

**Estructuras geológicas y desarrollo kárstico en el corregimiento de la Granja, Sucre,  
Santander**

Manuel Andrés Vargas Jiménez

Trabajo de Grado para Optar por el Título de Geólogo

**Director**

Francisco Alberto Velandia Patiño

Geólogo, Doctor en Geociencias

**Codirector**

Gonzalo Enrique Valdivieso Bohórquez

Geólogo, Universidad Nacional de Colombia

Universidad Industrial De Santander

Facultad De Ingenierías Físicoquímicas

Escuela De Geología

Bucaramanga

2025

### Agradecimiento

A mi profesor Francisco Velandia y a mi amigo y colega Gonzalo Valdivieso, por su apoyo, paciencia y compromiso al guiarme en este proyecto de investigación. Sus conocimientos, su experiencia y su calidad humana me inspiraron a crecer no solo como geólogo, sino también como persona.

A mi familia, por su apoyo incondicional en cada etapa de este proceso, en especial a mi padre y a mi madre, cuyo esfuerzo y confianza han sido el pilar en mi vida. Sin ellos, este logro no habría sido posible.

A todas las personas que dedicaron su tiempo y energía a acompañarme en las salidas de campo a La Granja, gracias por sus aportes, perspectivas e ideas. Cada palabra y cada gesto dejaron huella en este trabajo, y por ello cuentan con mi respeto y mi gratitud más sincera.

Y finalmente a *Pink Floyd*, *Hans Zimmer*, *Pescado Rabioso*, *Yukata Yamada*, *Billie*, *Benito* por acompañarme a través de la música durante este proceso. Sus sonidos, letras y emociones fueron una fuente de calma e inspiración en las noches de insomnio, recordándome que el arte, como la ciencia, también nace de la búsqueda y la contemplación, gracias :).

**Tabla de Contenido**

Introducción.....	12
1 Objetivos.....	16
1.1 Objetivo General.....	16
1.2 Objetivos específicos .....	16
2. Marco Teórico.....	17
2.1 Esfuerzo y Deformación .....	17
2.1.1 <i>Deformación frágil</i> .....	19
2.1.2 <i>Fracturas</i> .....	19
2.1.3 <i>Fallas</i> .....	20
2.1.4 <i>Clivaje</i> .....	20
2.1.5 <i>Deformación dúctil:</i> .....	21
2.1.6 <i>Análisis estructural</i> .....	23
2.2 Karst.....	25
2.2.1 <i>Dolinas</i> .....	26
2.2.2 <i>Exokarst y Karren</i> .....	27
2.3 Espeleología.....	27
2.3.1 <i>Clasificación y tipología de cavidades</i> .....	28
2.4 Parámetros espeleométricos.....	29
2.5 Aspectos ambientales y de conservación.....	33

2.5.1	<i>Vulnerabilidad y perturbación:</i> .....	33
3.	Marco Geológico .....	36
4.	Metodología.....	39
4.1	Recopilación bibliográfica: .....	39
4.2	Interpretación fotogeológica: .....	40
4.3	Trabajo de campo.....	40
4.3.1	<i>Medición de datos estructurales</i> .....	41
4.3.2	<i>Medición de datos espeleométricos:</i> .....	42
4.4	Procesamiento de datos.....	43
4.4.1	<i>Georose</i> .....	43
4.4.2	<i>WinTensor</i> .....	44
4.4.3	<i>Stereonet</i> .....	44
4.4.4	<i>Visual Topo</i> .....	45
4.4.5	<i>FracPaQ</i> .....	45
4.5	Interpretación y análisis de los resultados .....	46
5.	Resultados.....	47
5.1	Estructuras geológicas (Deformación).....	47
5.1.1	<i>Lineamientos</i> .....	47
5.1.2	<i>Estratificación</i> .....	48
5.1.3	<i>Diaclasas</i> .....	52

5.1.4	<i>Venas</i> .....	52
5.1.5	<i>Clivaje</i> .....	53
5.2	Análisis cinemático.....	54
5.3	Cartografía de Cuevas.....	57
5.3.1	<i>Cueva Azul (San-80-0790)</i> .....	58
5.3.2	<i>Cueva La Concordia (San-80-0742)</i> .....	60
5.3.3	<i>Cueva Escuela de Berlín (San-45-0840)</i> .....	62
5.3.4	<i>Cueva del Arco (San-80-0260)</i> .....	64
5.3.5	<i>Cueva del Pino (San-80-0744)</i> .....	66
5.3.6	<i>Cueva del Río (San-80-0745)</i> .....	68
5.3.7	<i>Cueva de Los Carracos de San Isidro (San-80-0250)</i> .....	71
5.4	Orientación de las cuevas y cavernas .....	73
5.5	Parámetros espeleométricos.....	75
5.5.1	<i>Cave Sensitivity Index (CSI)</i> .....	76
5.5.2	<i>Análisis de espeleotemas</i> .....	77
6.	Discusión .....	78
7.	Conclusiones.....	82
8.	Recomendaciones .....	84
	Referencias .....	85

**Lista de tablas**

Tabla 1 Clasificación morfométrica según la longitud de desarrollo. ....	29
Tabla 2 Clasificación de valores de índice de desarrollo.....	30
Tabla 3 Clasificación de altura promedio de una cavidad. ....	31
Tabla 4 Clasificación de ancho promedio de una cavidad.....	32
Tabla 5 Clasificación del Coeficiente de verticalidad. ....	32
Tabla 6 Parámetros para el cálculo del índice de vulnerabilidad de la cavidad CSI. ....	34
Tabla 7 Clasificación de vulnerabilidad de una cavidad. ....	35
Tabla 8 Síntesis de los resultados del procesamiento de los planos por: clivaje, diaclasas y venas .....	56
Tabla 9 Parámetros Espeleométricos .....	75
Tabla 10 Índice Cave Sensitivity Index (CSI) .....	76
Tabla 11 Distribución y estado de desarrollo de los espeleotemas.....	77

**Lista de figuras**

Figura 1 Localización de la zona de estudio.....	12
Figura 2 Campo de esfuerzos ejercido sobre un cuerpo.....	18
Figura 3 Estructuras que se forman según el campo de esfuerzos .....	19
Figura 4 Disposición de las fracturas de acuerdo con el eje del pliegueDisposición de las fracturas de acuerdo con el eje del pliegue.....	22
Figura 5 Desarrollo de fracturas extensionales y fallas normales en la cresta y la zona axial superior de un anticlinal. ....	23
Figura 6 Esquema simplificado de las principales morfologías kársticas. ....	26
Figura 7 Metodología general .....	39
Figura 8 Interpretación de lineamientos y diagrama de rosas .....	47
Figura 9 Mapa geológico de la zona de estudio en el corregimiento de La Granja (Sucre). Localización de los cortes geológico (Figura 11).....	48
Figura 10 Diagrama de Rosas y proyección de densidad de polos de (A) planos de estratificación, (B) diaclasas, (C) venas y (D) clivaje. ....	50
Figura 11 Cortes Geológicos (A-A', B-B').....	51
Figura 12 Venas .....	52
Figura 13 Clivaje .....	53
Figura 14 Tensores de esfuerzo obtenido a partir de planos de Clivaje, Diaclasas y venas. 55	
Figura 15 Ubicación de las cuevas cartografiadas.....	57
Figura 16 Cartografía espeleológica de la Cueva Azul (San-80-0790).....	58
Figura 17 Aspectos morfológicos y espeleológicos representativos de la Cueva Azul.....	59
Figura 18 Cartografía Cueva La Concordia (San-80-0742). ....	60

Figura 19 Rasgos morfológicos y ambientales de la Cueva La Concordia .....	61
Figura 20 Cartografía Cueva Escuela de Berlín (San-45-0840).....	62
Figura 21 Aspectos morfológicos y espeleológicos representativos de la Cueva Escuela de Berlín .....	63
Figura 22 Cartografía Cueva del Arco (San-80-0260) .....	64
Figura 23 Rasgos morfológicos y mineralógicos característicos de la Cueva del Arco.....	65
Figura 24 Cartografía Cueva del Pino (San-80-0744).....	66
Figura 25 Rasgos morfológicos e hidrológicos de la Cueva del Pino .....	67
Figura 26 Cartografía Cueva del Río (San-80-0745) .....	69
Figura 27 Rasgos geomorfológicos e hidrológicos de la Cueva del Río.....	70
Figura 28 Cartografía de la Cueva de Los Carracos de San Isidro (San-80-0250) .....	71
Figura 29 Rasgos geomorfológicos y biológicos de la Cueva .....	72
Figura 30 Orientación de las Cuevas y Cavernas .....	74

**Lista de Apéndices**

**Los apéndices están disponibles en el repositorio institucional**

**Anexo A.**

Tabla A1. Datos estructurales de planos de estratificación

Tabla A2. Datos estructurales de planos de diaclasas.

Tabla A3. Datos estructurales de planos de clivaje

Tabla A4. Datos estructurales de planos de venas

### Resumen

**Título:** Estructuras geológicas y desarrollo kárstico en el corregimiento de La Granja, Sucre, Santander.

**Autor:** Manuel Andrés Vargas Jiménez

**Palabras Clave:** Geología Estructural, Karst, Tensores de esfuerzo, Espeleología, Espeleometría

**Descripción:** El control estructural desempeña un papel fundamental en el desarrollo de los sistemas kársticos, ya que las fracturas y los planos de clivaje facilitan la infiltración y circulación del agua subterránea, acelerando la disolución de las rocas carbonatadas y dando origen a geoformas endo y exokársticas. Este estudio analiza la geología estructural y las características espeleológicas del sistema kárstico de La Granja, ubicado en el municipio de Sucre, Santander, desarrollado sobre rocas carbonatadas de la Formación Rosa Blanca del Cretácico Inferior. Se midieron 406 planos de clivaje, 280 diaclasas y 60 venas, procesados con los programas FracPaQ, Georose, Stereonet y WinTensor, mientras que los parámetros espeleométricos se obtuvieron con VisualTopo y la vulnerabilidad ambiental de las cavidades se evaluó mediante el Cave Sensitivity Index (CSI). Los resultados evidencian dos orientaciones estructurales dominantes ( $30^{\circ}$ – $70^{\circ}$  y  $110^{\circ}$ – $130^{\circ}$ ), correspondientes a los sistemas de clivaje y diaclasas, y un tensor regional con dirección compresiva NW–SE ( $SH_{max} \approx 118^{\circ}$ ). El modelo propuesto interpreta el clivaje como la estructura controlante principal del desarrollo kárstico, al guiar la geometría y orientación de las cavidades y favorecer los procesos de karstificación activa. En conclusión, el sistema kárstico de La Granja refleja la interacción entre la tectónica, la litología y la hidrogeología, y sus resultados aportan bases para la gestión sostenible del recurso hídrico subterráneo y la conservación del patrimonio geológico en ambientes kársticos tectónicamente activos.

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingeniería Físicoquímica. Escuela de Geología. Programa académico. Director:

Francisco Alberto Velandia Patiño. Doctor en Geociencias. Codirector: Gonzalo Enrique Valdivieso Bohórquez. Geólogo

**Abstract**

**Title:** Geological Structures and Karst Development in La Granja District, Sucre, Santander.

**Author:** Manuel Andrés Vargas Jiménez

**Keywords:** Structural Geology, Karst, Stress Tensors, Speleology, Speleometry

**Description:** Structural control plays a fundamental role in the development of karst systems, as fractures and cleavage planes facilitate groundwater infiltration and circulation, accelerating the dissolution of carbonate rocks and giving rise to endo- and exokarstic landforms. This study analyzes the structural geology and speleological characteristics of the La Granja karst system, located in the municipality of Sucre, Santander, developed within carbonate rocks of the Lower Cretaceous Rosa Blanca Formation. A total of 406 cleavage planes, 280 joints, and 60 veins were measured and processed using the software FracPaQ, Georose, Stereonet, and WinTensor, while speleometric parameters were obtained with VisualTopo, and the environmental vulnerability of the caves was assessed using the Cave Sensitivity Index (CSI). The results reveal two dominant structural orientations ( $30^{\circ}$ – $70^{\circ}$  and  $110^{\circ}$ – $130^{\circ}$ ), corresponding to the cleavage and joint systems, and a regional stress tensor with a NW–SE compressive direction ( $SH_{max} \approx 118^{\circ}$ ). The proposed model interprets cleavage as the main structural control of karst development, guiding the geometry and orientation of the cavities and promoting active karstification processes. In conclusion, the La Granja karst system reflects the interaction between tectonics, lithology, and hydrogeology, and its results provide a foundation for the sustainable management of groundwater resources and the conservation of geological heritage in tectonically active karst environments.

\*Degree Work

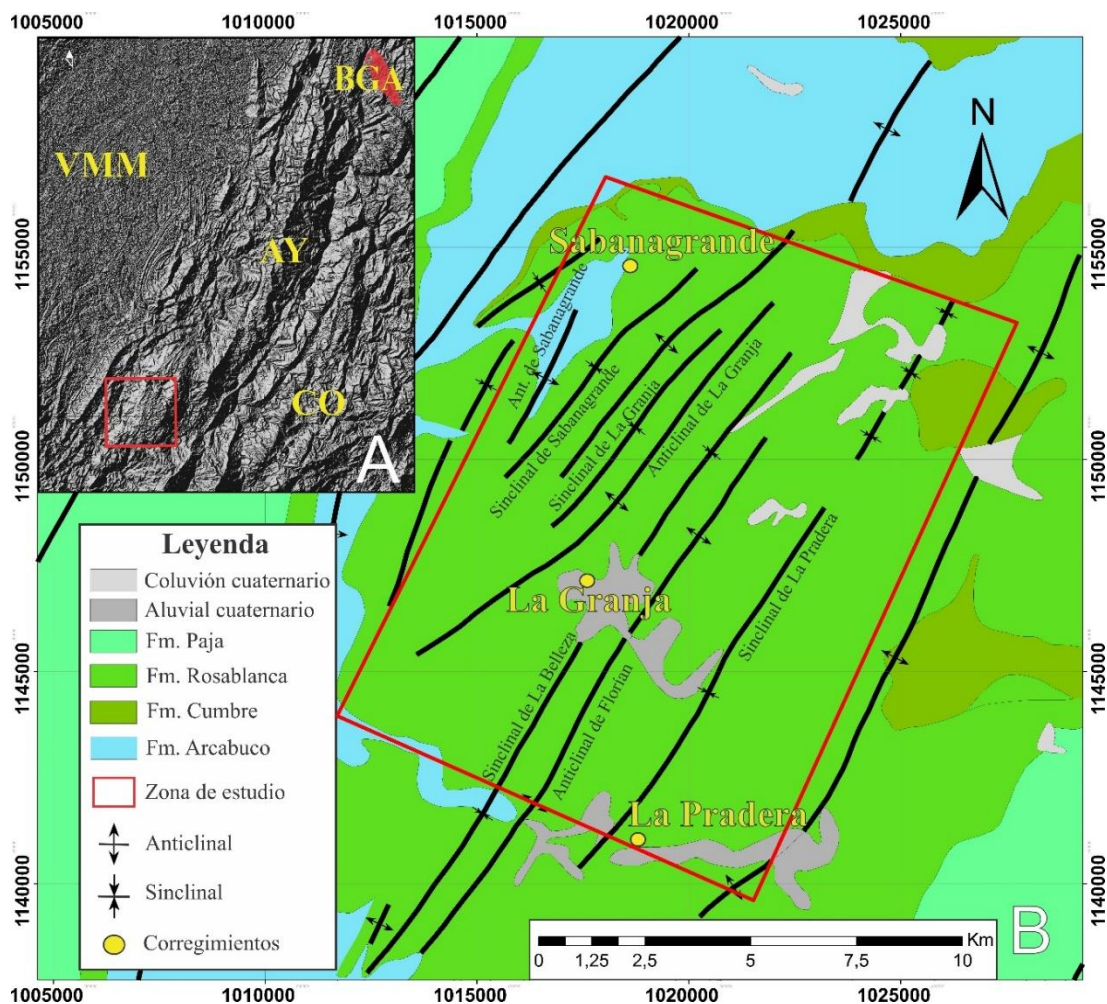
\*\* Faculty of Physicochemical Engineering. School of Geology. Academic program. Director: Francisco Alberto Velandia Patiño. PhD in Geosciences. Co-director: Gonzalo Enrique Valdivieso Bohórquez. Geologist

### Introducción

La zona de estudio se encuentra localizada en el suroeste del departamento de Santander (Figura 1), principalmente en el corregimiento de La Granja del municipio de Sucre, aunque también incluye parte de los corregimientos de Pradera y Sabanagrande. Para su referencia geográfica y cartográfica se tomó como base la plancha geológica 170 de la provincia de Vélez elaborada por Ulloa y Rodríguez (1979). Este sector forma parte del flanco occidental de la Cordillera Oriental, donde afloran unidades sedimentarias del Cretácico Inferior.

**Figura 1**

*Localización de la zona de estudio.*



*Nota.* (A) Mapa de sombras regional del área de estudio en la Cordillera Oriental de Colombia. AY = Anticlinorio de los Yariguies; BGA = Bucaramanga; CO = Cordillera Oriental; VMM = Valle medio del Magdalena; (B) Cartografía geológica modificada de Ulloa y Rodríguez (1979).

El corregimiento de La Granja se encuentra en una zona dominada por unidades carbonatadas de la Formación Rosa Blanca, las cuales fueron sometidas a procesos combinados de deformación tectónica y karstificación, que dieron origen a un sistema kárstico con presencia de cavidades, dolinas, escarpes y otras geoformas características. A pesar de su relevancia geológica, la zona carece de una caracterización estructural y espeleológica detallada, en parte debido a su limitada accesibilidad, que durante años restringió la realización de investigaciones exhaustivas. Esta falta de estudios ha resultado en un conocimiento parcial de su geología y de las interacciones entre los procesos tectónicos y los kársticos que controlan el desarrollo del sistema kárstico en un entorno tectónicamente activo.

Los primeros estudios geológicos en el área, como el de Ulloa y Rodríguez (1979), se realizaron a escala regional (1:100.000), lo que restringe su capacidad para explicar las relaciones locales entre la geología estructural y los procesos de karstificación. Investigaciones más recientes en zonas cercanas, como El Peñón, demostraron que las diaclasas y el clivaje ejercen un papel determinante en la orientación y evolución de las cavernas (Sánchez et al., 2024). De igual forma, Mantilla et al. (2003) documentaron la presencia de clivaje (slaty cleavage) en las rocas carbonatadas de la Formación Rosa Blanca dentro de la provincia de Vélez, sugiriendo su relevancia como plano de debilidad para la karstificación. Sin embargo, en La Granja, Sucre, Santander no se habían desarrollado

estudios que analizaran con detalle la influencia de estas estructuras en el sistema kárstico local.

Esta falta de información planteó interrogantes sobre los patrones estructurales y litológicos que controlaron la evolución del sistema kárstico, el campo de esfuerzos que generó la deformación y su posible relación con la orientación de las cavidades y el desarrollo de los espeleotemas.

Ante esta problemática, la presente investigación tuvo como propósito analizar la relación entre la geología estructural y el desarrollo del sistema kárstico, con énfasis en el papel del clivaje como estructura controlante. Para ello, se adoptó una metodología que integró análisis estructurales y espeleológicos, cuyos resultados permitieron interpretar las orientaciones predominantes de fracturas, el campo de esfuerzos y la geometría de las principales cavidades.

Los resultados de esta investigación representan un aporte significativo al conocimiento geológico del sur de Santander, al identificar los controles estructurales que condicionan la evolución del sistema kárstico y proporcionar una base para futuras investigaciones en ambientes similares. Además de su valor académico, los hallazgos tienen implicaciones prácticas en la planificación territorial, la gestión del recurso hídrico subterráneo y la conservación del patrimonio natural, abriendo la posibilidad de fomentar el geoturismo como alternativa sostenible de desarrollo para la región.

De lo anterior, surgen las siguientes preguntas de investigación:

¿Qué patrones estructurales (familias de fracturas, clivaje, ¿etc.) y características litológicas controlan el desarrollo del sistema kárstico?

¿Cuál es el campo de esfuerzos que genera la deformación en la zona y su relación con la orientación de cavidades del sistema kárstico?

¿Es posible establecer una relación entre la configuración estructural de la zona y el grado de desarrollo de los espeleotemas?

## 1 Objetivos

### 1.1 Objetivo General

Definir y analizar la relación entre la geología estructural y el desarrollo del sistema kárstico en el corregimiento de La Granja, Sucre, Santander.

### 1.2 Objetivos específicos

Cartografiar y clasificar las principales cuevas de La Granja según sus condiciones de acceso y características espeleológicas, evaluando su vulnerabilidad intrínseca mediante el *Cave Sensitivity Index* (CSI), como un aporte al conocimiento del patrimonio natural de la región sur del departamento de Santander.

