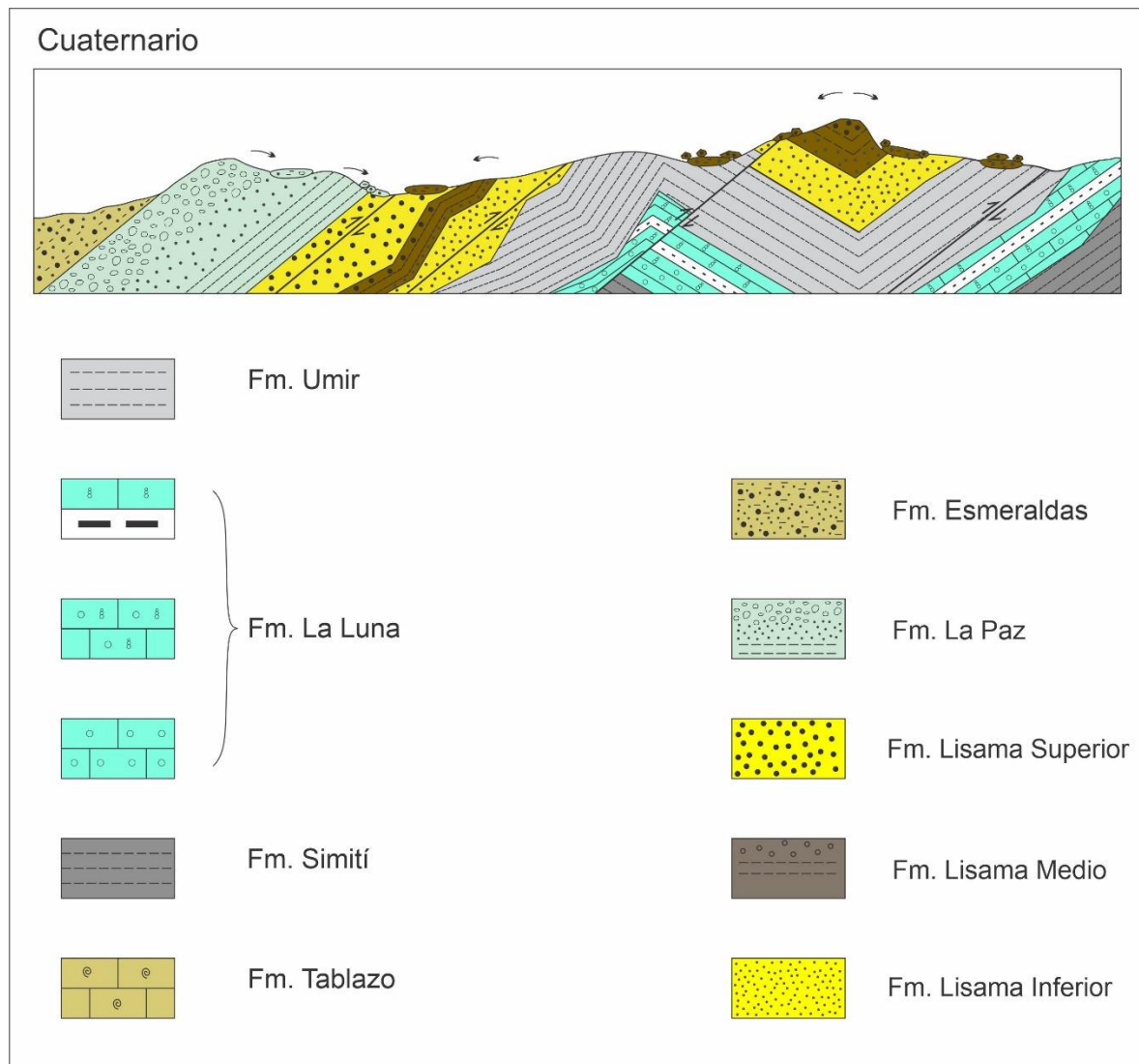


Figura 48

Plegamiento y fallamiento de la secuencia sedimentaria del área de estudio



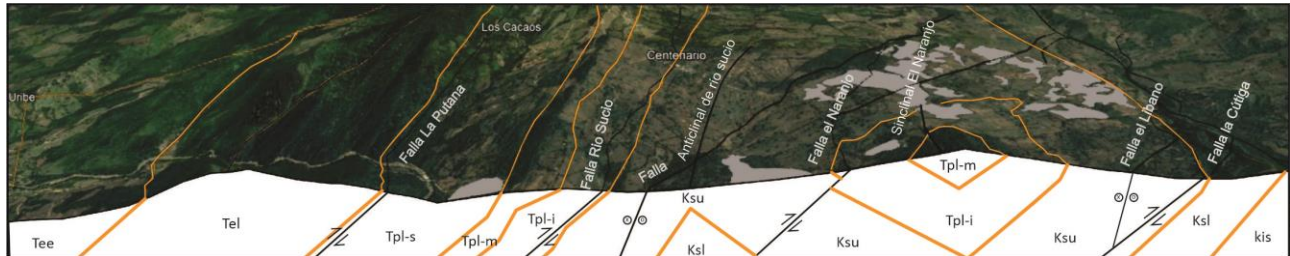
Los depósitos coluviales (**Figura 49**) se generaron durante el cuaternario, corresponden a depósitos matriz-soportados, compuestos por bloques centimétricos a métricos de areniscas de grano fino a medio en una matriz arcillo-arenosa y limo-arenosa, se formaron por fracturamiento relacionado con los procesos geológicos y geomorfológicos con incidencia en la zona que generaron el colapso de bloques pertenecientes a la Formación Lisama los cuales se distribuyeron a lo largo de la zona de estudio.

Figura 49*Modelo de formación de los depósitos coluviales*

Un esquema de la distribución de los depósitos coluviales relacionado con la ubicación de las formaciones aflorantes en el área de estudio se puede evidenciar en el corte 3D realizado a partir de la imagen tomada de Google Earth (**Figura 50**), la presencia de depósitos coluviales se encuentra en mayor proporción sobre la formación Umir, la cual se encuentra topográficamente más baja que a la Formación Lisama, siendo esta la fuente de los depósitos actuales a lo largo de la zona, de estudio.

Figura 50

Corte 3D del área de estudio donde se evidencian las principales estructuras y la distribución de los depósitos coluviales.

**7. Discusión**

Los estudios previos de cartografía geológica Ward *et al.*, (1977), Moreno-Sánchez, G. (2019) y de cartografía de unidades geomorfológicas de SGC - UIS (2014) indicados en la sección de antecedentes, no diferenciaron depósitos coluviales a pesar de que la extensión de algunos era apta para ser cartografiable. Además, presentan dos fallas inferidas en sentido SSW-NNE y dos estructuras de tipo pliegue: el Sinclinal El Naranjo y El Anticlinal Río Sucio. En cambio, el nivel de detalle del presente estudio permitió cartografiar un mayor número de depósitos coluviales y estructuras geológicas, que se asemejan más a las cartografías presentadas por ANI (2015) y Suárez (2019).