Analizar la deformación del área de trabajo para definir el campo de esfuerzos y su influencia en el desarrollo del sistema kárstico, a partir del estudio de estructuras geológicas como lineamientos, pliegues, fracturas y clivaje.

Realizar la modelación 2D de dos transectas geológicas, basada en el control proporcionado por la cartografía geológica existente.

## 2. Marco Teórico

El presente estudio aborda diversos conceptos de la geología estructural y espeleología, centrándose en el reconocimiento en las características geológicas asociadas, tanto endokársticas como exokársticas, así como los procesos de deformación y sus implicaciones a diferentes escalas.

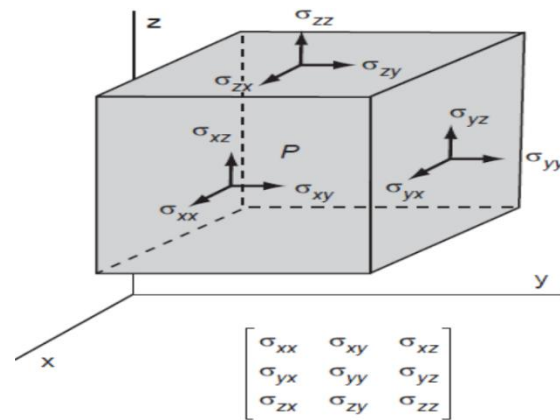
### 2.1 Esfuerzo y Deformación

En mecánica de rocas y geología estructural, el concepto de *esfuerzo* se refiere a la distribución interna de fuerzas dentro de un cuerpo que actúa a través de una superficie. Formalmente, el esfuerzo en un punto dado se define como la fuerza por unidad de área que actúa sobre un plano infinitesimal que pasa por ese punto (Fossen, 2010). El *estado de esfuerzo* en un punto, sin embargo, es una entidad más compleja que un simple vector. Representa la totalidad de los vectores de esfuerzo que actúan sobre todos los posibles planos que atraviesan ese punto en un instante específico (Figura 2). Esta colección infinita de vectores constituye el *tensor de esfuerzo*, una magnitud física que describe completamente el estado de esfuerzo tridimensional (Martínez, 2002).

Dentro del tensor de esfuerzo, existen tres direcciones mutuamente ortogonales donde los esfuerzos cortantes son nulos. Estas direcciones definen los *esfuerzos principales* ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ ). Estos esfuerzos principales son fundamentales para visualizar y analizar el estado de esfuerzo, y se representan geoméricamente mediante la *elipse de esfuerzo* (o elipsoide en 3D), que proporciona una representación intuitiva de la magnitud y orientación de los esfuerzos que actúan sobre el cuerpo (Davis et al., 2011).

**Figura 2**

*Campo de esfuerzos ejercido sobre un cuerpo*



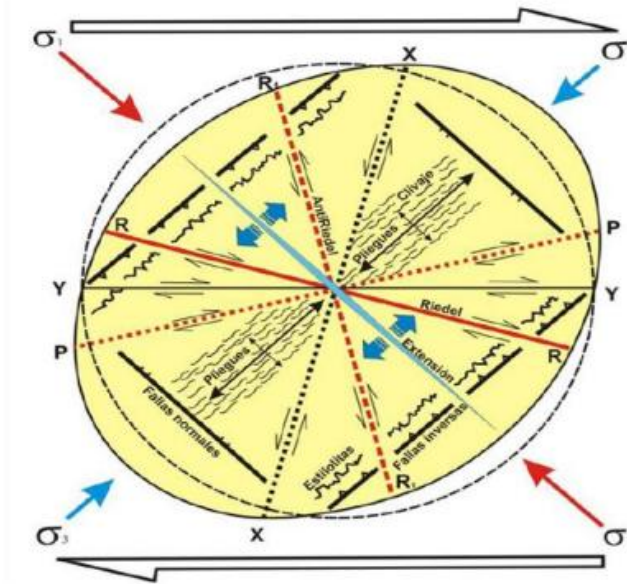
*Nota.* Tomado de Davis et al. (2011)

Aparte de ser conceptos distintos, hay una diferencia en el tratamiento de unos y otras que merece la pena destacar: los esfuerzos se definen y se analizan para un instante dado, mientras que las deformaciones miden cambios producidos en un intervalo de tiempo y se analizan comparando un estadio final con uno inicial (Martínez, 2002).

Los esfuerzos se analizan en un momento específico, como una fotografía instantánea, mientras que las deformaciones se estudian como cambios a lo largo del tiempo, comparando el estado inicial con el final (Martínez, 2002). La Figura 3 muestra los esfuerzos principales con la deformación, definida ésta por el tipo y orientación de las estructuras geológicas que se forma

**Figura 3**

*Estructuras que se forman según el campo de esfuerzos*



*Nota.* Tomado de Rossello (2010).

### **2.1.1 Deformación frágil**

La deformación frágil se define como un cambio permanente en las rocas de la corteza superior, que ocurre cuando el estrés acumulado excede la resistencia a la ruptura local, resultando en fracturas. Este proceso implica la trituración, reordenamiento de granos y rupturas instantáneas a nivel microscópico, siendo más común en condiciones de baja temperatura y tasas de deformación rápidas. Tal deformación, que es propia de áreas donde la tensión acumulada supera la resistencia local a la ruptura, genera fracturas y fallas, constituyendo así las estructuras de deformación frágil (Fossen, 2010).

### **2.1.2 Fracturas**

Una fractura se define como cualquier superficie plana o subplana dentro de una roca donde se ha producido una discontinuidad, resultando en una pérdida de cohesión entre el

material a ambos lados de dicha superficie (Fossen, 2010; van der Pluijm & Marshak, 2004). Este tipo de discontinuidad es el resultado de esfuerzos, ya sean internos o externos, que superan la resistencia de la roca (Fossen, 2010).

Las fracturas se pueden clasificar en dos grandes grupos: fracturas de cizalla, donde el desplazamiento ocurre paralelo a la superficie de la fractura, y fracturas de apertura o extensión, que se forman cuando la roca se separa perpendicularmente a la superficie. Este último grupo incluye juntas, fisuras y venas (Figura 4), estas últimas caracterizadas por el relleno de minerales precipitados de soluciones acuosas (Fossen, 2010; van der Pluijm & Marshak, 2004).

Adicionalmente, las fracturas de extensión pueden ser clasificadas según su relación con el tensor de esfuerzos: paralelas o subparalelas (fracturas abiertas, como diaclasas, venas y fisuras), perpendiculares (fracturas cerradas, como estilolitos) u oblicuas (fracturas de cizallamiento) (Fossen, 2010).

### **2.1.3 Fallas**

Por otro lado, las fallas se caracterizan por ser fracturas de cizalla donde se observa un desplazamiento relativo significativo. De acuerdo con la Ley de Anderson, y según lo expuesto por Davis *et al.* (2011), las fallas se clasifican según el tipo de movimiento y la inclinación del plano de fractura en relación a la dirección del máximo esfuerzo compresivo.

### **2.1.4 Clivaje**

Asimismo, el clivaje es una estructura planar penetrativa que se manifiesta como la capacidad de una roca para dividirse a lo largo de superficies más o menos paralelas (Fossen,

2010). Este fenómeno, visible desde escalas microscópicas hasta regionales, resulta de la orientación preferencial de minerales planares bajo presión, generando planos de debilidad. Además de facilitar la división de la roca, el clivaje puede servir como vía para el flujo de fluidos a través de ella. Es una característica estructural crucial para interpretar la historia de deformación de las rocas y las fuerzas tectónicas que las afectaron.

### ***2.1.5 Deformación dúctil:***

La deformación dúctil se refiere a un cambio continuo en la forma de las rocas, caracterizado por su capacidad para fluir sin fracturarse. Según Martínez (2002), la deformación dúctil puede subdividirse en elástica y permanente. La deformación elástica es reversible: la roca se deforma bajo estrés, pero recupera su forma original al cesar dicho estrés. En contraste, la deformación permanente, que incluye la deformación plástica y viscosa, resulta en cambios irreversibles en la roca, manteniendo la nueva forma incluso después de que el estrés desaparece

#### **2.1.5.1. Estructuras de Deformación dúctil.**

**2.1.5.1.1. Pliegues.** En la geología estructural, los pliegues se definen como manifestaciones de deformación dúctil, caracterizadas por la flexión de estratos inicialmente planos (Fossen, 2010). Estas estructuras, observables en diversas escalas, desde microscópicas hasta regionales, evidencian la respuesta de las rocas a esfuerzos compresivos, resultando en la curvatura de capas individuales o múltiples (Hudlestone & Treagus, 2010).

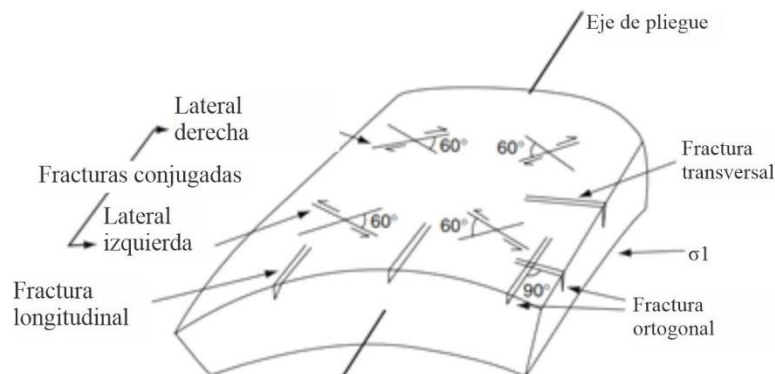
En cuanto, a la diversidad morfológica de los pliegues se manifiesta en la presencia de anticlinales (convergencia de estratos hacia un eje central), sinclinales (divergencia de estratos desde un eje central), monoclinales (flexión abrupta en

estratos horizontales), homoclinales (estratos paralelos con inclinación uniforme), así como estructuras compuestas como anticlinorios y sinclinorios.

Los regímenes de deformación dúctil y frágil pueden coexistir en un mismo contexto geológico. En consecuencia, la presencia de fracturas en flancos y charnelas de pliegues es un fenómeno común, evidenciando la superposición de procesos de deformación (Figura 4 y 5). Hay dos conjuntos de fracturas por cizallamiento oblicuo que muestran una tendencia lateral izquierda y lateral derecha, adicionalmente se encuentran dos conjuntos de fracturas por tensión que son ortogonales, las fracturas longitudinales y las transversales reflejando la complejidad de la respuesta de las rocas a los esfuerzos tectónicos (Singhal & Gupta, 2010)."

#### Figura 4

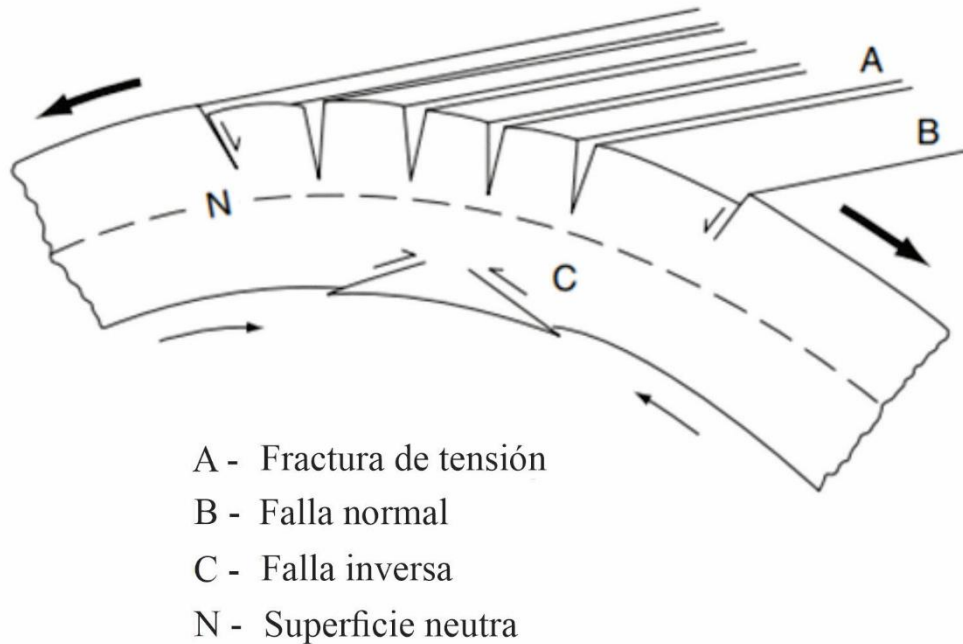
*Disposición de las fracturas de acuerdo con el eje del pliegue*



*Nota:* Relación entre el plegamiento junto a los sistemas de fractura y la orientación del campo de esfuerzos. Tomado de Singhal & Gupta (2010).

**Figura 5**

*Desarrollo de fracturas extensionales y fallas normales en la cresta y la zona axial superior de un anticlinal.*



*Nota.* Anticlinal con fracturas: extensión (A) y fallas normales (B) en la cresta; fallas inversas (C) en la zona de compresión. Superficie neutra (N) separa extensión y compresión. Tomado de Singhal & Gupta (2010).

**2.1.6 Análisis estructural**

El análisis estructural examina la deformación en cuerpos geológicos para descifrar su historia evolutiva. Este proceso implica cartografiar estructuras, describir e interpretar deformaciones, y explicar su origen mediante principios de mecánica y tectónica (Davis, 2011). Según, Fossen (2010), el análisis se compone de tres vertientes, geométrica, cinemática y dinámica.

**2.1.6.1 Análisis geométrico.** En este estudio, se examinan la morfología, orientación geográfica, dimensiones y relaciones espaciales entre las estructuras geológicas principales y sus componentes secundarios. Para facilitar la interpretación de los datos recopilados, se emplean herramientas como diagramas de rosa y proyecciones estereográficas.

- **Diagramas de rosas:** los diagramas de rosa representan estadísticamente las tendencias principales de la orientación de los planos de fracturas medidos (strike).
- **Proyecciones estereográficas:**  
las proyecciones estereográficas son una herramienta fundamental para representar datos estructurales tridimensionales en una forma gráfica bidimensional (Sánchez *et al.*, 2024).

**2.1.6.2 Análisis Cinemático.** El análisis cinemático busca reconstruir el historial de movimiento de las partículas rocosas durante la deformación, rastreando su trayectoria desde el estado inicial hasta el final, sin considerar las fuerzas aplicadas (Davies *et al.*, 2011). Para determinar este desplazamiento, se examinan estructuras geológicas conocidas como indicadores cinemáticos, que incluyen estrías de falla, fracturas secundarias (clivaje), y la flexión de estratos a lo largo de fallas y zonas de cizalla (Fossen, 2010). Asimismo, el análisis se apoyó en el modelo tensorial de Angelier (1994), a partir del cual se obtuvieron los diagramas y los círculos de Mohr, y se cuantificaron las relaciones entre esfuerzos principales ( $R$  y  $R'$ ).

**2.1.6.3 Análisis dinámico.** En la mayoría de los casos, el análisis dinámico busca reconstruir la orientación y la magnitud del campo de esfuerzos mediante el estudio de un conjunto de estructuras como fallas y fracturas (Fossen, 2010).

## 2.2 Karst

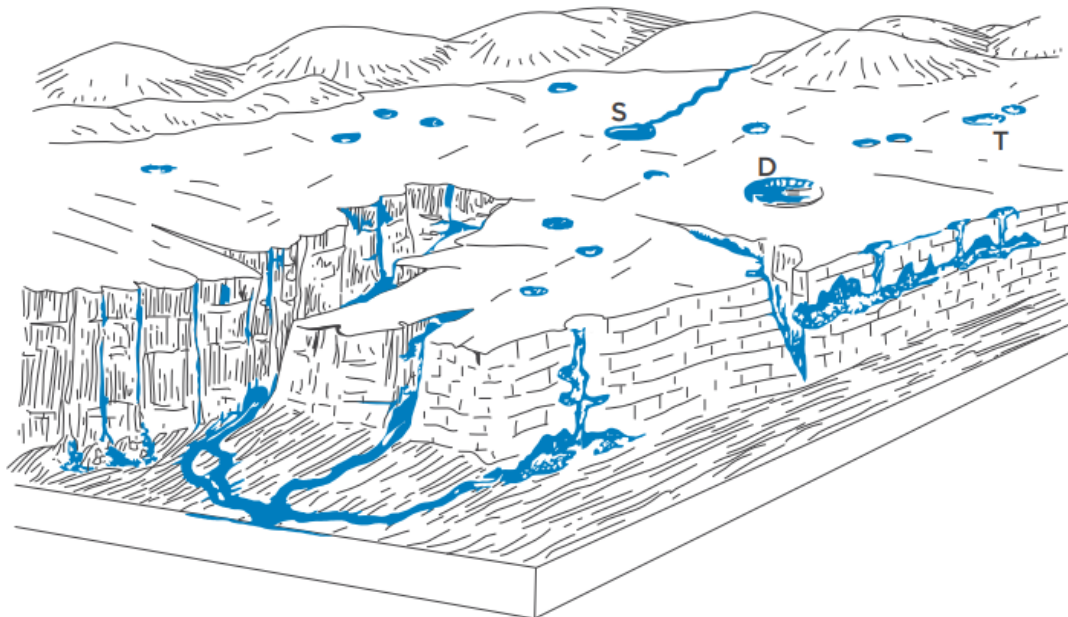
En cuanto al karst, es un paisaje geomorfológico distintivo formado por la disolución de rocas solubles, como calizas, dolomías y yesos (Ford & Williams, 2007). Su desarrollo y evolución dependen tanto de propiedades intrínsecas de la roca (como litología y estratificación) como de factores extrínsecos (como clima, relieve y tiempo) (Andreu *et al.*, 2016). Entre estos, el control tectónico se identifica como el factor más relevante para el desarrollo de sistemas kársticos en una región (Sánchez *et al.*, 2024). Este control está determinado por la presencia de fallas y diaclasas, que actúan como vías de infiltración de agua en el macizo rocoso, acelerando los procesos de erosión y disolución mineral. Según Rodríguez y Lasso (2019), a mayor deformación estructural, mayor es el desarrollo de los sistemas kársticos. La formación de espeleotemas en estos ambientes kársticos es un proceso que revela la interacción entre el agua y la roca, por ende, las fracturas orientadas perpendicularmente a la tensión principal mínima son el camino más conveniente para el flujo de agua subterránea en macizos kársticos (Shanov & Kostov, 2015).

A nivel endokárstico, las estalactitas y estalagmitas, formaciones icónicas, se originan por la precipitación de carbonato de calcio (Hill, 2000) estos fluyen por las fracturas presentes en la roca, hasta la unión de estas, formando columnas, conectando techo y suelo. Las cortinas o banderolas se forman por flujo de agua en superficies inclinadas Pomar *et al.* (1976). Las helictitas, caracterizadas por su crecimiento en direcciones impredecibles y aparentemente desafiando la gravedad, son espeleotemas cuya formación se atribuye principalmente a la acción de fuerzas capilares que permiten el transporte de agua contra la gravedad (Forti & Hill, 1997). Los gours son espeleotemas con forma de diques de calcita que se desarrollan en pendientes por las que desciende una circulación laminar de agua más o menos continua,

formando estanques escalonados (Gèze, 1973). Los coraloides son pequeños nódulos de calcita, aragonito o yeso que se forman en las superficies de las cuevas y pueden originarse por procesos de precipitación o evaporación del agua que se filtra o salpica sobre las paredes de la cueva (Forti & Hill, 1997).

### Figura 6

*Esquema simplificado de las principales morfologías kársticas.*



*Nota.* (S) Sumideros (T) lagos (D) Dolinas. Tomado de Meléndez y Fuster (1975) modificado por Lasso et al. (2019).

Dentro de este sistema, se destacan formaciones como:

#### **2.2.1 Dolinas**

Se definen como una depresión cerrada de tamaño pequeño a mediano de morfología semicircular o elíptica y donde su fondo actúa como sumidero por donde el agua se introduce en el interior del karst. En otras palabras, son depresiones circulares o elípticas originadas

por la disolución y colapso de rocas carbonatadas (Gutiérrez *et al.*, 2008). Pueden generarse por diferentes factores, pero la tipología más frecuente son las generadas por la disolución, subsidencia y colapso (Andreu *et al.*, 2016), así como también pueden encontrarse aisladas o agrupadas conformando un campo de dolinas (Gutiérrez, 2008). Según Radulovic (2013) las dolinas se alinean con fallas o fracturas significativas, generalmente son alargadas en el rumbo de las fallas, y coinciden también con una agrupamiento o intersección de dos o más fracturas.

### **2.2.2 Exokarst y Karren**

Los rasgos kársticos superficiales se manifiestan a diversas escalas, desde milímetros hasta kilómetros, debido principalmente a los efectos disolventes de las precipitaciones sobre rocas solubles (Bögli, 2012; Palmer, 2007). Según Andreu *et al.* (2016), las formas exokársticas, como lapiaz o karren, se clasifican según su escala de observación y se caracterizan por microformas de erosión superficial (White, 1988). El karren genera patrones de drenaje superficial con ramificaciones cortas y puntos de absorción cercanos (Bögli, 2012). Los sistemas kársticos actúan como archivos geológicos vivos, registrando cambios paleoclimáticos, tectónicos e hidrológicos, y son fundamentales para el estudio de los recursos hídricos subterráneos, procesos de erosión, sedimentación y deformación estructural (Ford & Williams, 2007; Klimchouk, 2007).

## **2.3 Espeleología**

La espeleología es una disciplina científica que se enfoca en el estudio y exploración de las cavidades subterráneas, como cuevas y sistemas kársticos. De manera que, esta ciencia combina conocimientos de geología, biología, hidrología y otras áreas para comprender la formación, estructura y biodiversidad de estos entornos. Además de su relevancia científica,

la espeleología también tiene un componente exploratorio y deportivo, ya que implica técnicas de descenso y navegación en condiciones a menudo desafiantes. En este sentido, Villar (2021) evalúa la evolución de las exploraciones espeleológicas, destacando los avances técnicos y científicos que se han logrado a lo largo de más de un siglo.

Por otro lado, en la propuesta de Fernández et al. (2023) se evidencia la importancia de la espeleología en la investigación de la biodiversidad en ambientes subterráneos; en donde, los autores destacan cómo las cuevas y sistemas kársticos albergan especies únicas y altamente especializadas, muchas de las cuales son endémicas y están adaptadas a condiciones extremas de oscuridad y humedad.

### ***2.3.1 Clasificación y tipología de cavidades***

Se presentan los términos de clasificación espeleométrica según la longitud de su desarrollo usada en América Latina, propuesta por Núñez *et al.* (1988) presentados a continuación:

- **Gruta:** Cuando se trata de un salón subterráneo con fauna típica de una cavidad subterránea (murciélagos, opiliones, guácharos, arañas, etc.).
- **Cueva:** Cuando se refiere a una cavidad formada por varios salones y al menos una galería con un desarrollo menor a 1.000 m.
- **Caverna:** Cuando las galerías y salones superen 1.000 m de desarrollo, pero sin exceder los 10.000 m
- **Gran Caverna:** son cuando las galerías y los salones tienen un desarrollo que supera los 10.000 m.

- **Sistema Kárstico:** cuando se trata de zonas con cavidades que pueden o no estar comunicadas en una región kárstica y que poseen una unidad geológica y geomorfológica con un contenido de varias cavidades en su área

**Tabla 1**

*Clasificación morfométrica según la longitud de desarrollo.*

<b>Desarrollo</b>	<b>Clasificación Morfométrica</b>
N/A	Abrigo rocoso
N/A	Gruta
<300 m	Cueva pequeña
300–700 m	Cueva mediana
700–1.000 m	Cueva grande
1.000–4.000 m	Caverna pequeña
4.000–7.000 m	Caverna mediana
7.000–10.000 m	Caverna grande
>10.000 m	Gran caverna

*Nota.* Fuente de Valdivieso (2022).

#### **2.4 Parámetros espeleométricos**

Por otro lado, la espeleometría, como disciplina fundamental dentro de la espeleología, se encarga de la medición y el registro de las dimensiones y características de las cavidades subterráneas. De manera que, este tipo de información es fundamental para la elaboración de mapas precisos, la comprensión de la geomorfología de las cuevas y el análisis de su evolución a lo largo del tiempo. En este sentido, según Valdivieso (2022), los principales parámetros espeleométricos incluyen:

- **Desarrollo:** corresponde a una medida de longitud de la cavidad contando cada brazo y salón.
- **Número de entradas:** entradas por donde un espeleólogo ingresa o sale

- **Máxima extensión horizontal (MEH):** distancia horizontal máxima entre dos puntos.
- **Máxima extensión vertical (MEV):** El desnivel total de una cavidad se refiere a la diferencia en altitud entre su punto más alto y su punto más bajo.
- **Índice de desarrollo (ID):** Corresponde al Desarrollo dividido por la hipotenusa de un triángulo rectángulo que tiene como catetos la *MEV* y la *MEH*. De forma, que para este parámetro se presenta la Ecuación 1 donde se mide el desarrollo de las cavidades subterráneas:

### Ecuación 1

*Índice de desarrollo*

$$\text{Índice de Desarrollo} = \frac{\text{desarrollo (m)}}{\sqrt{MEV^2 + MEH^2(m)}}$$

*Nota.* Fuente de Valdivieso (2022).

Asimismo, para Valdivieso (2022) los valores de índice de desarrollo se pueden clasificar de la siguiente manera:

### Tabla 2

*Clasificación de valores de índice de desarrollo*

Índice de desarrollo	Equivalencia
1.00–1.15	Muy lineal
1.15–1.75	Lineal
1.75–2.50	Medio
2.50–3.00	Sinuosa
>3.00	Muy sinuosa

*Nota.* Fuente de Valdivieso (2022).

- **Volumen:** Se define como un espacio tridimensional de la cavidad medido a través de programas de topografía espeleológica (p.e. Visual Topo).
- **Altura promedio:** Para calcular la altura promedio de una cavidad, se requiere una agrupación de las alturas del recorrido. Por ello, la tabla 3 muestra un ejemplo de la clasificación de la altura promedio de una cavidad:

**Tabla 3**

*Clasificación de altura promedio de una cavidad.*

Medida	Altura
0.0- 1.0	Muy baja
1.0 - 2.0	Baja
2.0 - 5.0	Media
5.0 - 10.0	Alta
>10.0	Muy alta

*Nota.* Fuente de Valdivieso (2022)

- **Ancho promedio:** Consecuentemente, el ancho promedio busca una descripción sucinta de las características del recorrido en cuanto a su anchura, que permita discernir si en su mayoría se puede transitar con libertad o si, por el contrario, los espacios son reducidos. Un ejemplo, se encuentra en la tabla 4:

**Tabla 4***Clasificación de ancho promedio de una cavidad*

Medida	Ancho
0.0- 1.0	Muy angosta
1.0 - 2.0	Angosta
2.0 - 5.0	Media
5.0 - 10.0	Ancha
>10.0	Muy ancha

*Nota.* Fuente de Valdivieso (2022).

- **Coefficiente de verticalidad:** Se define como la máxima extensión vertical ( desnivel total) dividido en la máxima extensión horizontal (Arita, 1996). Está clasificado en la ecuación 3, que dan la clasificación presente en la tabla 6:

**Ecuación 3***Coefficiente de verticalidad*

$$\text{Coef. de Verticalidad} = \frac{MEV (m)}{MEH (m)}$$

*Nota.* Fuente de Valdivieso (2022).**Tabla 5***Clasificación del Coeficiente de verticalidad.*

Coeficiente de Verticalidad	Equivalencia en ángulos	Verticalidad
(0.00 - 0.335)	0 - 18°	Muy horizontal
(0.335 - 0.767)	19° - 37°	Tendencia Horizontal
(0.767 - 1.327)	38° - 52°	Predominio diagonal
(1.327 - 2.991)	53° - 71°	Tendencia Vertical
>2,991	72-90°	Muy vertical

*Nota.* Fuente de Valdivieso (2022).

## **2.5 Aspectos ambientales y de conservación**

- **Situación Hídrica**

Dentro del estudio, los cuerpos de agua se refieren a las características hídricas, como masas de agua lénticas (estancadas) o lólicas (corrientes superficiales y quebradas), ya sean permanentes o temporales, así como también elementos como sumideros, zonas de turbulencia y cascadas (Cardona, 2012, pp. 18–19).

### ***2.5.1 Vulnerabilidad y perturbación:***

#### **Cave Sensitivity Index (CSI)**

Mide la vulnerabilidad intrínseca de la cavidad *Valdivieso (2022)*. Cada una de estas variables se evalúa a través de cuatro criterios que se relacionan con una puntuación de vulnerabilidad en una escala de 0 a 3, donde 3 representa la mayor vulnerabilidad (ver Tabla 7). Para obtener un índice entre 0 y 1, se suman las puntuaciones de todas las variables y se dividen por el triple del número de variables consideradas (Harley *et al.*, 2011).

**Tabla 6***Parámetros para el cálculo del índice de vulnerabilidad de la cavidad CSI.*

Variable	0	1	2	3
Biota	Sin organismos	Pocos individuos de diversas especies	Múltiples individuos de especies individuales	Individuos generalizados de especies individuales; o múltiples individuos de múltiples especies; o listado como especies en peligro de extinción; o posibles nuevas especies encontradas
Hidrología	Sin actividad hídrica	Goteos escasos o localizados, filtraciones, piscinas	Goteo, filtraciones, piscinas en múltiples áreas	Goteo, filtraciones, piscinas por toda la cavidad; o conexión de acuífero directo; o transmisión intermitente
Ornamentación	Sin espeleotemas	Espeleotemas escasos o localizados	Espeleotemas abundantes en algunas áreas	Espeleotemas abundantes por toda la cavidad
Geológica	Sin interés geológico	Escasas ocurrencias de procesos geológicos	De mediano interés para estudios geológicos	De gran interés para estudios geológicos de relevancia nacional
Mineralogía (no incluye espeleotemas)	Sin Mineralizaciones	Recubrimientos minerales escasos o localizados	Recubrimientos minerales en múltiples áreas	Mineralización abundante o posible nuevo mineral encontrado
Paleontología	Sin material paleontológico	Fósiles escasos o localizados	Fósiles en múltiples áreas	Fósiles generalizados por toda la cavidad o hallazgos de relevancia paleontológica
Cultural/ histórico	Sin material cultural	Características culturales escasas o localizadas	Características culturales en múltiples áreas	Cueva listada como sitio protegido por el Instituto Colombiano de Antropología e Historia ICANH.

*Nota.* Harley et al., 2011. Traducido y modificado por Valdivieso (2022)

Por otro lado, el resultado de este cálculo se compara con la siguiente tabla:

**Tabla 7**

Clasificación de vulnerabilidad de una cavidad.

<b>Puntaje</b>	<b>Grado de Vulnerabilidad</b>
0.81-1.00	Vulnerabilidad crítica
0.71-0.80	Vulnerabilidad severa
0.61-0.70	Considerablemente vulnerable
0.51-0.60	Vulnerable
0.40-0.50	Moderadamente vulnerable
0.20-0.39	Levemente vulnerable
0.00-0.19	No vulnerable

*Nota.* Harley *et al.*, 2011. Traducido y modificado por Valdivieso (2022)

### 3. Marco Geológico

La región kárstica del municipio de Sucre, Santander, se ubica dentro de la Cordillera Oriental, la cual presenta una deformación significativa, caracterizada por fallas y plegamientos generados por inversión tectónica durante el Cenozoico, con orientaciones predominantes noreste-suroeste (NE-SW) y norte-sur (N-S) (Kellogg et al., 1995; Taboada et al., 2000). Un ejemplo destacado de estas estructuras es la falla de cabalgamiento 'La Salina', a 15-20 km al oeste de la zona de estudio. Esta falla evidencia la intensa actividad compresiva que ha modelado la región. Además, la zona se ve influenciada por estructuras regionales como los anticlinales de Sabanagrande, La Granja y Florián, y los sinclinales de La Belleza, Pradera y Sabanagrande (Ulloa y Rodríguez, 1979) (Figura 1).

Las unidades litoestratigráficas principales, son las formaciones Arcabuco, Cumbre, Rosa Blanca y Paja, de origen marino del Cretácico Inferior, destacando la Formación Rosa Blanca como responsable de la karstificación del área de estudio.

**Formación Arcabuco (Kiar):** Es la unidad más antigua, del Jurásico Tardío al Cretácico Temprano, La unidad ha sido correlacionada con la Formación Los Santos aflorante en la Mesa de los Santos (Gómez et al., 2008). Representada por areniscas de cuarzo con feldespatos, líticos e intraclastos que infrayacen discordantemente a estratos de edad Barriasana Valanginiana, pertenecientes a la Formación Cumbre (Ulloa y Rodríguez, 1979).

**Formación Cumbre (Kic):** Renzoni et al. (1969) propusieron el nombre y rango de esta unidad. En el área de estudio aflora en forma lenticular en el núcleo del Anticlinal de Sabanagrande, donde se presenta en contacto discordante con la Formación Arcabuco, y está compuesta por areniscas cuarzosas, gris claras, con intercalaciones de lutitas negras, cuyo espesor total varía entre 10 y 30 m.

**Formación Rosa Blanca (Kir):**

Esta unidad fue definida por Morales et al. (1958). Se trata de la unidad litoestratigráfica de mayor extensión en la zona de estudio, caracterizada por la presencia de geoformas kársticas. Esta formación se compone de una secuencia estratigráfica que varía desde calizas, yeso y oolitos con ostrácodos y dolomías en su base, hasta areniscas y lodolitas calcáreas con depósitos evaporíticos en la parte superior, indicando un ambiente depositacional que evolucionó de condiciones de alta salinidad y aguas tranquilas a un ambiente marino somero (Royero & Clavijo, 2001), con un espesor que varía entre 400 a 500m.

La edad de la Formación Rosa Blanca ha sido objeto de debate, con propuestas que abarcan desde el Valanginiano hasta el Hauteriviano inferior (Etayo, 1968; Rodríguez, 1985; Bürgl, 1954). Julivert (1968) sugiere que la formación es oblicua respecto a las líneas isócronas, con una edad que varía desde el Barremiano en el norte hasta el Valanginiano en el sur, lo que concuerda con la variación en su espesor. La formación presenta contactos concordantes con la Formación Cumbre y discordantes con la Formación Arcabuco en algunas áreas (Julivert, 1968).

**Formación Paja (Kip):**

Definida originalmente por Wheeler (Morales et al., 1958), es una secuencia sedimentaria que abarca desde el Hauteriviano hasta el Aptiano tardío (Etayo-Serna, 1968). Se compone predominantemente de lutitas piríticas y micáceas de color gris oscuro a negro, dispuestas en capas delgadas con estratificación plana paralela a discontinua, y presenta concreciones arenosas ligeramente calcáreas con amonitas. La unidad se caracteriza en la

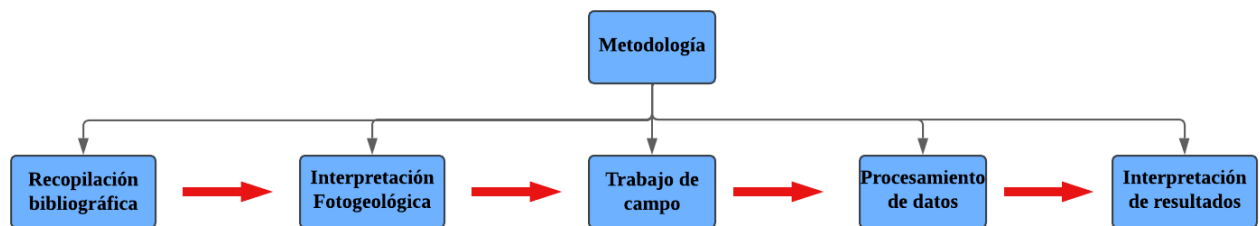
zona por una variación litológica, con intercalaciones de micritas negras y lodolitas en la parte inferior, y lutitas finamente laminadas con nódulos de pirita en la parte superior.

#### 4. Metodología

Esta investigación se desarrolló en cinco etapas, las cuales se presentan en la Figura 7. Durante estas etapas, se realizó la búsqueda y selección del material bibliográfico, se interpretaron los datos fotogeológicos y se llevó a cabo el trabajo de campo. Cada una de las etapas incluyó el correspondiente procesamiento de datos. Posteriormente, se efectuó la interpretación de la información obtenida, lo que permitió elaborar la descripción y discusión de los resultados, y en conjunto dar lugar a la entrega del informe final.

**Figura 7**

*Metodología general*



##### 4.1 Recopilación bibliográfica:

La primera etapa metodológica se centró en la recopilación del material bibliográfico relevante para la investigación. Este proceso incluyó la búsqueda y selección de artículos científicos, libros especializados, tesis de grado y posgrado, informes técnicos y cartografía geológica preexistente. Se hizo énfasis en literatura que abordara la geología estructural de la región de Santander y áreas adyacentes, los procesos de karstificación en ambientes similares, las metodologías de cartografía geológica, las técnicas de análisis de deformación y tensores de esfuerzo, así como estudios espeleológicos y el uso de sensores remotos en geología. El objetivo principal de esta etapa fue establecer una base teórica y comprender el

contexto geológico regional, lo que permitió orientar de manera informada las fases posteriores de la investigación.

Los códigos catastrales usados para las cuevas aquí descritas fueron tomados del Catastro Espeleológico Colombiano administrado por la Asociación Espeleológica Colombiana ESPELEOCOL.

#### **4.2 Interpretación fotogeológica:**

La segunda etapa se dedicó a la interpretación y análisis de imágenes de sensores remotos. Se adquirieron y procesaron imágenes satelitales de alta resolución espacial y espectral, así como Modelos Digitales de Elevación (DEM) del área de estudio.

Con estos insumos, se procedió a realizar la integración de la información en un SIG, con el fin de identificar los lineamientos y geoformas. Para la identificación de los lineamientos regionales y locales, se aplicó la metodología propuesta por Mabee et al. (1994), la cual consistió en comparar las interpretaciones de los lineamientos realizadas por el autor, el director y el codirector del trabajo de grado, conservando los trazos coincidentes. Para este proceso, se empleó el programa FracPaQ.

#### **4.3 Trabajo de campo**

Esta fase se dividió en tres campañas de campo. La primera se centró en el reconocimiento y delimitación de la zona de estudio, definiendo una ruta de trabajo para las campañas posteriores. Posteriormente, se llevó a cabo la segunda campaña, la cual consistió en la cartografía a partir de transectas, cubriendo la zona de estudio con el propósito de observar el comportamiento litológico y estructural. En esta etapa, se visitaron los afloramientos accesibles del área con el fin de registrar datos estructurales (planos de

estratificación, diaclasas, venas y clivaje) y litológicos. Finalmente, en la tercera campaña se realizó el levantamiento espeleométrico de las cavidades presentes en el área de estudio, localizando y registrando aquellas cuevas cuyas condiciones de accesibilidad permitieron su cartografiado. Para este levantamiento se emplearon dos brújulas (para medir rumbo y contrarumbo) y un distanciómetro.

#### ***4.3.1 Medición de datos estructurales***

Estratificación: Para la toma de datos de estratificación, se registró la orientación de los planos del estrato mediante la medición del rumbo y el buzamiento con la brújula Brunton Geo. Además, se documentaron las variaciones en la inclinación, así como las posibles estructuras sedimentarias asociadas. Estos datos permitieron caracterizar la geometría y disposición de los estratos en el afloramiento.

Durante la adquisición de los datos, se aplicó una corrección por declinación magnética de  $7^\circ$ . Esta corrección se incorporó en las mediciones con el fin de ajustar las lecturas al norte geográfico verdadero, asegurando así la precisión y confiabilidad de los datos estructurales obtenidos. De esta manera, las orientaciones registradas reflejan de forma exacta la disposición real de las estructuras medidas en campo.

#### **Diaclasas**

Para la toma de datos de diaclasas, se agruparon por familias para realizar las respectivas mediciones utilizando la brújula Brunton Geo. En los planos se midieron el rumbo y el buzamiento, y se registraron observaciones sobre las características de estas fracturas.

#### **Clivaje y venas**

Para la toma de datos de clivaje y venas, se midieron el rumbo y el buzamiento en distintos puntos del afloramiento, con el fin de evaluar las variaciones espaciales presentes en los datos.

#### **4.3.2 Medición de datos espeleométricos:**

La metodología para la medición de datos espeleométricos siguió un enfoque basado en coordenadas polares y estaciones de referencia dentro de la caverna. A continuación, los pasos esenciales:

- **Georreferenciación de la entrada**

Para iniciar el levantamiento cartográfico de la cueva, se estableció un "punto cero" (O) en la entrada de la cavidad. Este punto se georreferencia utilizando un GPS para registrar sus coordenadas geográficas (latitud, longitud y altitud). Además, se marcó físicamente en el sitio con algún distintivo visible que facilite su identificación en futuras mediciones.

Las coordenadas obtenidas fueron posteriormente convertidas al sistema de coordenadas UTM, zona 18N, con el fin de mantener la compatibilidad con los programas empleados para el procesamiento y representación cartográfica de los datos espeleométricos.

- **Ubicación y establecimiento de estaciones de referencia**

Dentro de la cueva, se seleccionan puntos estratégicos denominados estaciones de referencia. Estas estaciones se ubicaron en lugares que permitieron la continuidad del levantamiento topográfico y se dispusieron de manera que cada una fuera visible desde la anterior y la siguiente. Para mantener un orden lógico en la medición, las estaciones se

identificaron con números o letras, asegurando que la progresión del mapeo fue clara y estructurada.