Suárez (2019), realiza la publicación en su revista sobre el comportamiento de puentes construidos en áreas inestables, refiriéndose a construcciones realizadas sobre depósitos coluviales, dentro de los principales aportes geológicos atribuye la proveniencia del material de estos depósitos a la Formación Umir y la Formación Lisama, sin embargo, dentro de los resultados planteados en el presente proyecto se hace la descripción composicional y textural de estos depósitos y mediante comparación y análisis de distribución de los depósitos a lo largo de la zona de estudio se considera la Formación Lisama como fuente principal del material de los

depósitos coluviales, con una pequeña influencia de la Formación la Paz en zonas cercanas a la Serranía de la Paz.

Los espesores de los depósitos coluviales observados en campo fueron de hasta 9 m, sin embargo, en los estudios de ANI (2015), se mencionan espesores de hasta 21.3 m obtenidos a partir de información de sondeos a rotopercusión y ensayos down hole.

El análisis del patrón de fracturamiento indicó dos tendencias predominantes: la tendencia t1 en sentido SSW-NNE y la tendencia t2 en sentido SE-NW. La tendencia t1 es semejante a las direcciones presentadas por Cetina *et al.*, 2019 para las fallas La Putana, La Sorda (denominada en el presente estudio como Falla Cútiga) y El Naranjo. La tendencia t2, corresponde al trazo de la Falla La Sorda, semejante al presentado en Suárez (2019), sin embargo, la presentada por este autor se muestra como una falla de carácter más regional en comparación a la descrita en este trabajo de carácter local.