- **Medición de trayectorias subterráneas:**

Desde cada estación de referencia se registran tres parámetros fundamentales hacia la siguiente estación: la distancia, el rumbo y la inclinación. La distancia se mide con un distanciómetro láser para garantizar precisión. El rumbo se determina con una brújula. Finalmente, la inclinación se mide en grados, con un clinómetro, para identificar si el pasaje de la cueva asciende, desciende o se mantiene horizontal entre estaciones.

- **Caracterización geométrica del pasaje:**

En cada estación se realiza la medición de la altura y el ancho del pasaje, con el fin de caracterizar la morfología de la cueva. Además, se registró elementos relevantes como la presencia de estratificaciones, venas, cuerpos de agua, desniveles o cualquier otro rasgo geológico significativo. Estos datos permitieron complementar la representación gráfica y mejorar la interpretación del entorno subterráneo.

#### **4.4 Procesamiento de datos**

Los datos recopilados en campo, tanto los datos estructurales (estratificación, diaclasas, venas y clivaje) y los espeleométricos (distancia, rumbo, inclinación, etc...) fueron procesados en distintos programas según su origen:

##### **4.4.1 Georose**

Por medio de este software se validaron los datos medidos en campo de los planos de diaclasas, venas, clivaje y estratificación. A partir del procesamiento de los datos ingresados se generaron los diagramas rosas que permitieron observar las

variaciones de la orientación de los sistemas de fracturas a analizar, por medio del cual se pudo determinar las orientaciones preferenciales de los patrones de fractura de la zona de estudio.

#### **4.4.2 *WinTensor***

Para determinar el tensor de esfuerzos, se procesaron en el software WinTensor los datos de campo de estructuras planares como fracturas y planos de falla. WinTensor utiliza dos métodos principales: Diedros Rectos, un método gráfico inicial para estimar el tensor, y Optimización Rotacional, que refina esta estimación mediante iteraciones para obtener un tensor más preciso y confiable (Delvaux & Sperner, 2003). El software entregó como resultados el tensor de esfuerzos, el régimen de esfuerzos y el círculo de Mohr. A partir del modelo tensorial de Angelier (1994), se cuantificaron las relaciones entre los esfuerzos principales mediante los índices R y R', que expresan la proporción relativa entre las magnitudes de  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$ . Este análisis permitió caracterizar el campo de esfuerzos del área de La Granja y comprender su influencia en el desarrollo del sistema kárstico, relacionando la geología estructural con la formación del karst, objetivo central de esta investigación.

#### **4.4.3 *Stereonet***

A partir del procesamiento de los datos medidos en la etapa de campo, (diacclasas, clivaje, venas y estratificación) en este software se generaron los diagramas de densidad de polos, que permitieron determinar la inclinación de los planos.

#### ***4.4.4 Visual Topo***

Para el análisis espeleométrico de las cuevas, se empleó el software VisualTopo. Este programa se utilizó para procesar los datos de levantamientos topográficos subterráneos realizados en campo. VisualTopo permitió corregir errores, calcular coordenadas, y generar representaciones cartográficas detalladas de las cuevas, incluyendo planos, perfiles y modelos 3D. Dado que VisualTopo trabaja de forma más eficiente con coordenadas proyectadas, toda la cartografía espeleológica se generó en el sistema de coordenadas UTM, zona 18N, lo que garantizó la compatibilidad del formato de exportación y la correcta integración de los datos dentro del software. Adicionalmente, el software facilitó el cálculo de parámetros espeleométricos clave, como longitud y profundidad, necesarios para la clasificación y caracterización de las cuevas.

#### ***4.4.5 FracPaQ***

FracPaQ es una caja de herramientas de código abierto escrita en MATLAB™ y disponible públicamente en GitHub y Mathworks FileExchange. Está diseñado para cuantificar patrones de fractura en roca a diferentes escalas. A partir de cualquier tipo de entrada, el código calcula las longitudes de fractura, los ángulos y la conectividad. Estos se muestran como mapas y gráficos. Los estimados de intensidad y densidad de fractura en 2D se hacen utilizando un modelo de placa 39 paralela simple y asumiendo una apertura constante (Healy et al., 2017).

Los diagramas de rosa de lineamientos y las cuevas siguiendo la metodología de Pedrera et al. (2015) para la descomposición de conductos y fracturas en segmentos, permitieron comparar la direccionalidad de los conductos de las cuevas con las tendencias de

los lineamientos, estructuras geológicas y patrones de drenaje. Además, el software utilizado representa estos datos mediante histogramas de frecuencia para las longitudes de traza y segmentos, calculando un valor promedio para la longitud de los segmentos. Esta metodología fue aplicada en este trabajo para el análisis de las cuevas cartografiadas y ver su relación con las estructuras geológicas presentes, así como con el tensor de esfuerzos.

#### **4.5 Interpretación y análisis de los resultados**

Posterior al procesamiento de los datos se procedió a analizar e integrar los resultados obtenidos en este proyecto de investigación, para luego redactar el informe final.

## 5. Resultados

A continuación, se muestran los resultados de las estructuras geológicas y desarrollo kárstico en el corregimiento de La Granja, Sucre, Santander

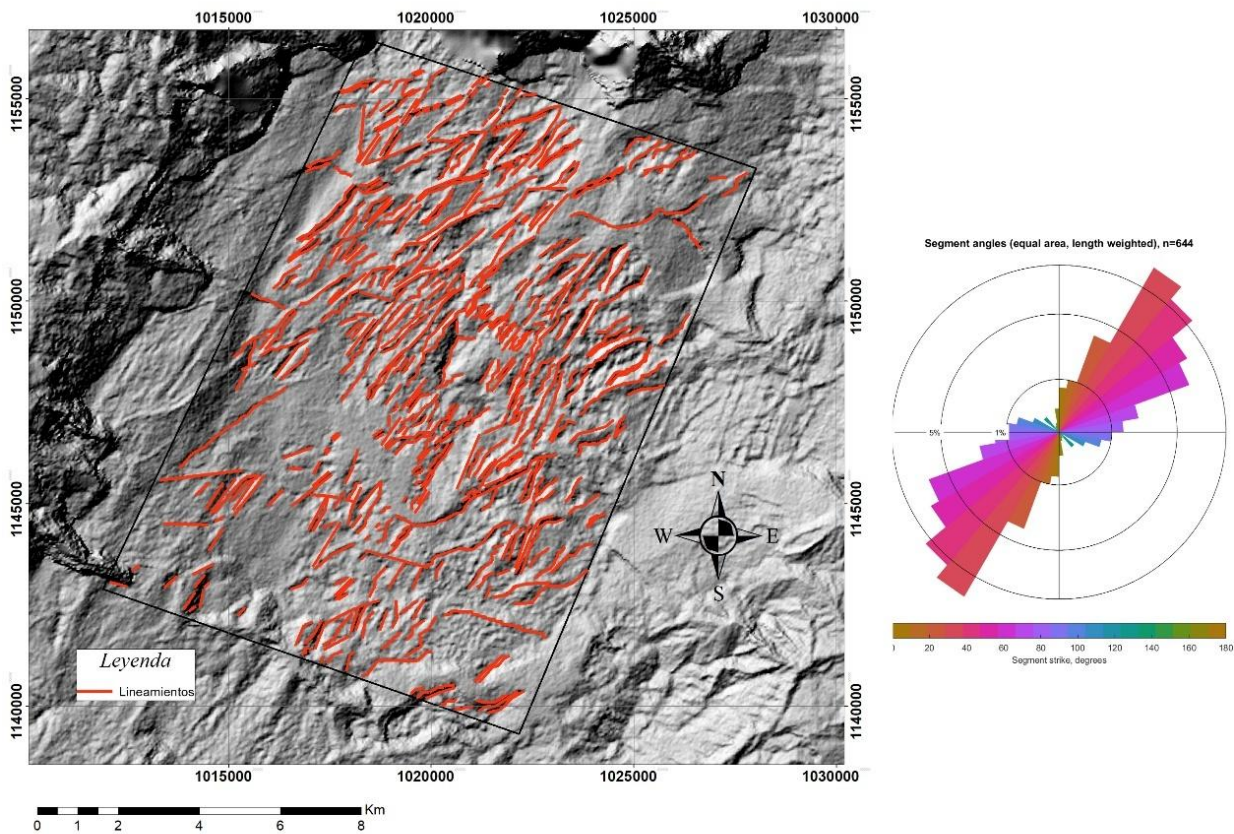
### 5.1 Estructuras geológicas (Deformación).

#### 5.1.1 Lineamientos

A partir del modelo digital de terreno se realizó el trazado de los lineamientos presentes en la zona de estudio (Figura 8). Se obtuvo un diagrama rosa que evidencia una tendencia predominante NE-SW, con rumbos comprendidos entre  $30^\circ$  y  $70^\circ$ , lo que confirma la continuidad estructural longitudinal respecto del eje de la Cordillera Oriental.

### Figura 8

*Interpretación de lineamientos y diagrama de rosas*



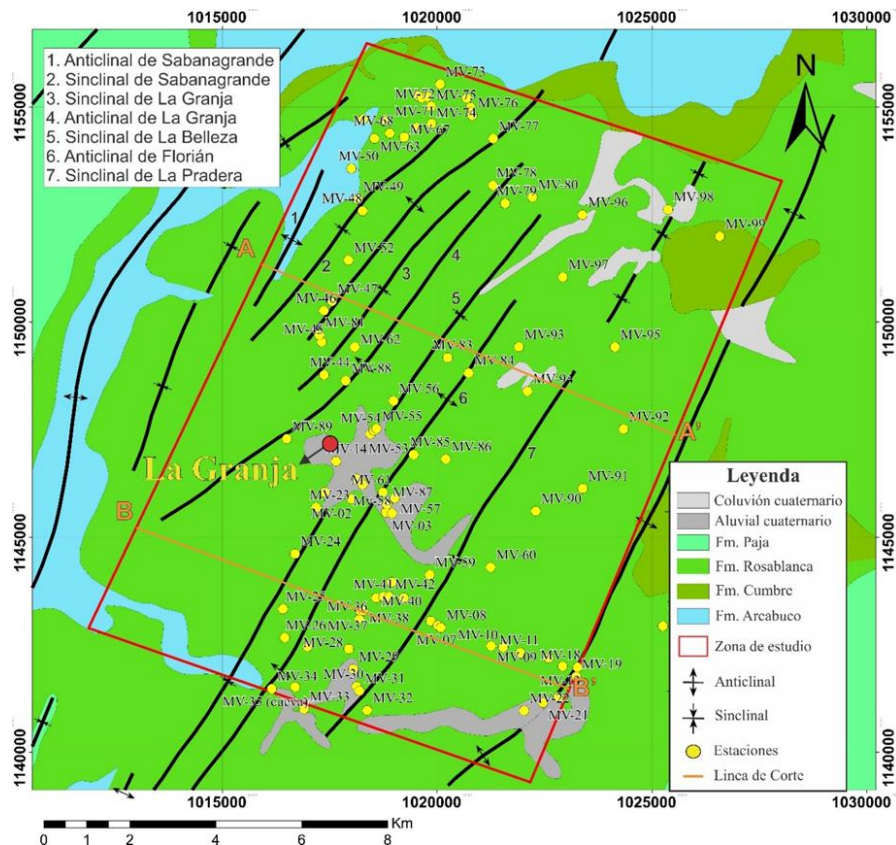
### 5.1.2 Estratificación

Con un total de 99 estaciones de campo (Figura 9), se evidenció que el karst de La Granja se desarrolla sobre una secuencia cretácica dominada por pliegues con tendencia N30E, que regionalmente definen el Anticlinorio de Los Yariguíes afectando a la Formación Rosa Blanca en la zona. El diagrama rosa (Figura 10A) muestra una tendencia principal de 30°-40° de la estratificación, la misma la tendencia longitudinal de los pliegues, mientras que con, el diagrama de densidad de polos se evidencia que los planos de estratificación tienden a ser horizontales a subhorizontales, lo cual indica que los pliegues son abiertos a suaves (Figura 11).

#### Figura 9

Mapa geológico de la zona de estudio en el corregimiento de La Granja (Sucre).

Localización de los cortes geológicos (Figura 11)



A continuación, se hace una descripción de las estructuras regionales y menores que hacen parte de la zona:

Anticlinal de Sabanagrande: esta estructura tiene un rumbo de N20E. Se trata de un pliegue abierto con un plano axial vertical. Aflora la unidad más antigua en su núcleo (Formación Arcabuco) y la Formación Cumbre se acuña hacia la charnela (Figura 11)

Sinclinal de la Belleza: ésta estructura se encuentra ubicada en medio de los anticlinales y La Granja y Florián, comparte con ellos la orientación N30E. Se trata de una estructura suave con un plano axial vertical.

Anticlinal de Florián: Estructura regional de gran continuidad, que comparte la tendencia general N30E observada en el área (Figura 11). Según la apertura de sus flancos, corresponde a un pliegue suave con plano axial vertical.

Las estructuras menores presentan la misma orientación preferencial con dirección N20E N30E de las estructuras regionales mencionadas. Según la apertura de sus flancos se tratan de estructuras suaves.

Figura 10

Diagrama de Rosas y proyección de densidad de polos de (A) planos de estratificación, (B) diaclasas, (C) venas y (D) clivaje.

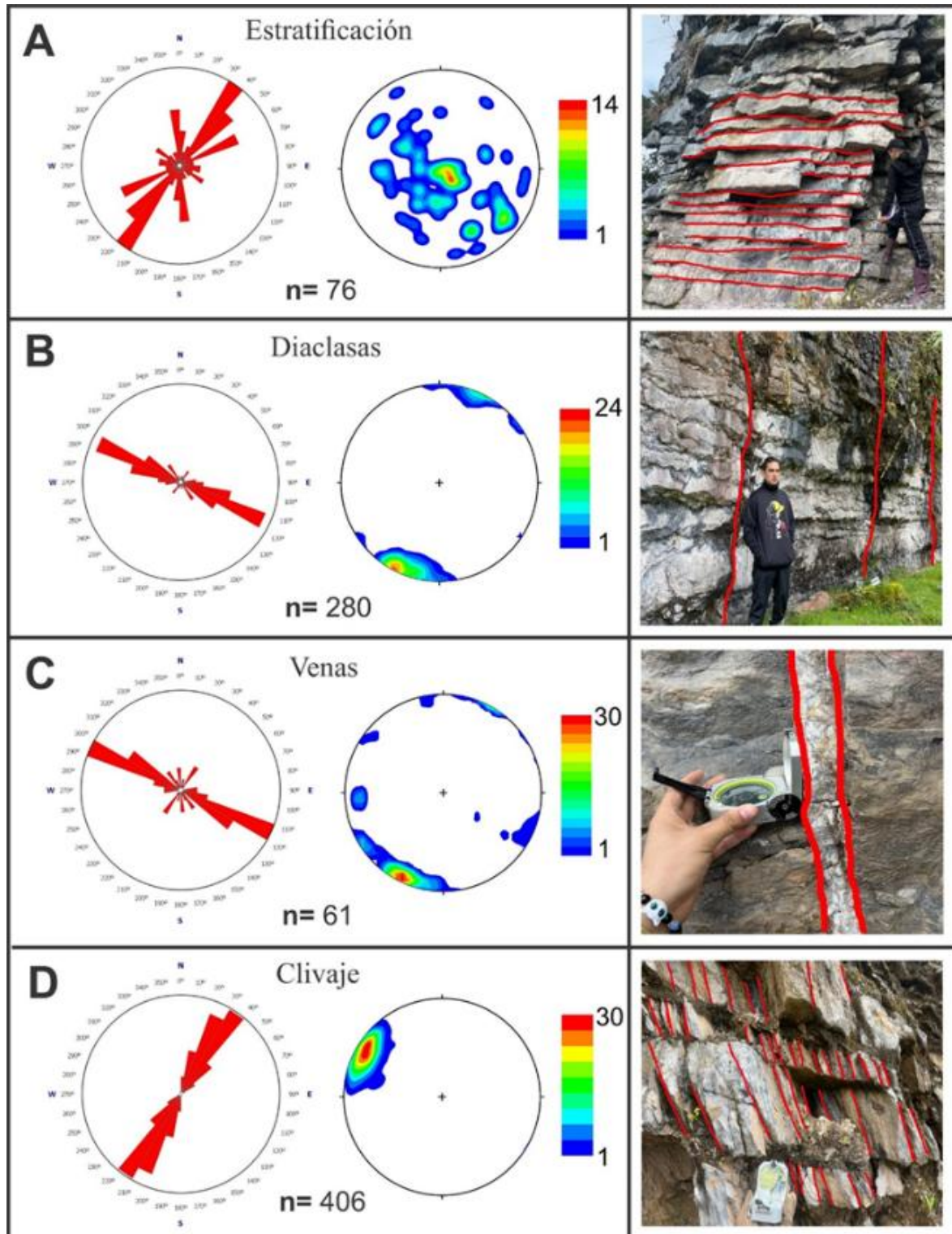
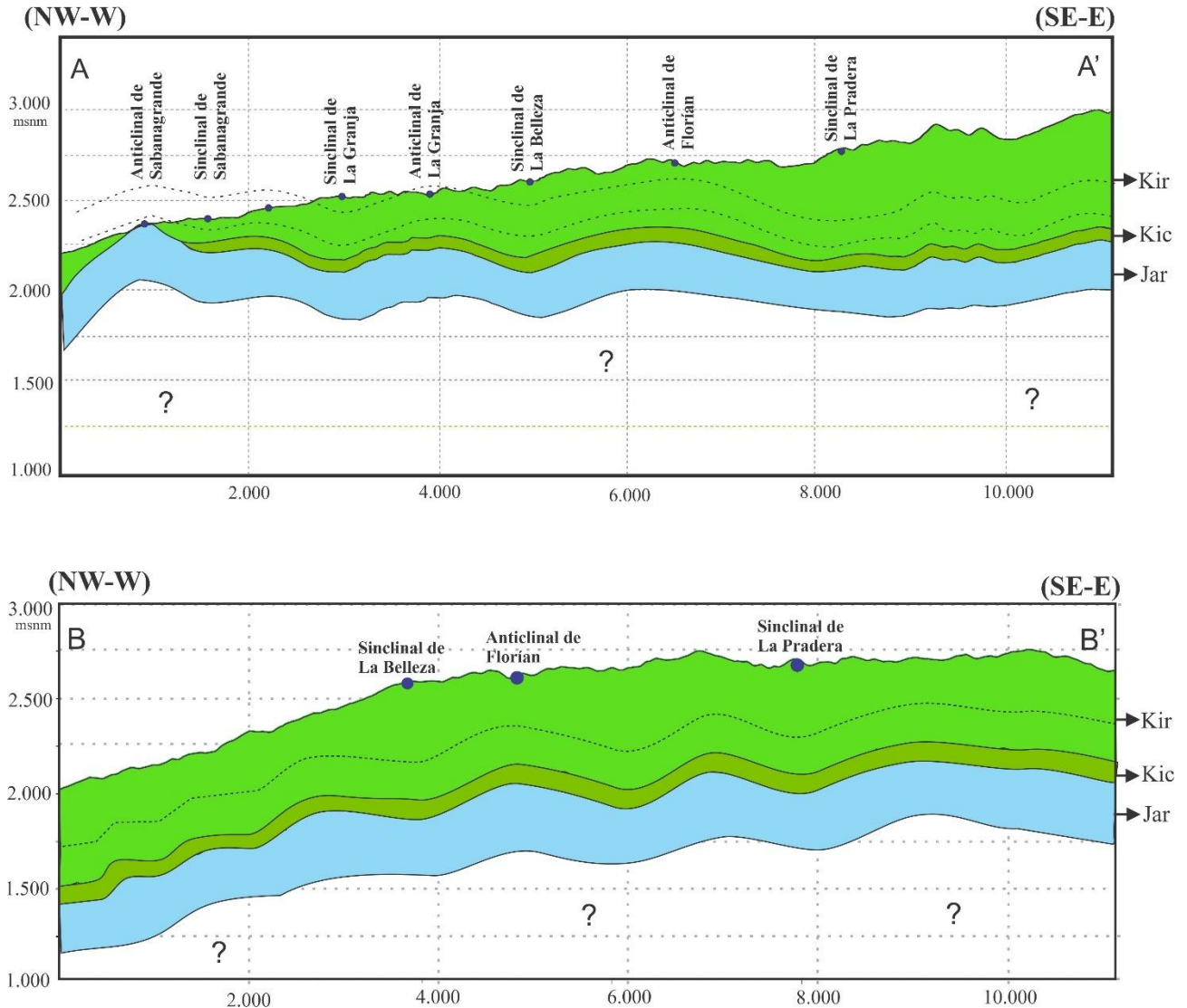


Figura 11

Cortes Geológicos (A-A', B-B')



*Nota.* Los cortes A-A' y B-B' permiten visualizar la disposición estructural del área de estudio. Se observa la sucesión de las formaciones Arcabuco, Cumbre y Rosa Blanca, plegadas definiendo el anticlinorio de rumbo NE-SW.

### 5.1.3 *Diaclasas*

Se procesaron 280 planos de diaclasas, los cuales fueron clasificados conforme a la clasificación descrita en Singhal y Gupta (2010), en la que se distinguen las diaclasas de acuerdo con su disposición respecto al eje de un pliegue en longitudinales, transversales y oblicuas. El diagrama rosa (Figura 10B) muestra una dirección principal de  $110^{\circ}$ - $130^{\circ}$  relacionado con fracturas transversales de dirección NW-SE, perpendiculares a los ejes de los pliegues. A partir del diagrama de densidad de polos se puede establecer que los planos de diaclasa tienen una inclinación vertical a subvertical.

### 5.1.4 *Venas*

El diagrama rosa (Figura 10C) exhibe una dirección preferencial  $110^{\circ}$ - $120^{\circ}$  relacionado con las fracturas de tensión descritas anteriormente. Los planos de venas presentan una inclinación vertical a subvertical según lo observado en el diagrama de densidad de polos. También se pudo apreciar venas de calcita que cortan verticalmente las capas de calizas (Figura 12) que componen la formación Rosa Blanca. El espesor de estas venas va desde 10 mm a 60 mm.

**Figura 12**

*Venas*



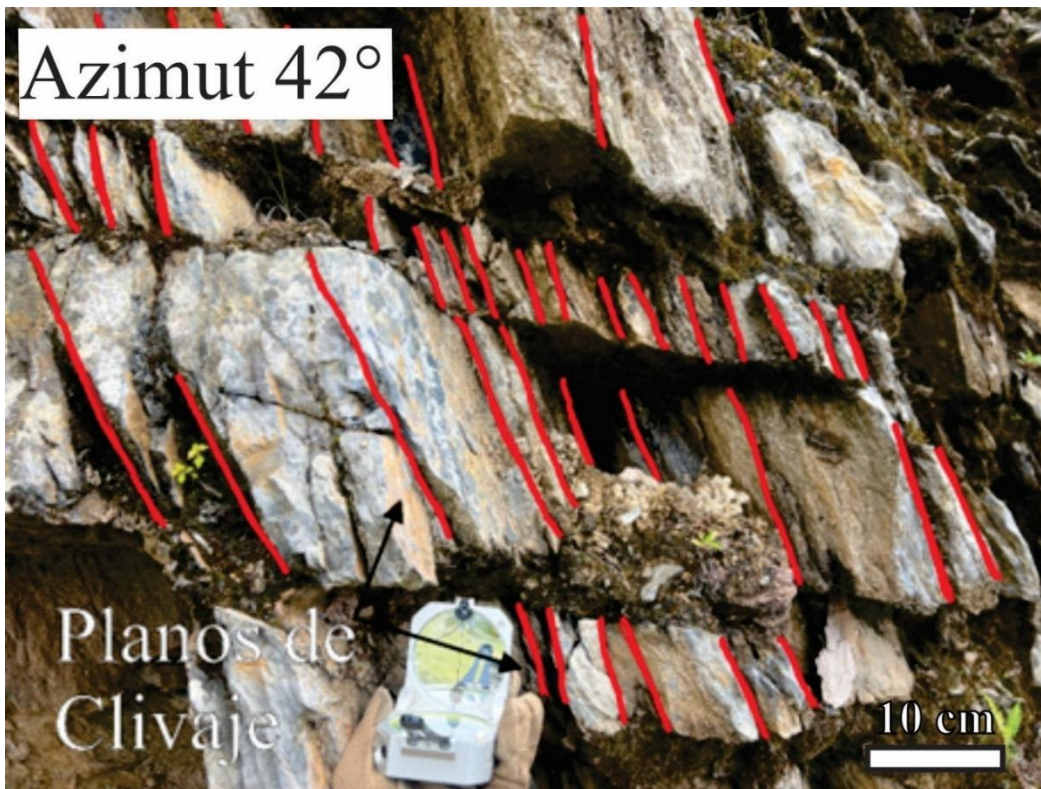
*Nota.* Vena de calcita de 30 mm de espesor cortando una capa de caliza.

### 5.1.5 Clivaje

Las rocas de la Formación Rosa Blanca presentan una foliación secundaria conocida como clivaje (Figura 13), caracterizada por planos penetrativos y repetitivos dispuestos casi perpendiculares a la estratificación. Durante el trabajo de campo se observó que estas discontinuidades permiten el paso directo del agua en algunos afloramientos, lo que evidencia su papel como vías preferenciales de flujo dentro sistema kárstico. El análisis de 406 planos de clivaje mostró una tendencia principal entre  $20^\circ$  y  $40^\circ$  (Figura 10D), mientras que el diagrama de densidad de polos indica un buzamiento predominantemente vertical, coherente con los patrones estructurales regionales.

**Figura 13**

*Clivaje*



## 5.2 Análisis cinemático

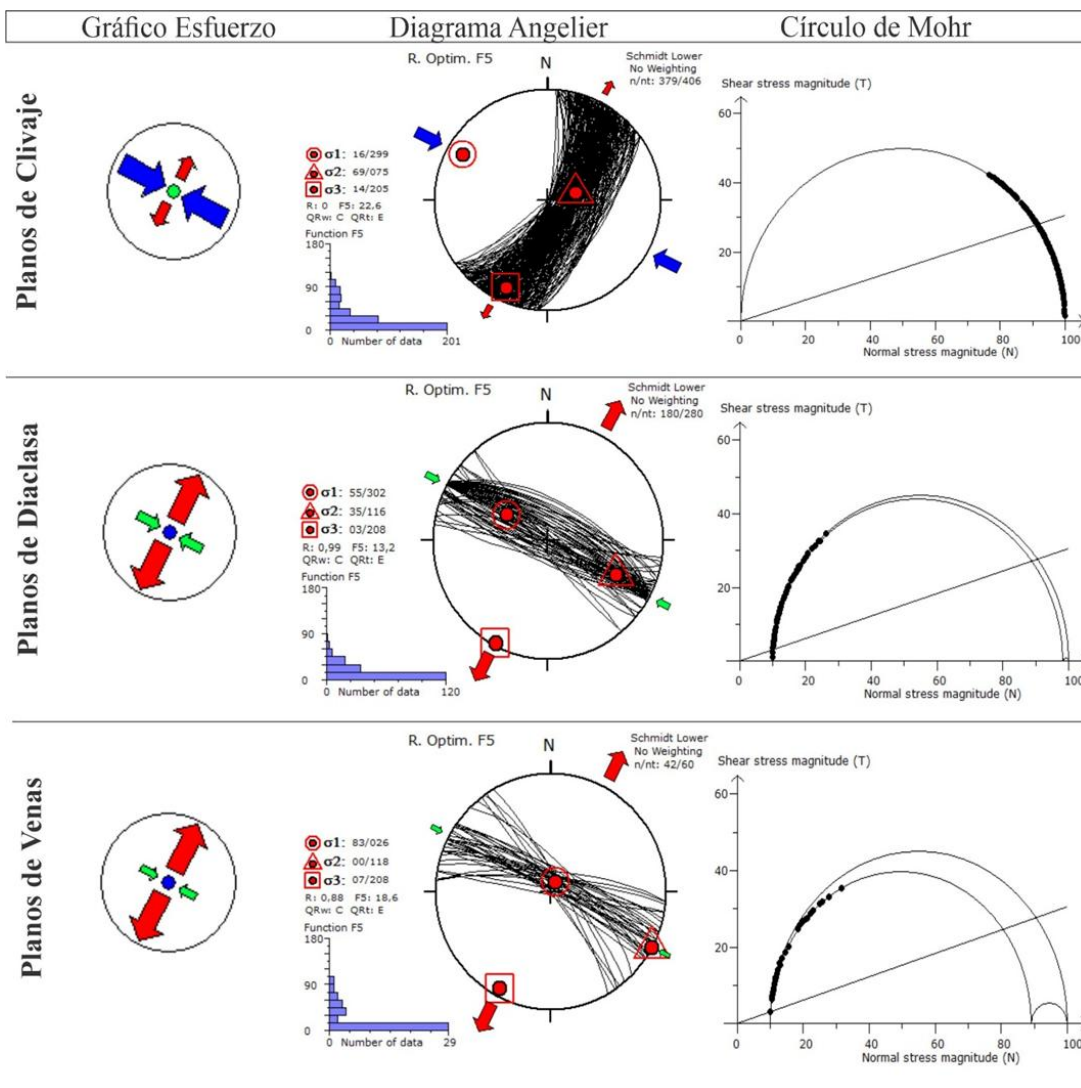
A partir de los datos estructurales obtenidos en campo (véanse Tablas A2–A4 en el Anexo A), incluyendo mediciones de diaclasas, venas y clivaje—, y considerando el análisis poblacional de los planos, se realizó el procesamiento de la información mediante el software WinTensor 5.9.3. Esta herramienta permitió discriminar los planos correspondientes a estructuras neformadas y reactivados respecto de los preexistentes. A partir de dicho análisis, se determinó un tensor de esfuerzos regional con una orientación compresiva principal ( $\sigma_1$ ) de  $118^\circ$ , correspondiente a un campo de esfuerzos NW–SE, el cual explica la disposición y orientación de las principales estructuras reconocidas en el área del corregimiento de La Granja y sus alrededores. Asimismo, se obtuvieron los diagramas de Angelier y los círculos de Mohr, y se cuantificaron las relaciones entre esfuerzos principales ( $R$  y  $R'$ ).

Para obtener con distintos indicadores el tensor de esfuerzo se procesaron por separado 406 conjuntos de datos de clivaje, 280 diaclasas y 60 planos de venas, los cuales fueron tratados por medio de WinTensor con su procesamiento inicial en diedros rectos y su subsecuente tratamiento por medio del método de optimización rotacional. Los tensores resultantes se presentan en la Figura 14 y Tabla 8. Los resultados de un tensor de esfuerzos a  $118^\circ$ , muestra excelente coherencia ya que resulta del procesamiento de los tres tipos de indicadores cinemáticos (clivaje, diaclasas y venas). El tensor de esfuerzos, calculado con base en los planos de clivaje, indica un régimen de esfuerzos de transurrencia a pesar de ser completamente perpendicular a la tendencia principal de los planos, por lo cual se asume influencia de la cizalla simple de los planos orientados más NE, los cuales tendrían una cinemática dextral. Este tensor de  $118^\circ$ , resultó concordante con la orientación preferencial

de los planos de diaclasas (entre  $110^\circ$  y  $120^\circ$ ), lo que permite inferir que corresponden a fracturas de tensión. Esta orientación coincide con la tendencia principal observada en las venas y tiende a ser perpendicular a la dirección preferencial del clivaje, lo que sugiere un control estructural coherente con un campo de esfuerzos compresivo NW–SE en la zona de estudio.

**Figura 14**

*Tensores de esfuerzo obtenido a partir de planos de Clivaje, Diaclasas y venas.*



Nota: Proyecciones estereográficas, estadísticas y Círculo de Morh con los planos procesados por el Software Wintensor. Ejes de tensores principales  $\sigma_1$  (Círculo),  $\sigma_2$  (Triángulo),  $\sigma_3$  (Cuadrado).

**Tabla 8**

*Síntesis de los resultados del procesamiento de los planos por: clivaje, diaclasas y venas*

Datos	Método	n	N	Ejes esfuerzos			$\alpha$	F5	R	R'	Shmax	QRt	Mapa Mundial Esfuerzos	Régimen de Esfuerzo
				$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$								
Planos de clivaje	R.Óptimo	379	406	16/299	69/075	14/205	12,3	22,6	0	2	118	E	SS	Transcurrencia pura
Planos de diaclasas	R.Óptimo	180	280	55/302	35/116	03/208	7,2	9,5	0,99	0,99	118	E	NF	Distensión pura
Planos de venas	R.Óptimo	42	60	83/026	00/118	07/208	4,5	18,6	0,88	0,88	118	E	NF	Distensión pura

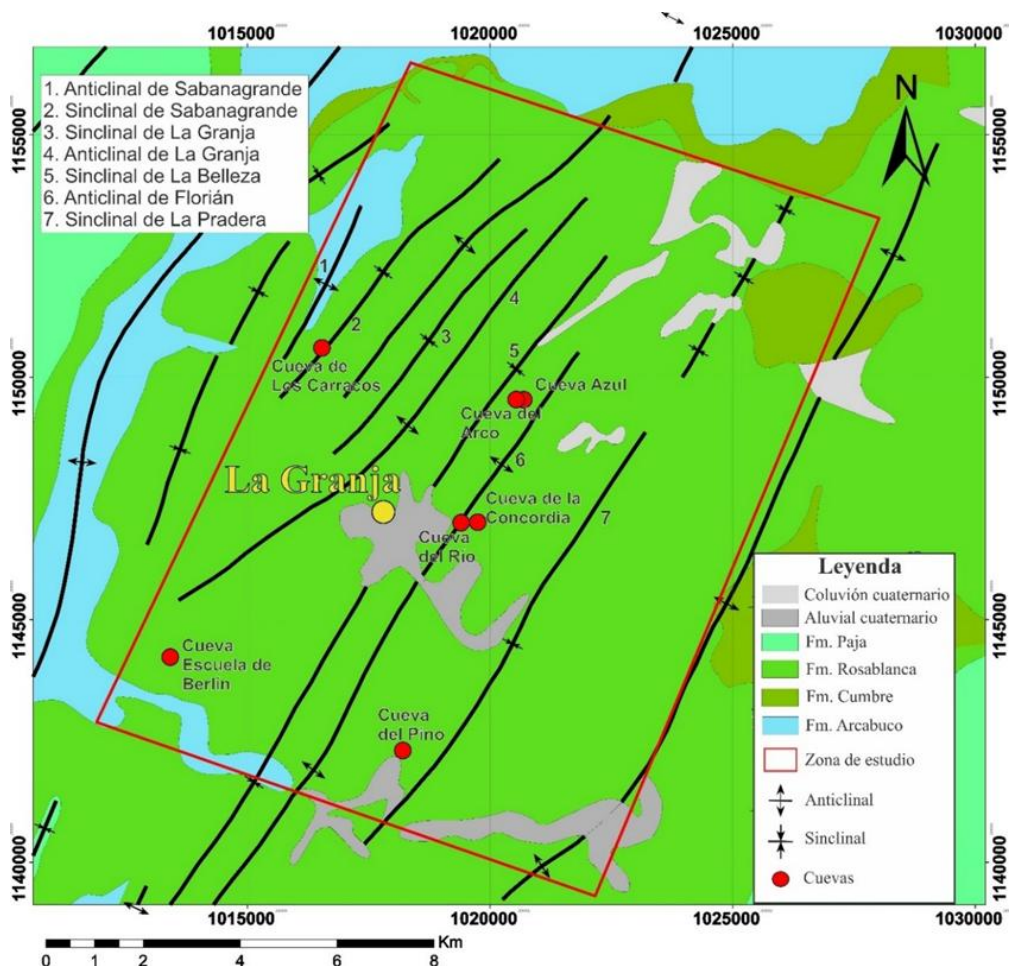
*Nota.* N) Número de datos iniciales. (n) Número de datos después del procesamiento. (F5) principal valor de la función de optimización. ( $\alpha$ ) Angulo entre la dirección de cizalla observada y modelada. (R) Radio de la diferencia los esfuerzos principales. (R') Índice de régimen de esfuerzo. (Shmax) Máximo esfuerzo horizontal. (QRt) Calidad del tensor.

### 5.3 Cartografía de Cuevas.

El área de estudio representa una zona poco explorada en cuanto a investigaciones relacionadas con el karst y las cavidades subterráneas. En el marco de este trabajo se cartografiaron un total de siete cuevas, cuya ubicación se muestra en el mapa geológico para hacer notar su relación con los pliegues cartografiados (Figura 15). Es importante destacar el valor de estos resultados como base para futuras investigaciones espeleológicas, ya que el sector presenta un alto potencial para el descubrimiento de nuevas cavidades aún no registradas ni cartografiadas.

**Figura 15**

*Ubicación de las cuevas cartografiada*

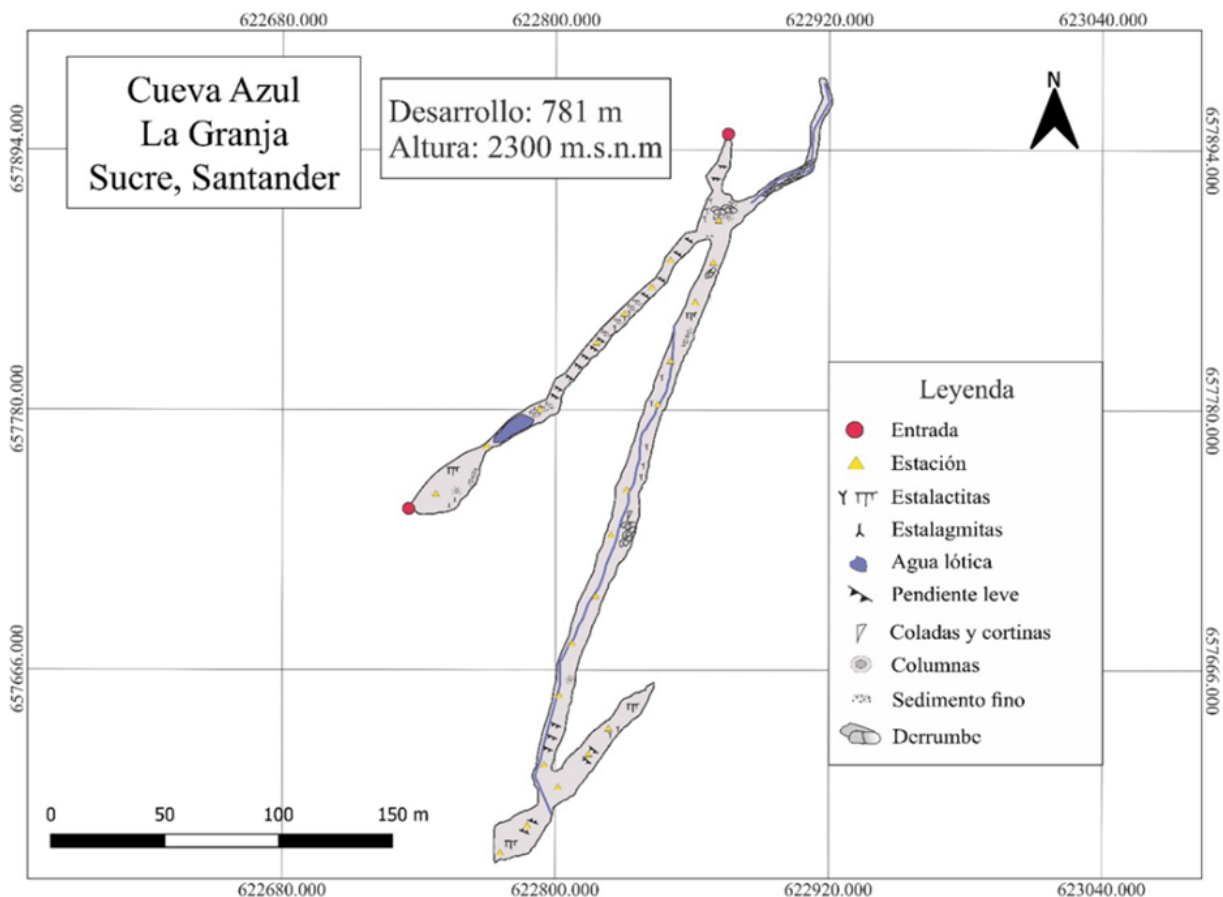


### 5.3.1 Cueva Azul (San-80-0790)

Cueva Azul, presenta un desarrollo total de 781 m y una altitud aproximada de 2.300 m.s.n.m (Figura 16). Su trazado principal muestra una dirección preferencial NE–SW, concordante con la orientación dominante de los pliegues, lo que sugiere un control estructural directo sobre el desarrollo de la cavidad. En su interior se identifican zonas con coladas, cortinas y columnas, así como presencia de agua lótica y depósitos de sedimentos finos, evidenciando una evolución activa del sistema kárstico bajo condiciones de disolución y escurrimiento subterráneo (Figura 17).