La geomorfología presentada por UIS – SGC (2014) muestra un predominio de unidades de origen estructural, sin embargo, debido a la escala de trabajo del presente estudio y siguiendo esquema de jerarquización propuesto en Carvajal (2012), se permitió establecer que las unidades geomorfológicas expuestas por estos autores, se encuentran fuertemente afectadas por procesos denudacionales, generando subunidades de origen denudacional, distribuyéndose en un 55,85% las subunidades de origen estructural y 43,44% las subunidades de origen denudacional.

Los eventos que generaron el desprendiendo de los bloques denominados depósitos coluviales, tienen un punto de partida en el plegamiento de la secuencia sedimentaria producida principalmente durante el Mioceno medio. Las formaciones ya consolidadas son plegadas por procesos de compresión que irrumpieron en esta época, afectando lo que inicialmente se depositó de manera horizontal mediante basculamiento, iniciando la formación del Anticlinal de Río

Sucio y Sinclinal El Naranjo. Este proceso cambió el ángulo de inclinación y expuso esta secuencia a procesos erosivos que fueron moldeando la superficie hasta permitir aflorar a las formaciones más antiguas. Un nuevo factor que cobra importancia es el relacionado con la resistencia a la erosión de las rocas que empiezan a ser expuestas en superficie, aquellas más competentes presentan una mayor resistencia a los procesos morfodinámicos, generando escarpes de gran elevación, mientras aquellas menos competentes tienden a ser más erodadas y a formar relieves más suavizados de menor elevación. Un aspecto muy importante como factor desencadenante de la formación de estos depósitos es el efecto de las fallas, especialmente las de tipo inverso (Falla La Putana, Cristal-Canoas, Río Sucio, El Naranjo) presentes entre la Serranía La Paz y El Cerro El Naranjo, todas en sentido SSW-NNE a excepción de la falla Río Sucio (sentido SSE-NNW), que afectan directamente las formaciones Umir y Lisama. Las superficies más elevadas y competentes tienden a tener menor resistencia a la deformación, por lo que la deformación generada por el movimiento periódico de las fallas generó múltiples fracturas sobre las superficies de las rocas, permitiendo que procesos de meteorización física y química cobren importancia y propicien el desprendimiento de bloques y la generación de deslizamientos, este material suelto por efecto de la gravedad se desplazó por la superficie hasta encontrar estabilidad en zonas planas de menor altura, depositándose y consolidándose, el proceso de consolidación puede presentar una mezcla del material erodado y material de la superficie de acomodación reflejado en depósitos matriz-soportados con clastos pertenecientes a la roca erodada y matriz del material perteneciente a la superficie de acomodación.

8. Conclusiones

Los depósitos coluviales abarcan el 8.7% del área de estudio y se encuentran distribuidos principalmente sobre la Formación Umir, indicando que durante la etapa de desprendimiento de los bloques y posterior depositación, se presentaba una superficie topográfica de alta pendiente en el contacto Lisama – Umir, permitiendo que los bloques se desprendieran de la Formación Lisama y se depositaran sobre la Formación Umir. Así mismo, debido a la presencia de estos depósitos sobre la Formación Lisama, se sugiere que durante este proceso la Formación Lisama presentaban superficies de pendientes bajas o depresiones que permitieron la acomodación de este material sobre la misma formación proveniente.

La distribución de ambientes morfogenéticos a lo largo del área de estudio está representada principalmente por ambientes estructurales (55.85 %) y ambientes denudacionales (43.44 %), relación que ha tenido una gran importancia en la formación y distribución de los depósitos coluviales.

La zona de estudio se encuentra afectada por dos patrones de fracturamiento, con tendencias SSW-NNE y NW-SE. La tendencia SSW-NNE coincide con la dirección de las estructuras de cabalgamiento correspondientes a las fallas La Putana, Cútiga, El Naranjo y Cristal-Canoas y con las estructuras tipo pliegue como el Sinclinal El Naranjo y Anticlinal de Río Sucio. La tendencia NW-SE, se puede atribuir a planos antirriedels (R') de las fallas de cabalgamiento y al trazo de la Falla La Sorda de componente normal.

Finalmente, la distribución de los depósitos coluviales está relacionada directamente con las estructuras geológicas y los procesos geomorfológicos que han estado actuando sobre la zona. Estos depósitos se encuentran limitados por altos topográficos producto de fallamiento principalmente de tipo inverso (fallas La Putana, Cristal-Canoas, Río Sucio y El Naranjo). El

fracturamiento y composición de las rocas favoreció la intensidad de los procesos morfodinámicos y propiciaron fenómenos de remoción en masa que fueron depositados principalmente en superficies de pendiente plana a semiplana, correspondiente a laderas erosivas de la Formación Umir.

9. Recomendaciones

Los depósitos coluviales dentro del área de estudio se distribuyen principalmente sobre la Formación Umir y en menor proporción, sobre la Formación Lisama. No hay evidencia sobre depósitos que posiblemente se encuentren en cercanías de los límites de esta área, por lo tanto, se recomienda tener en cuenta para trabajos que involucren estas zonas, verificar la presencia de depósitos en formaciones diferentes a las mencionadas anteriormente, principalmente cuando estos estudios sean referentes a construcciones civiles.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANI (2015). Concesión ruta del cacao, capítulo 5.11. geología y 5.1.2 geomorfología estudio de impacto ambiental construcción proyecto Bucaramanga – Barrancabermeja –Yondo.
- Bayona, G. (2018). El inicio de la emergencia en los Andes del norte: una perspectiva a partir del registro tectónico-sedimentológico del Coniaciano al Paleoceno. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 42(165), 364-378.
- Bueno, E. L. (2014). Informe Final de Estudios y Diseños Estructuración Corredor Vial Bucaramanga – Barrancabermeja – Yondó, Estudio De Geotecnia y Geología. Tomo III. Agencia Nacional de Infraestructura ANI. Bogotá. 197.
- Caballero, V., Parra, M., & Bohorquez, A. R. M. (2010). Levantamiento de la Cordillera Oriental de Colombia durante el Eoceno tardío–Oligoceno temprano: proveniencia sedimentaria en el sinclinal de Nuevo Mundo, cuenca Valle Medio del Magdalena. *Boletín de Geología*, 32(1), 45-77.
- Cáceres, C., Cediél, F., & Etayo-Serna, F. (2003). Mapas de distribución de facies sedimentarias y amazón tectónico de Colombia a través del Proterozoico y del Fanerozoico. Bogotá, Colombia, Ingeominas, 40.
- Carvajal, J. H. (2012). Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia. Bogotá: INGEOMINAS.
- Cediél, F. (1968). El Grupo Girón, una molasa Mesozoica de la Cordillera Oriental. *Boletín Servicio Geológico Nacional*, 16(1–3), 5-96.
- Cediél, F. (2001). El Grupo Girón una molasa (?) Mesozoica (?) de la Cordillera Oriental (?) de Colombia (?). *Boletín de Geología*. vol. 23, no. 38, p. 88.

- Cetina, L. y Patiño, H. (2013). Determinación de los tensores de esfuerzos asociados a la evolución del Flanco Oeste del Anticlinal de los cobardes, Santander. Trabajo de grado. Escuela de Geología, Universidad Industrial de Santander.
- Cetina, L. M., Velandia, F., & Patiño-Sanabria, H. A. (2019). Análisis de deformación al occidente del Anticlinorio de Los Yariquíes-Cordillera Oriental de Colombia. *Boletín de Geología*, 41(3), 31-56.
- Cooper, M. A., Addison, F. T., Alvarez, R., Coral, M., Graham, R., Hayward, A. B., ... & Pulham, A. J. (1995). Basin development and tectonic history of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and middle Magdalena Valley, Colombia. *AAPG bulletin*, 79(10), 1421-1442.
- Cruden, D. M., Varnes, D. J. (1996). *Landslide Types and Processes*, Transportation Research Board, U.S. National Academy of Sciences, Special Report, 247: 36-75
- Dearman, W. R. (1974). The characterization of rock for civil engineering practice in Britain. *La Géologie de l'Ingénieur. Société Géologique de Belgique*, 1-75.
- De Julivert, Z. (1963). Estudio petrográfico de las calizas de la Formación Rosablanca de la región de la Mesa de Los Santos. *Boletín de Geología*, (15), 5-34.
- Dunham, R. J. (1962). Classification of carbonate rocks according to depositional textures.
- Etayo-Serna, F., (1968). El Sistema Cretáceo en la Región de Villa de Leiva y Zonas próximas. *Geología Colombiana*, 5, 5-74.
- Etayo-Serna, F., (1989). Análisis facial del inicio del avance marino del Cratácico en la región SW del Macizo de Santander. In V Congreso Colombiano de Geología. Excursión Precongreso (No. 2).