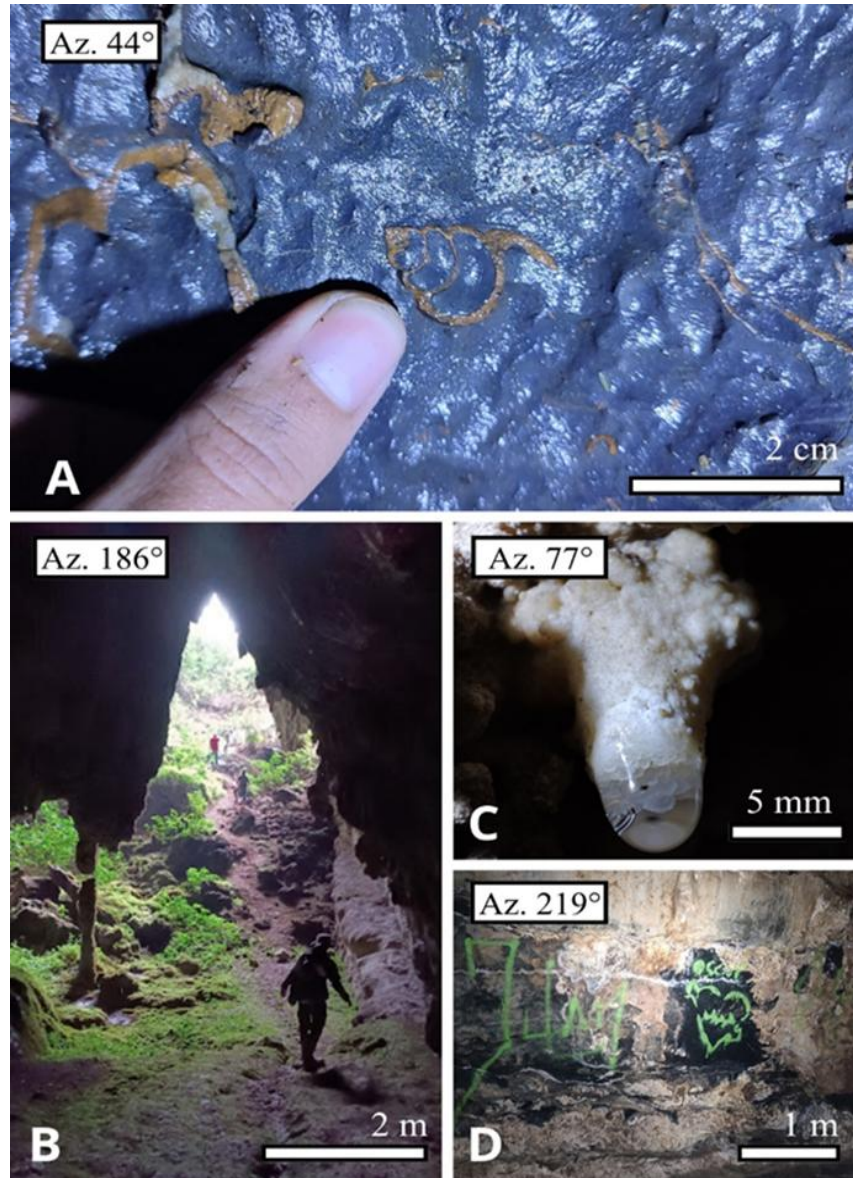
**Figura 16**

*Cartografía espeleológica de la Cueva Azul (San-80-0790)*



**Figura 17**

*Aspectos morfológicos y espeleológicos representativos de la Cueva Azul*



Nota. (A) Fósil de gasterópodo preservado en calizas de la Formación Rosa Blanca. (B) Entrada principal de la cueva, con notable desarrollo vertical y vegetación interna asociada. (C) Estalactita en proceso de formación, con acumulación activa de carbonato de calcio. (D) Evidencia de vandalismo en las paredes de la cavidad, con presencia de grafitis que afectan el valor patrimonial del sitio.

### 5.3.2 Cueva La Concordia (San-80-0742)

Presenta un desarrollo total de 323 m y una altitud de 2.621 m s. n. m. Su morfología general sigue una orientación NE–SW (Figura 18). La cavidad se caracteriza por un amplio salón principal y una entrada bien definida que facilita la iluminación natural. En su interior se observan coladas, cortinas y acumulaciones de sedimentos finos, mientras que hacia la salida se desarrolla un ambiente húmedo con vegetación y un pequeño riachuelo, evidenciando la interacción entre los procesos kársticos y la dinámica superficial reciente (Figura 19).

**Figura 18**

*Cartografía Cueva La Concordia (San-80-0742).*

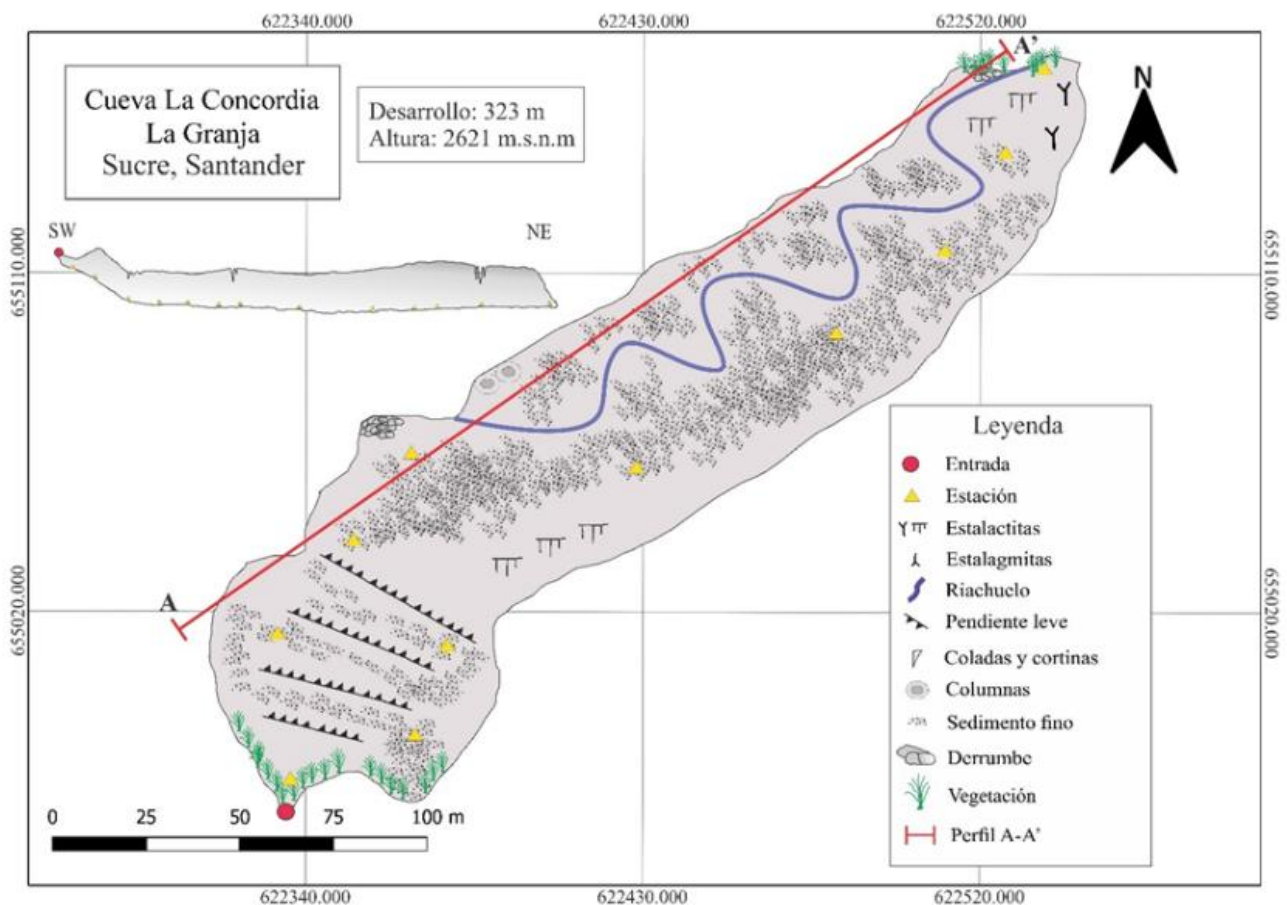
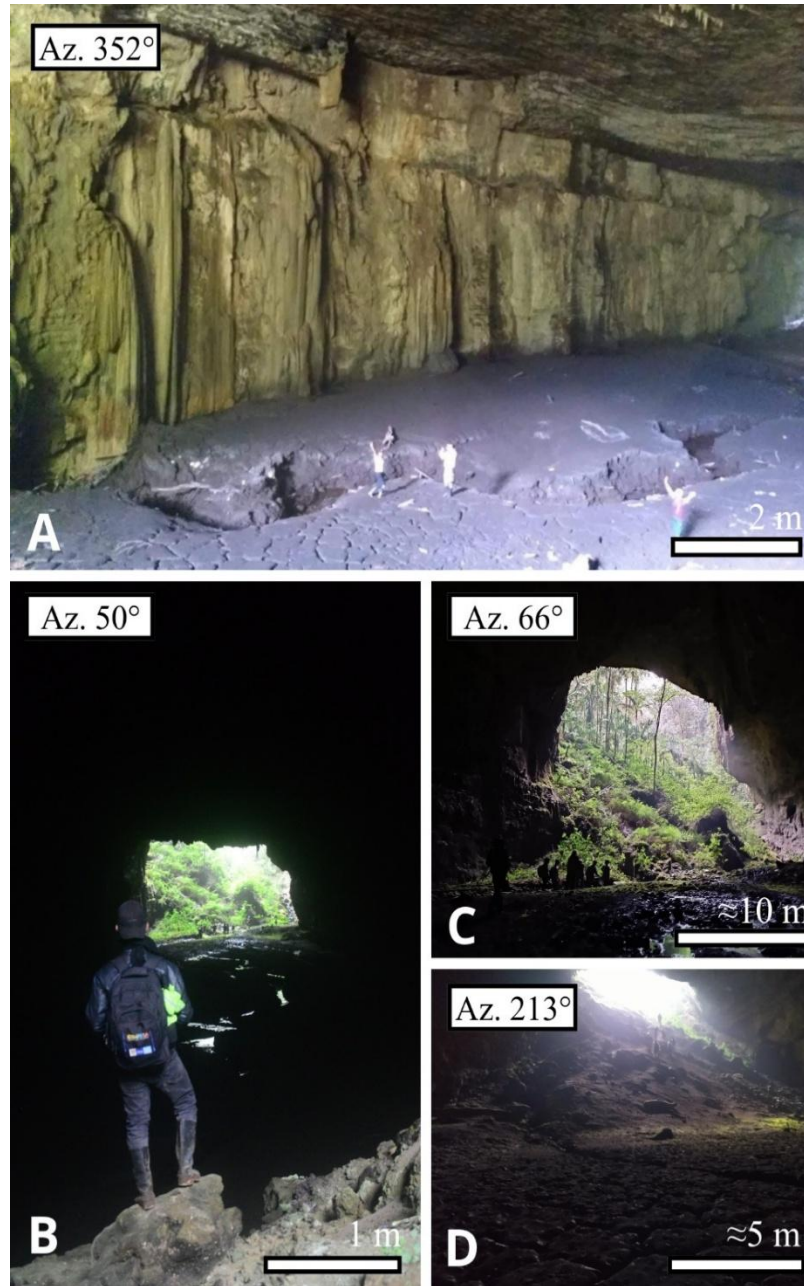


Figura 19

*Rasgos morfológicos y ambientales de la Cueva La Concordia*



*Nota.* (A) Vista general del salón principal, mostrando la escala y dimensiones de la cavidad. (B) Entrada de la cueva y vista hacia la salida. (C) Salida cubierta por vegetación, con presencia de un riachuelo activo. (D) Acumulación de sedimentos en la entrada, configurando parcialmente la morfología de la cavidad.

### 5.3.3 Cueva Escuela de Berlín (San-45-0840)

Está ubicada en el municipio de La Belleza (Santander), presenta un desarrollo aproximado de 456 m y una altitud de 2.108 m s. n. m (Figura 20). Su trazado principal sigue una orientación NE–SW, concordante con la dirección predominante de los lineamientos estructurales de la zona o fracturas con posible cinemática dextral. La cavidad se caracteriza por un salón principal con abundantes espeleotemas —entre ellos estalactitas, columnas y helictitas— que evidencian una prolongada actividad de precipitación de carbonato de calcio (Figura 21). La entrada es amplia y permite la circulación de aire y humedad, generando condiciones favorables para el desarrollo de formaciones secundarias y acumulaciones de sedimentos finos en sectores interiores.

**Figura 20**

*Cartografía Cueva Escuela de Berlín (San-45-0840)*

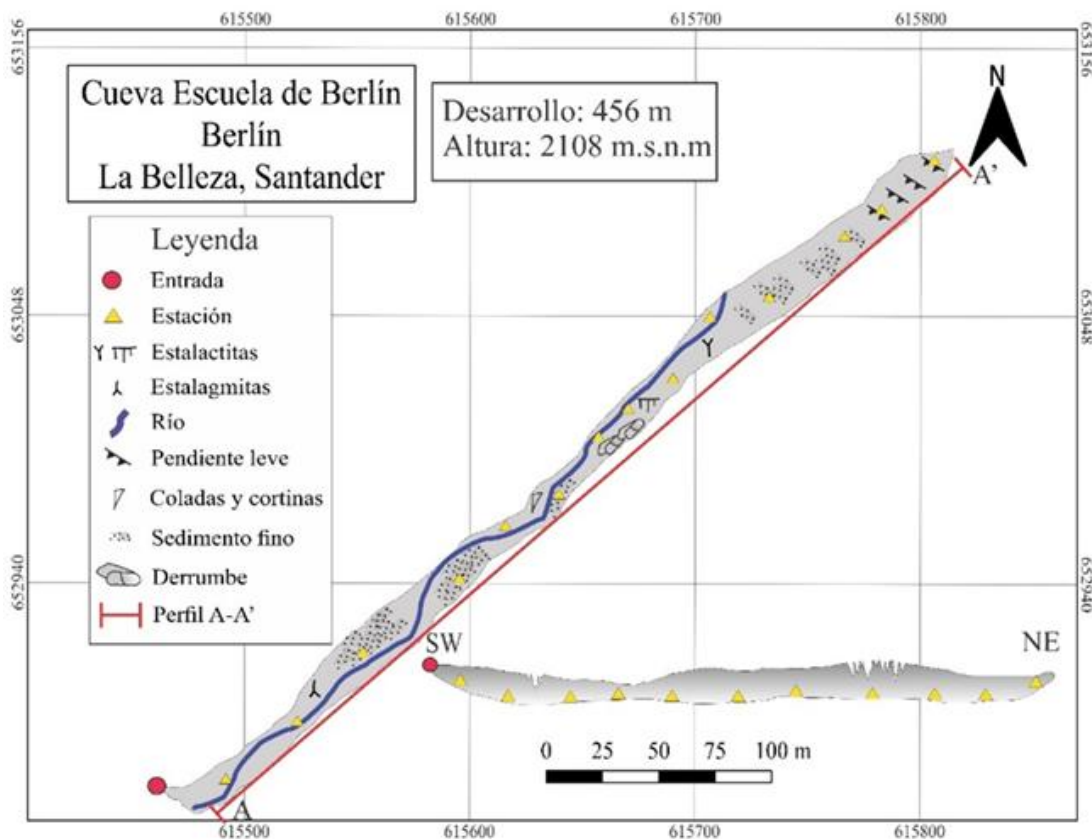
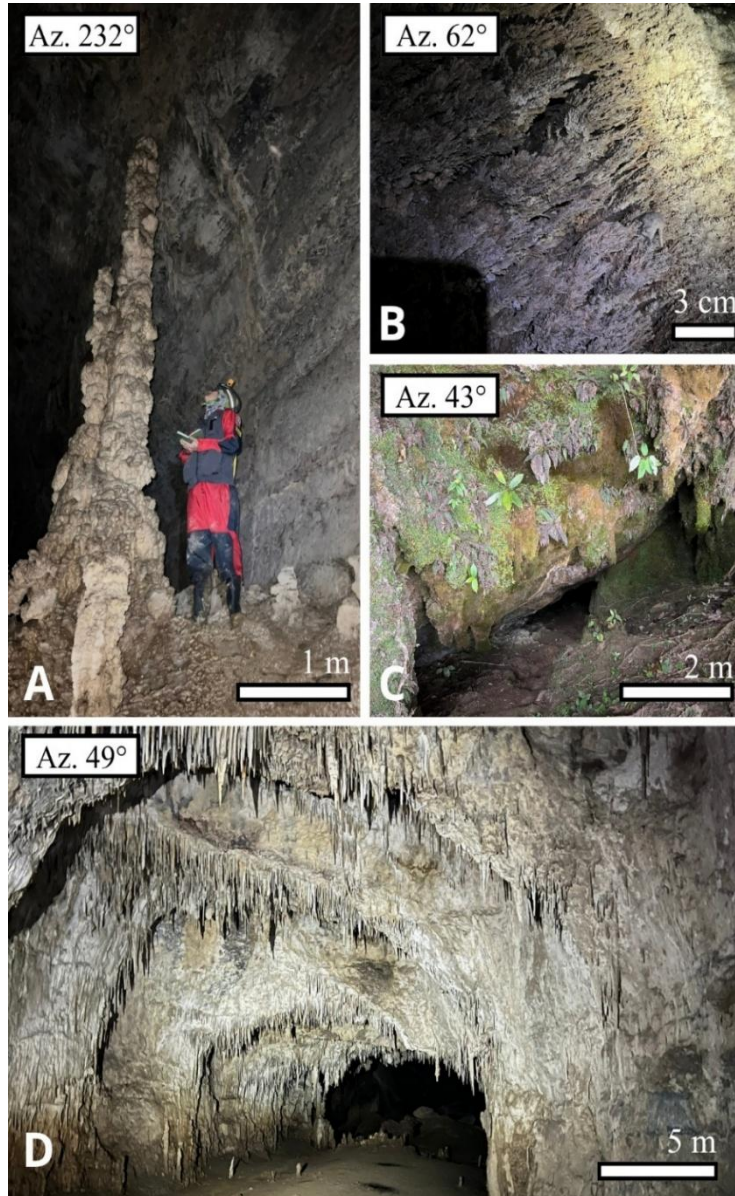


Figura 21

Aspectos morfológicos y espeleológicos representativos de la Cueva Escuela de Berlín



*Nota.* (A) Columna de aproximadamente tres metros de altura, mostrando escala con observador. (B) Helictitas, espeleotemas de crecimiento irregular formados por la desviación capilar del flujo mineral. (C) Entrada principal de la cueva, parcialmente cubierta por vegetación. (D) Salón principal con abundantes estalactitas y acumulación de sedimentos en el piso.

### 5.3.4 Cueva del Arco (San-80-0260)

Presenta un desarrollo de aproximadamente 75 m y una altitud de 2.643 m.s.n.m (Figura 22). La cavidad debe su nombre a la forma arqueada de su entrada principal, la cual constituye un rasgo morfológico distintivo visible desde el valle adyacente. Su trazado general es corto y se orienta hacia el NE-SW, presentando un amplio vestíbulo de entrada con presencia de coladas, estalactitas y acumulaciones de sedimentos. La vegetación circundante y los derrumbes parciales en la entrada sugieren una fuerte interacción entre la dinámica superficial y los procesos kársticos actuales (Figura 23).