- Etayo-Serna, F., & Renzoni, G. y Barrero, D., (1969). Contornos sucesivos del mar Cretácico en Colombia. En *Memorias Primer Congreso Colombiano de Geología*, Bogotá (p. 217-252).
- Etayo-Sena, F. & Rodriguez, G. (1985). Edad de la Formación Los Santos. Proyecto Cretácico. *Contribuciones. Publ. Geol. Esp. de Ingeominas*, (16) XXVI-1 - XXVI-13., Bogotá.
- Fabre, A., (1985). Dinámica de la sedimentación Cretácica en la región de la Sierra Nevada del Cocuy (Cordillera Oriental de Colombia). En: Etayo-Serna, F., Laverde-Montaña, F. (Eds.), *Proyecto Cretácico, contribuciones. Capitulo XIX, INGEOMINAS Publ. Esp. 16*, Bogotá, 20p.
- García, A. (2014). Modelamiento o simulación de un flujo de un cuerpo coluvioaluvial- Municipio de Cáqueza, departamento de Cundinamarca Colombia (Bachelor's thesis, Quito, 2014).
- Garner, A.H. (1926). Suggested nomenclature and correlation of geological formations in Venezuela: *Petroleum Development and Technology in 1925. Symposiums of the Petroleum Division*.
- Hedberg, H.D. (1931). Standard stratigraphic section of the Department of Santander, Colombia. (Based principally on the geologic sections exposed on the Río Lebrija and the Río Sogamoso). *Venezuela Gulf Oil Company, Geological Department, VEN-160*: 69 p.
- Hettner, A. (1892). *Die Kordillere von Bogotá... Mit Karten und Profilen*.
- Langenheim, R. L. (1959). Preliminary report on the stratigraphy of the Giron formation in Santander and Boyaca. *Boletín de Geología*, (3), 35-50.

- Jimenez, G., López, O., Jaimés, L., & Umaña, R. M. (2016). Variaciones en el estilo estructural relacionado con anisotropías de basamento en el Valle Medio del Magdalena. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 40(155), 312-319.
- Julivert, M. (1958). La Morfoestructura de la Zona de las Mesas al SW de Bucaramanga (Colombia SA). *Boletín de Geología*, (1), 7-43.
- Lara, E. L., Simeón, C. P., & Navarro, J. G. M. (2006). Los sistemas de información geográfica. *Geoenseñanza*, 11, 16.
- Laverde, F. (1985). La Formación Los Santos: Un depósito continental anterior al ingreso marino del Cretácico. *Proyecto Cretácico. Publicaciones Geológicas Especiales Ingeominas*, (16) Capítulo XX, : 1-22. Bogotá.
- Laverde, F. & Clavijo, J. (1985). Análisis facial de la Formación Los Santos, según el corte de “Tu y Yo” (Zapatoca). *Proyecto Cretácico. Publicaciones Geológicas Especiales Ingeominas*, (16) Capítulo VI, : 1-9. Bogotá.
- Lozano, E., & Zamora, N. (2014). Anexo G Compilación de la cuenca de la cordillera oriental. Servicio geológico colombiano.
- Morales, C. J., Forero, H., Rojas, N. R., & Alvarado S. I. (2010) integración geológica e hidrogeológica del centro de Santander. Bogotá: Ingeominas.
- Morales, L. G. (1958). General geology and oil occurrences of middle Magdalena valley, Colombia: South America.
- Moreno, C.J., Horton, B.K., Caballero, V., Mora, A., Parra, M., and Sierra, J. (2011). Depositional and provenance record of the Paleogene transition from foreland to hinterland basin evolution during Andean orogenesis, northern Middle Magdalena Valley Basin, Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 32(3): 246-236.

- Moreno, G., & Sarmiento, G. (2002). Estratigrafía cuantitativa de las formaciones Tablazo y Simití en las localidades de Sáchica (Boyacá) y Barichara-San Gil (Santander), Colombia. *Geología Colombiana*, 27, 51-74.
- Moreno-Sánchez, G. (2019). Mapa geológico del Valle Medio del Magdalena en los alrededores del puente El Tablazo (departamento de Santander). Estudios geológicos y paleontológicos sobre el Cretácico en la región del embalse del río Sogamoso, Valle Medio del Magdalena, dirección científica y edición de Fernando Etayo-Serna. *Compilación de los Estudios Geológicos Oficiales en Colombia*, 23.
- Navas, J. (1963). Estudio estratigráfico del Girón al W del Macizo de Santander (Cordillera Oriental, Colombia). *Boletín de Geología*, (12), 19-33.
- Niemeyer, H. (1999). *Apuntes de geología estructural*.
- Obregón, C., & Lara, J. (2013). El mapa de susceptibilidad a movimientos en masa: una herramienta para la gestión sostenible del territorio. *Espacio y Desarrollo*, (25), 49-64.
- Olarte, J. M. (2017). Clasificación de movimiento en masa y su distribución en terrenos geológicos de Colombia.
- Palma González, V. (2018). Geodinámica de laderas en la sección distal de la cuenca de Vodudahue, X Región de Los Lagos.
- Parrilla, G., & Palacios, D. (1995). Bibliografía específica sobre un proceso de ladera: «flujo masivo de depósito» (debris flows), cuando es generado por lluvias intensas en áreas no volcánicas. In *Anales de geografía*. Universidad Complutense. Madrid.
- Patarroyo, G. D., Alarcón-Gómez, C. M., Torres-Parada, J. M., Díaz-Villamizar, J. S., Gómez-Coronado, J. S., Márquez-Prada, J. J., ... & Barragán-Martínez, D. M. (2021).

- Reconocimiento geológico de la Formación La Luna en el sector de Matanza (Oeste del Macizo de Santander, Colombia). *Boletín de Geología*, 43(1), 35-51.
- Patarroyo, G. D., Torres, G. A., Rincón, D. A., Cárdenas, C. P., & Márquez, R. E. (2017). Bioestratigrafía e inferencias paleoambientales de las asociaciones de foraminíferos en las formaciones cretácicas La Luna-Colón (Cuenca del Catatumbo, Colombia). *Boletín de Geología*, 39(3), 25-40.
- Pedraza, P.; Ramírez, Y. (2011). Catatumbo Basin. In: F. Cediél; F. Colmenares (eds.). *Petroleum Geology of Colombia. Volume 5.* ANH-Fondo Editorial Universidad EAFIT.
- Pons, D. (1982). Etude paleobotanique et palynologique de la Formation Giron (jurassique moyencretace inferieur) dans la region de Lebrija, departamento de Santander, Colombie. *Nat. Savantes Brest. Sci. Jasc.1* : 53-78. París.
- Renz, O. (1982). *Cretaceous Ammonites of Venezuela.* Birk Hause Ed.
- Romana M., (1985). New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes, in: *Proceedings of the International Symposium on the Role of Rock Mechanics in Excavations for Mining and Civil Works.* International Society of Rock Mechanics, Zacatecas, pp. 49-53.
- Royero, J.M., y Clavijo, J. 2001. Memoria Explicativa Mapa Geológico Generalizado departamento de Santander, escala 1:400.00. INGEOMINAS, Bogotá.
- Sarmiento, G., Puentes, J., & Sierra, C. (2015). Evolución geológica y estratigrafía del sector norte del Valle Medio del Magdalena. *Geología Norandina*, 12, 51-82.
- Sarmiento-Rojas, L. F., (2001), *Geology and hydrocarbon potential: Eastern Cordillera Basin,* *Petroleum Geology of Colombia, Volume 7,* 141 p.