**Figura 22**

*Cartografía Cueva del Arco (San-80-0260)*

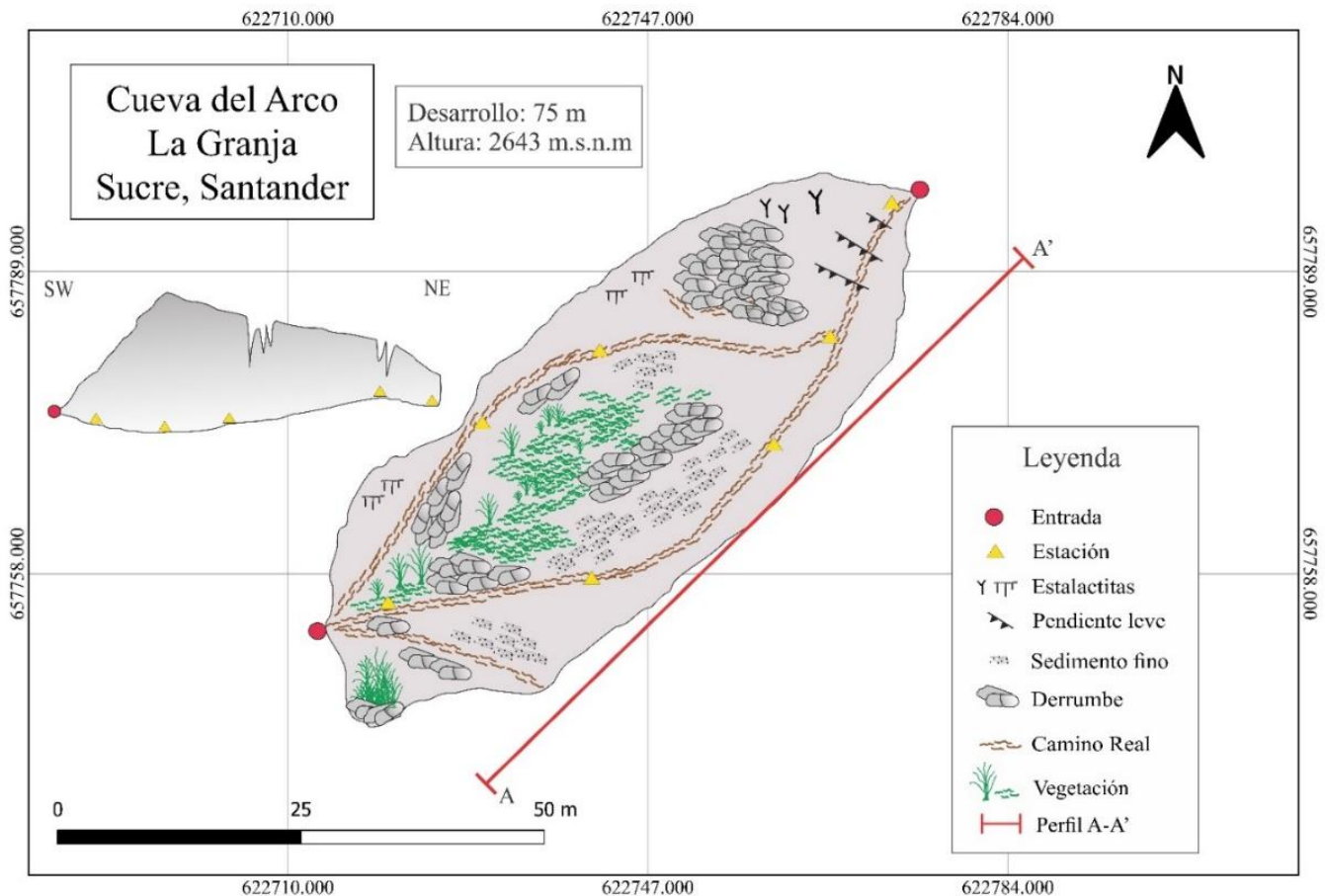
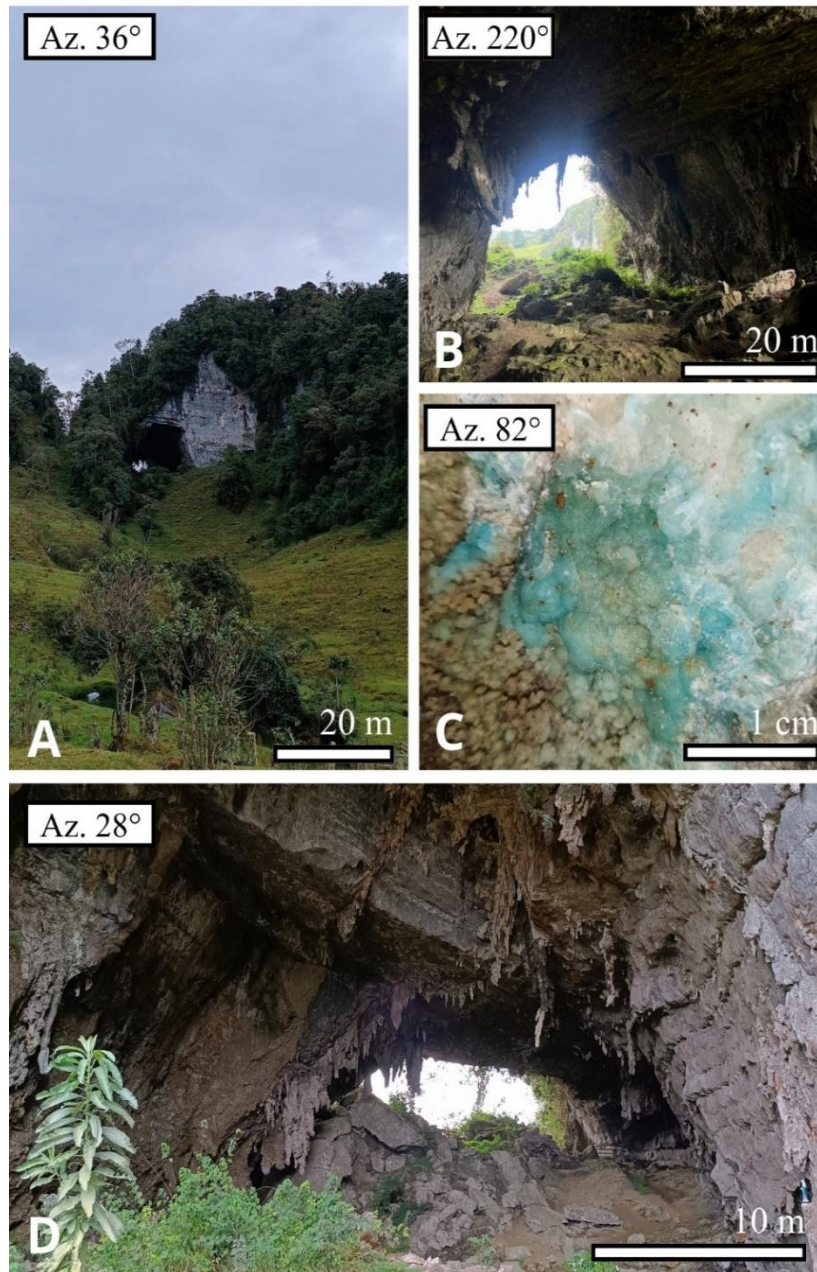


Figura 23

*Rasgos morfológicos y mineralógicos característicos de la Cueva del Arco*



*Nota:* (A) Entrada principal de la cueva, cuya forma arqueada da origen a su nombre. (B) Vista hacia el sur mostrando la abertura de acceso y su relación con el relieve circundante. (C) Depósito de calcita botroidal de tonalidad azulada. (D) Vista desde el interior de la cavidad, con presencia de vegetación y acumulaciones de sedimento en la salida.

### 5.3.5 Cueva del Pino (San-80-0744)

Ubicada en el corregimiento de La Pradera (Sucre, Santander), presenta un desarrollo total de 433 m y una altitud de 2.633 m s. n. m (Figura 24). Su trazado muestra una orientación NNW–SSE y una galería con rumbo NE-SW, concordante con la tendencia estructural dominante de la zona. La cavidad se distingue por la presencia de gours bien desarrollados, tanto en el vestíbulo como en la galería principal, evidenciando una activa circulación y depositación de aguas. La entrada es amplia y permite la entrada de luz natural, mientras que hacia el interior se observan coladas, cortinas y estalactitas en buen estado de conservación (Figura 25). La dinámica hídrica interna y la morfología escalonada de los gours indican procesos de precipitación carbonatada en condiciones de flujo laminar y saturación constante.

**Figura 24**

Cartografía Cueva del Pino (San-80-0744)

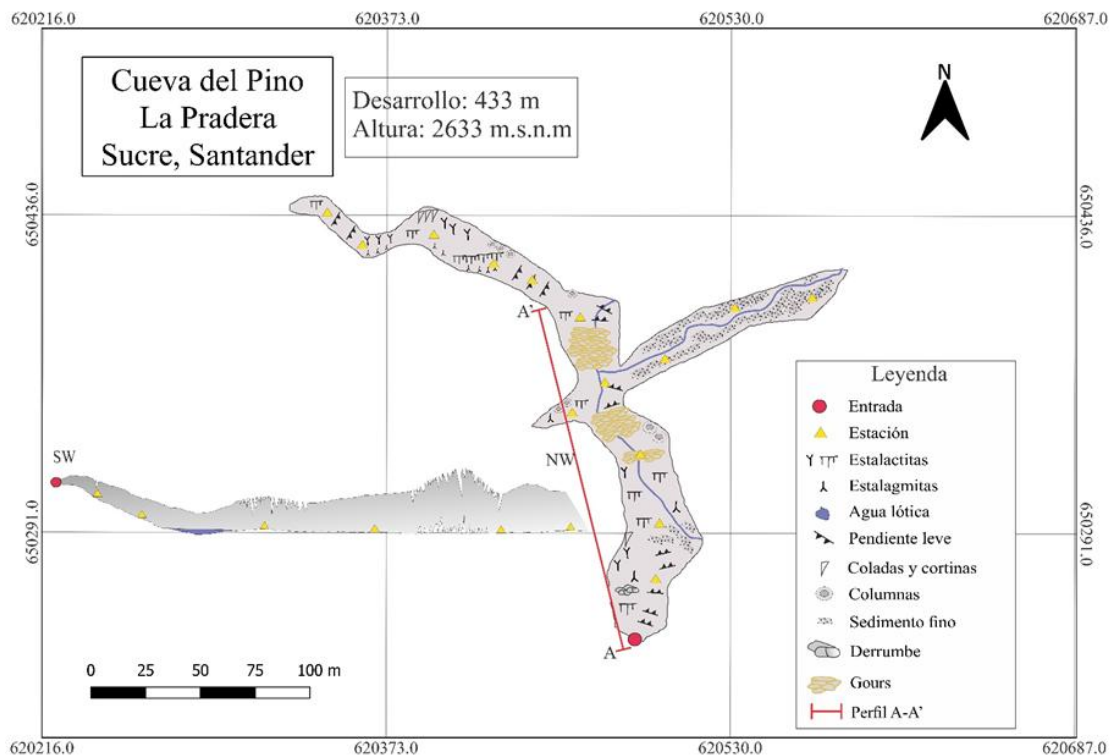
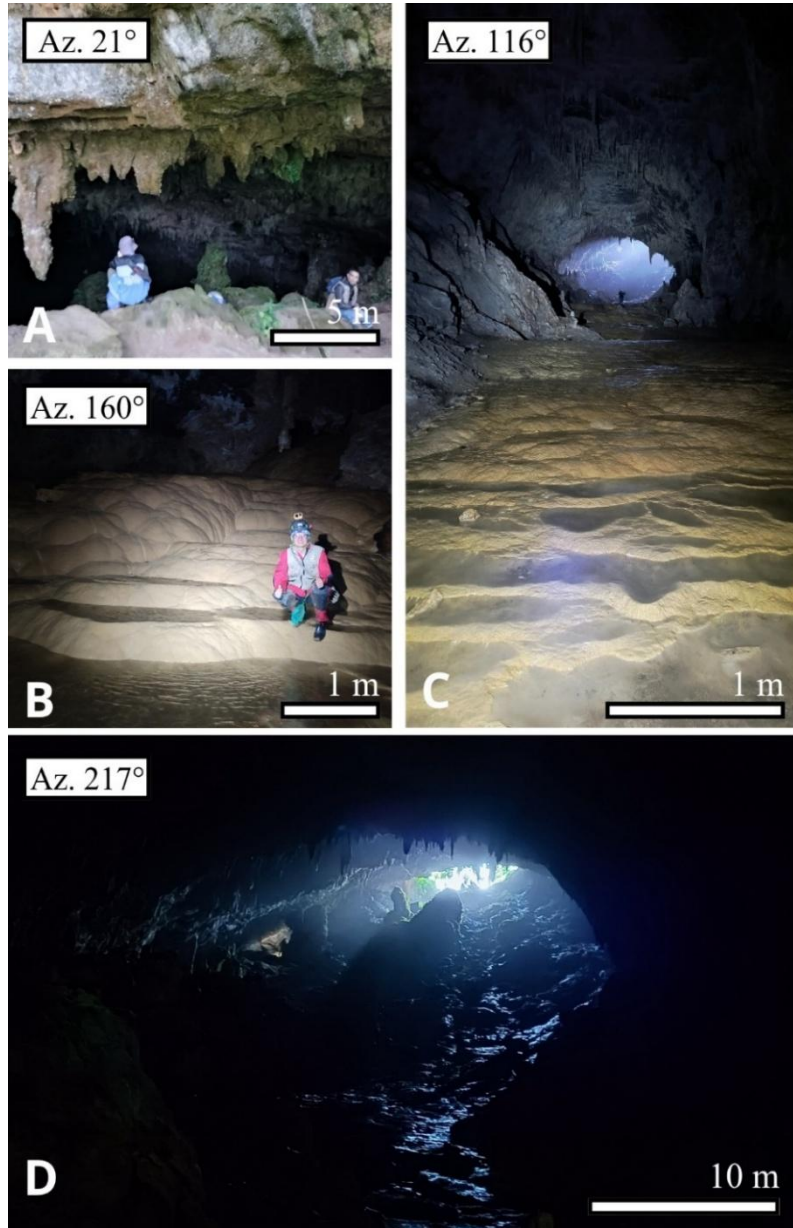


Figura 25

*Rasgos morfológicos e hidrológicos de la Cueva del Pino*



*Nota.* (A) Entrada principal de la cueva. (B) Gours a escala de un hombre, evidenciando el tamaño y desarrollo de éstos. (C) Gours en la galería principal, formados por la precipitación de carbonato de calcio en condiciones de flujo laminar por parte del río. (D) Vista hacia la salida de la cavidad, con iluminación natural que resalta la topografía interna del conducto.

### 5.3.6 *Cueva del Río (San-80-0745)*

Presenta un desarrollo total de 1.232 m y una altitud aproximada de 2.570 m s. n. m (Figura 26). Se trata de la cavidad más extensa del conjunto estudiado y está fuertemente condicionada por la presencia de un conducto fluvial activo, que ha modelado un corredor principal con dirección general NNE–SSW, controlado por fracturas y planos de debilidad estructural. El sistema cuenta con tres accesos naturales: una entrada principal por donde ingresa el río, una dolina colapsada que permite la entrada de luz, y una entrada secundaria también asociada a procesos de colapso (Figura 27). La dinámica hídrica interna, junto con la presencia de coladas, cortinas y simas, evidencia una evolución kárstica activa, marcada por la disolución y el arrastre de sedimentos a lo largo del cauce subterráneo.

Figura 26

Cartografía Cueva del Río (San-80-0745)

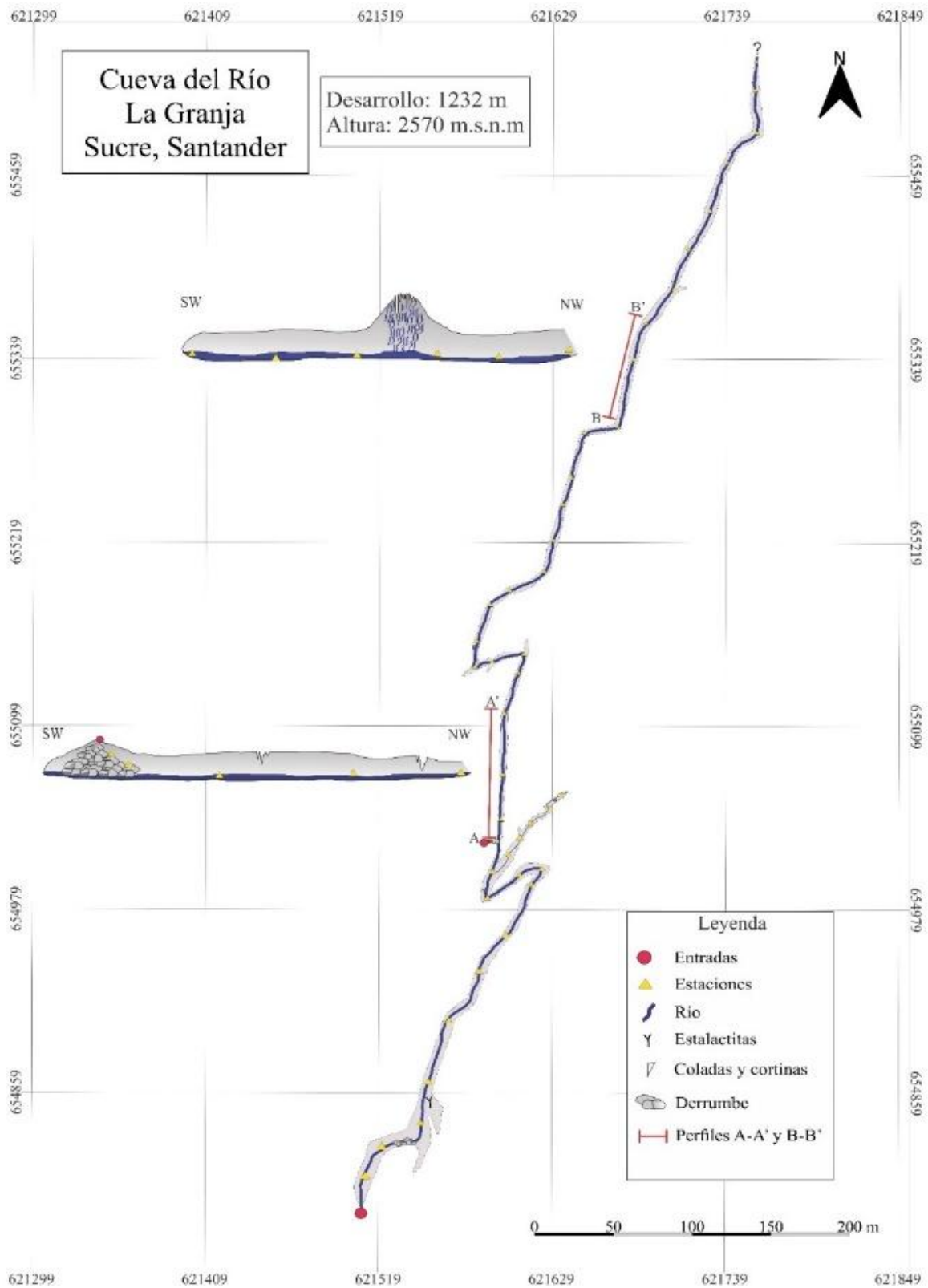
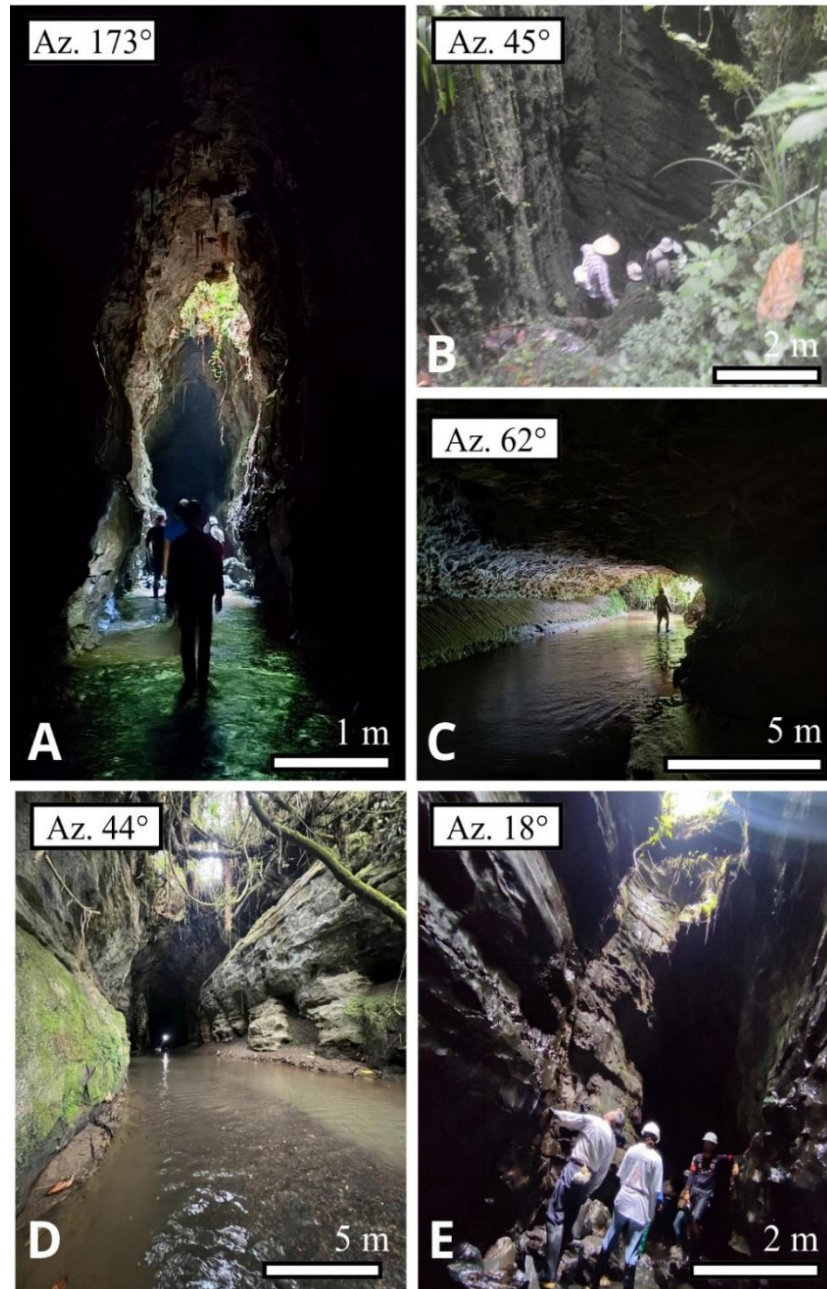


Figura 27

*Rasgos geomorfológicos e hidrológicos de la Cueva del Río*



*Nota.* (A) Entrada de luz a través de una dolina colapsada. (B) Entrada secundaria generada por una dolina. (C) Entrada principal de la cueva, formada por el cauce activo del río. (D) corredor principal modelado por la acción fluvial y el control estructural de fracturas. (E) Sima interna generada por procesos de erosión y colapso.