- Sarmiento-Rojas, L. F., (2001), Mesozoic rifting and Cenozoic basin inversion history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes. Inferences from tectonic models. Ph.D. Thesis Vrije Universiteit, Amsterdam, The Netherlands, 297p.
- Sarmiento-Rojas, L. F., (2011), Geology and Hydrocarbon Potential: Middle Magdalena Basin, Petroleum Geology of Colombia, Volume 11, 193 p.
- Sarmiento-Rojas, L. F., Van Wess, J. D., y Cloetingh, S. (2006). Mesozoic transtensional basin history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes: Inferences from tectonic models. *Journal of South American Earth Sciences*, 21(4), 383-411.
- SGC y UIS. (2014) Memoria explicativa del mapa geomorfológico aplicado a movimientos en masa escala 1:100.000 plancha 109 Rionegro. Bucaramanga. Colombia
- Sintura, P. A. P., Molina, A. C., & Cortés, F. B. (2015). Compositional characterization and storage capacity of shale samples from La Luna and Conejo Formations (Middle Magdalena basin and the Eastern Cordillera): Implications for evaluation of cretaceous shale gas in Colombia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (37), 45-53.
- Sobrino, J. A., Raissouni, N., Kerr, Y., Olioso, A., López-García, M. J., Belaid, A., El Kharraz, M. H., Cuenca, J., Dempere, L., 2000. Teledetección. Sobrino, J. A. (Ed.), Servicio de Publicaciones, Universidad de Valencia (ISBN 84-370-4220-8), Valencia (España)
- Suárez, J. (2019). Comportamiento de puentes en áreas inestables: el caso del sistema de fallas los coluviones de la Leona. *Geotecnología Excelencia En Tecnología Geotécnica*, 1, 6-14.
- Taborda, Bernardo A., 1965, Guidebook to the geology of the De Mares concession, field trip of February 26-28, Colombian Soc. Petroleum Geologists and Geophysicists, Bogotá, 25 p.

- Terraza Melo, R. (2019). 'Formación La Luna': expresión espuria en la geología colombiana. Estudios geológicos y paleontológicos sobre el Cretácico en la región del embalse del río Sogamoso, Valle Medio del Magdalena, 305-362.
- Van der Hammen, T. (1958). Estratigrafía del terciario y maestrichtiano con continentales y tectogénesis de los Andes colombianos. *Boletín Geológico*, 6(1-3), 60-116.
- Varnes, D. J., (1978). *Slope Movement Types and Processes*.
- Villamil, T., 1993. Relative sea level, chronology, and a new sequence stratigraphy model for distal offshore facies, Albian to Santonian, Colombia. In: Pindell, J.A., Drake, C.D. (Eds.), *Mesozoic-Cenozoic Stratigraphy and Tectonic Evolution of the Caribbean Region/ Northern South America: Implications for Eustasy from Exposed Sections of a Cretaceous-Eocene Passive Margin Setting*. *Geol. Soc. Amer. Memoir*, paper C-8.
- Villamil, T., & Arango, C. (1998). Integrated stratigraphy of latest Cenomanian and early Turonian facies of Colombia.
- Ward, D., Goldsmith, R., Cruz, J. y Restrepo, H. (1973). Geología de los cuadrángulos H-12 Bucaramanga y H-13 Pamplona departamento de Santander. Memoria explicativa. Volumen XXI. No. 1-3. Congreso de la República de Colombia (1979).
- Ward, D., Goldsmith, R., Jimeno, A., Cruz, J., Restrepo, H., & Gómez, E. (1977). Mapa geológico del cuadrángulo H-12 Bucaramanga escala 1: 100.000. Colombia: Instituto de Investigaciones e Información Geocientífica Minero-Ambiental y Nuclear (INGEOMINAS).
- Wheeler, O. C. (1929). Report on the Palmira Series with notes on stratigraphy of the Umir, Lisama, and La Paz Formations near the eastern part of The Mares Concession.

Zuidam, R. V. (1986). Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping (No. C 25102). Smits Publishers.