### 5.3.7 Cueva de Los Carracos de San Isidro (San-80-0250)

Ubicada en el municipio de Sucre, Santander), posee un desarrollo aproximado de 1.095 m y una altitud de 2.373 m s. n. m. Se trata de una cavidad con una marcada influencia estructural, donde las fracturas NE-SW controlan la morfología general del sistema (Figura 28). Entre sus rasgos más distintivos destaca la presencia de una sima, originada por procesos de colapso y disolución sobre planos de fractura bien definidos. La cueva alberga una población del *Steatornis caripensis* (guácharo), especie adaptada a ambientes cavernícolas, cuya actividad ha contribuido a la acumulación de guano y semillas en diversos sectores del sistema (Figura 29). La morfología interna está conformada por amplias galerías longitudinales que permiten la entrada y salida de las aves, y sectores más estrechos asociados a la acción combinada del agua y la fracturación de las calizas.

**Figura 28**

Cartografía de la Cueva de Los Carracos de San Isidro (San-80-0250)

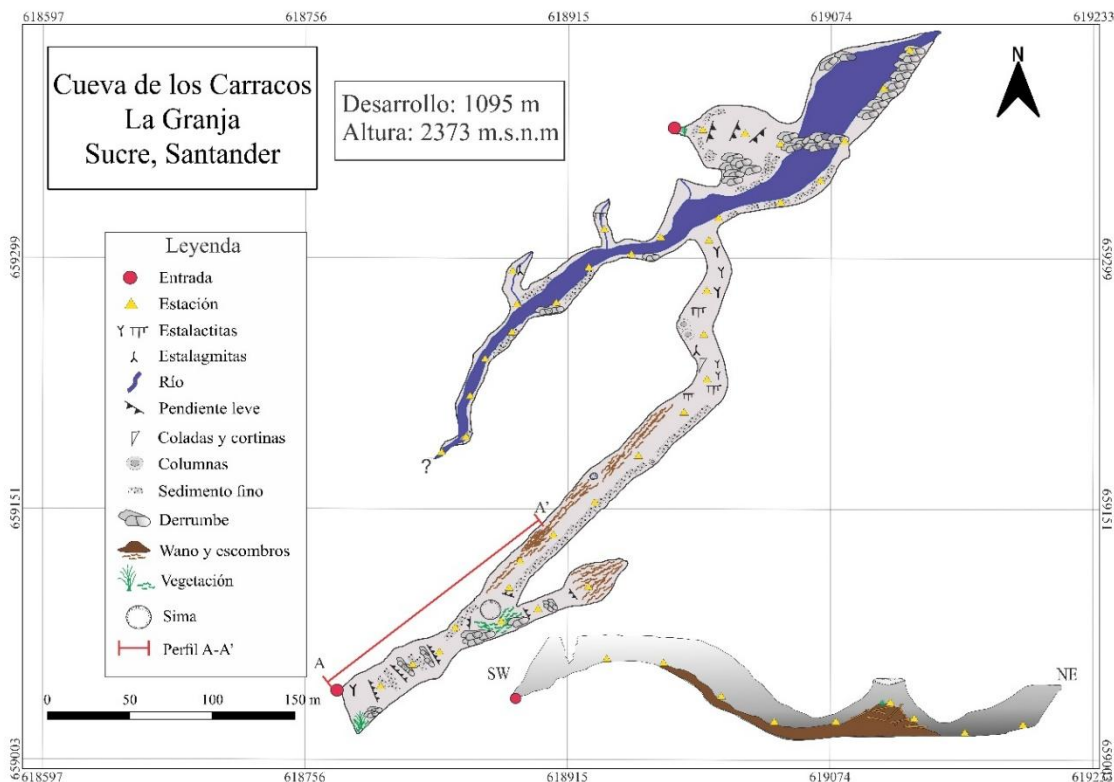
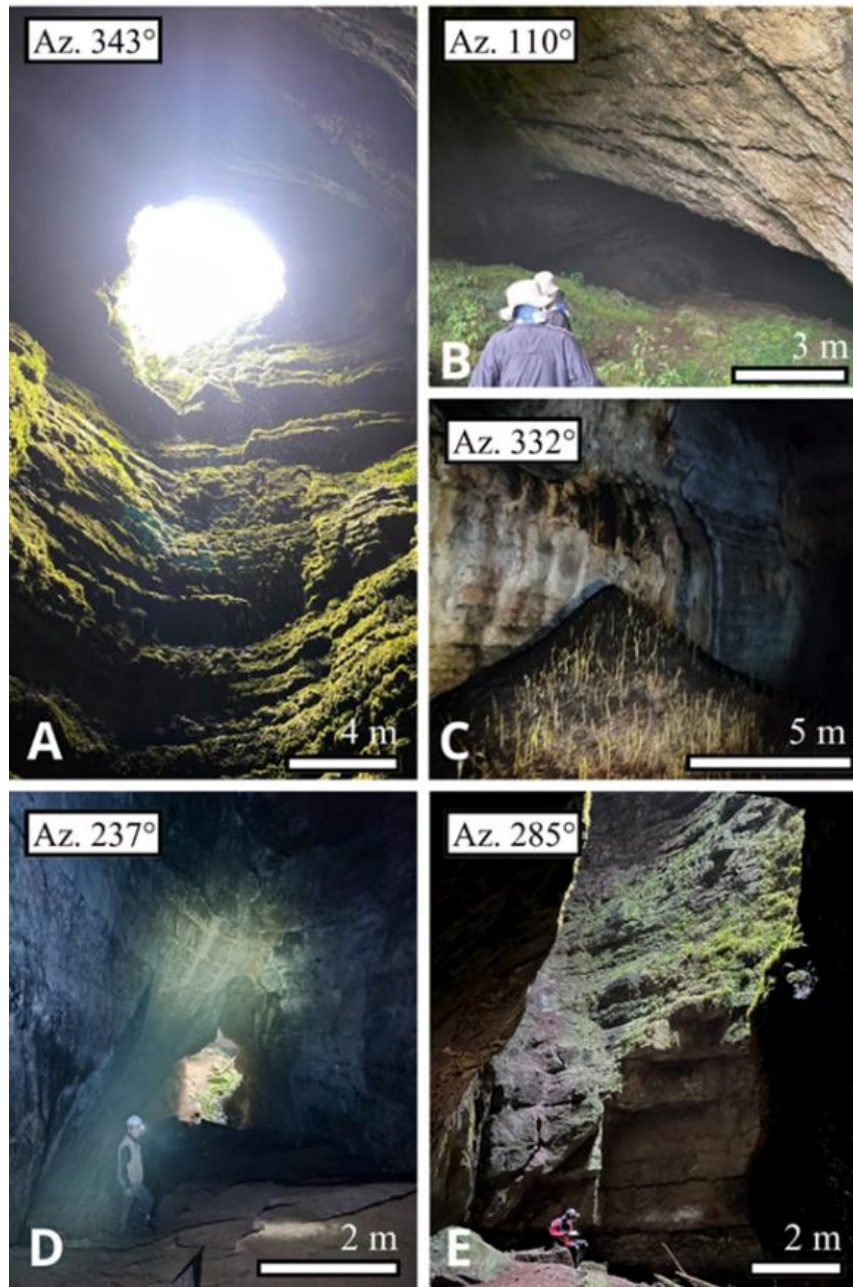


Figura 29

*Rasgos geomorfológicos y biológicos de la Cueva de Los Carracos de San Isidro*



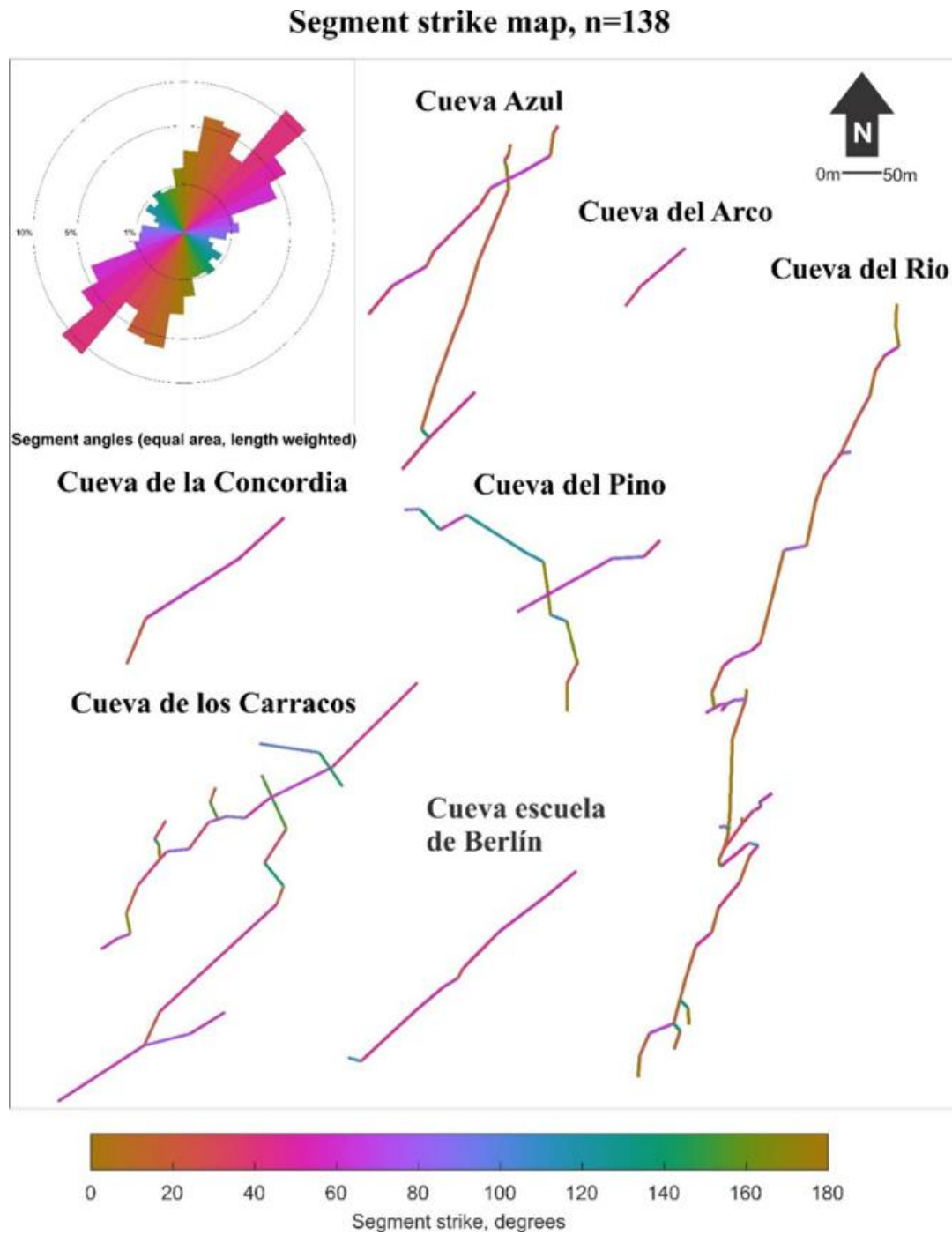
*Nota.* (A) Sima principal moldeada por el control estructural de las fracturas. (B) Entrada principal de la cueva. (C) Acumulación de guano deposito por los guácharos. (D) Galería principal. (E) Galería utilizada por los guácharos como vía de entrada y salida del sistema.

#### 5.4 Orientación de las cuevas y cavernas

El diagrama de rosas elaborado a partir de las direcciones de las galerías principales muestra dos tendencias predominantes (Figura 30). La primera, comprendida entre  $10^\circ$  y  $30^\circ$ , está controlada por los planos de clivaje y una dirección secundaria de diaclasas longitudinales, la cual coincide con aperturas en las charnelas de anticlinales o ejes de sinclinales (figuras 5 y 16). La segunda tendencia, entre  $40^\circ$  y  $60^\circ$  coincide con la tendencia general de lineamientos (Figura 8), los cuales se asumen como fracturas con potencial cinemática dextral, lo que podría dar origen a aperturas locales si las fracturas cambian levemente su tendencia más al este. Adicionalmente, el diagrama rosa insinúa una tendencia de cuevas en dirección perpendicular a la primera dirección ( $10^\circ$  y  $30^\circ$ ) y que corresponde con la orientación preferencial de las diaclasas y del esfuerzo máximo horizontal resultante ( $SH_{max} \approx 118^\circ$ ), el cual define el campo de esfuerzos regional con dirección NW–SE.

Figura 30

Orientación de las Cuevas y Cavernas



*Nota.* El diagrama de Rosa en FracPaQ muestra la dirección de los segmentos en las cuevas y cavernas

### 5.5 Parámetros espeleométricos

El análisis de los parámetros espeleométricos de las siete cavidades una notable variabilidad morfológica, con desarrollos que oscilan entre 75 m y 1232 m e índices de desarrollo entre 1,01 y 1,82 (Tabla 9), lo que indica desde morfologías muy lineales hasta moderadamente ramificadas. La mayoría de las cuevas presentan conductos subhorizontales con coeficientes de verticalidad menores a 0,1. Las cavidades C. Del Río, C. La Concordia y C. Los Carracos presentan influencia hídrica activa, mientras que C. El Pino y C. El Arco corresponden a ambientes predominantemente secos.

**Tabla 9**

#### *Parámetros Espeleométricos*

Parámetros espeleométricos	Cueva Azul	Cueva de la Concordia	Cueva de la Escuela de Berlín	Cueva del Arco	Cueva del Pino	Cueva del Río	Cueva los Carracos
<b>Clasificación de cavidad</b>	Cueva grande	Cueva pequeña	Cueva pequeña	Cueva pequeña	Cueva mediana	Caverna pequeña	Caverna pequeña
<b>Desarrollo</b>	781 m	323 m	456 m	75 m	433 m	1232 m	1145 m
<b>Número de entradas</b>	2	2	1	2	1	2	2
<b>Máx. extensión horizontal</b>	739 m	318 m	431 m	74 m	426 m	1224 m	1077 m
<b>Máx. extensión vertical</b>	31 m	24 m	18 m	6 m	40 m	27 m	41 m
<b>Índice de desarrollo</b>	(1,99) Medio	(1,01) Muy lineal	(1,01) Muy lineal	(1,01) Muy lineal	(1,01) Muy lineal	(1,01) Muy lineal	(1,09) Lineal
<b>Volumen</b>	44.190 m <sup>3</sup>	201.568 m <sup>3</sup>	49.391 m <sup>3</sup>	14.184 m <sup>3</sup>	57.029 m <sup>3</sup>	56.306 m <sup>3</sup>	126.338 m <sup>3</sup>
<b>Altura promedio</b>	Alta: 5-10 m (31% de las medidas), máximo 18m	Muy Alta: 11-14 m (78% de las medidas), máximo 18m	Alta: 5-10 m (53% de las medidas), máximo 20m	Muy Alta: 10-19 m (63% de las medidas), máximo 19m	Muy Alta: 21-25 m (43% de las medidas), máximo 40m	Muy Alta: 21-25 m (43% de las medidas), máximo 40m	Media: 2-5 m (49% de las medidas), máximo 30m
<b>Ancho promedio</b>	2-5m (42% de las medidas), máximo 17.8m	Muy Ancha 10-46m (100% de las medidas), máximo 46m	Ancha 5-10m (58% de las medidas), máximo 12,7m	Muy Ancha 10-29m (63% de las medidas), máximo 29m	Media 13-19m (77% de las medidas), máximo 22m	Media 13-19m (77% de las medidas), máximo 22m	Muy amplia: 10-45m (50% de las medidas), máximo 45m
<b>Coefficiente de verticalidad</b>	(0,08) Muy Horizontal	(0,08) Muy Horizontal	(0,03) Muy Horizontal	(0,08) Muy Horizontal	(0,09) Muy Horizontal	(0,02) Muy horizontal	(0,04) Muy horizontal
<b>Situación Hídrica</b>	Presenta agua lótica en la entrada	Atravesada por un riachuelo	Atravesada por un riachuelo	Ningún tipo de agua	Ningún tipo de agua	Corre un Río por toda la cueva	Parte de la caverna es atravesada por un río
<b>Acceso</b>	Via vereda la Selmira hacia el NE de La Granja	Se accede por la finca de Don juvenil a 500 m de desvío de la carretera principal	Al O, a 100 m de la escuela de Berlín, en un dolina, se encuentra la entrada	Camino real de la vereda la Selmira hacia el municipio de Bolívar	A unos 200 m de desvío de la carretera La Granja-Pradera. Desde ojo de agua	dos diferentes accesos, uno por una dolina y la otra directamente desde el río camino hacia "La Peña"	Desvío al E desde la vereda San Isidro, por el camino de mulas, a unos 400 m, se encuentra la entrada

### 5.5.1 *Cave Sensitivity Index (CSI)*

La aplicación del Índice de Sensibilidad de Cavernas (CSI) en las siete cavidades evaluadas evidencia un incremento general en los niveles de vulnerabilidad ambiental del sistema kárstico de La Granja. Los resultados muestran que la mayoría de las cuevas presentan condiciones de vulnerabilidad moderada a crítica (Tabla 10). La Cueva del Pino (CSI = 0,83) y la Cueva los Carnacos (CSI = 0,79) se clasifican como de vulnerabilidad crítica, debido a la presencia de ornamentación activa, desarrollo hídrico interno y una alta exposición a impactos antrópicos. La Cueva de la Escuela de Berlín (CSI = 0,67) y la Cueva del Arco (CSI = 0,71) presentan vulnerabilidad severa a considerable, asociada a una combinación de factores geológicos, biológicos e hidrológicos bien desarrollados. En contraste, la Cueva Azul (CSI = 0,47) y la Cueva de la Concordia (CSI = 0,52) mantienen una vulnerabilidad moderada, reflejando condiciones aún estables pero susceptibles ante alteraciones.

**Tabla 10**

#### *Índice Cave Sensitivity Index (CSI)*

Cuevas	Biota	Hidrología	Ornamentación	Geológica	Mineralógica	Paleontología	Cultural/ Histórico	Suma	VARIABLES consideradas	CSI	Grado de vulnerabilidad
Cueva Azul	1	2	2	1	N.A	N.A	N.A	6	4	0,5	Moderadamente vulnerable
Cueva de la Concordia	1	2	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	3	2	0,5	Moderadamente vulnerable
Cueva de la Escuela de Berlín	1	3	3	N.A	N.A	N.A	N.A	5	3	0,78	Vulnerabilidad severa
Cueva del Arco	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	2	2	1	0,67	Considerablemente vulnerable
Cueva del Pino	3	3	3	N.A	N.A	N.A	N.A	9	3	1	Vulnerabilidad crítica
Cueva del Río	1	3	1	N.A	N.A	N.A	N.A	5	3	0,56	Vulnerable
Cueva los Carracos	3	2	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	5	2	0,83	Vulnerabilidad crítica

### 5.5.2 *Análisis de espeleotemas*

El análisis de los espeleotemas muestra que las cuevas del Pino y del Río presentan la mayor diversidad y actividad de formaciones, con estalactitas, estalagmitas, columnas, cortinas y *gours* en crecimiento activo, reflejando un proceso de karstificación vigente (Tabla 11). En contraste, las demás cavidades exhiben una menor variedad, predominando estalactitas inactivas o en crecimiento incipiente. Los coraloides y helictitas se registran únicamente en la Escuela de Berlín y El Pino, asociados a microflujos y alta humedad. En general, la distribución de espeleotemas indica un gradiente de actividad kárstica, siendo más intenso en las zonas con circulación hídrica y mayor conectividad con el exterior.

**Tabla 11**

*Distribución y estado de desarrollo de los espeleotemas*

Grupo	Gravedad ( Depósito por caída de gotas de agua)			Escurrimiento (Precipitación por flujo sobre paredes o pisos)	Inmersión (Precipitación en charcos o represas)	Capilaridad (Crecimiento por capilaridad o microflujo, sin control gravitacional)	
	Estalactitas	Estalagmitas	Columnas	Cortinas	Gours	Coraloides	Helictitas
<b>Cueva Azul</b>	Presente, con crecimiento activo	Presente	Ausente	Inactivo	Ausente	Ausente	Ausente
<b>Cueva de la Concordia</b>	Presente	Ausente	Presente	Inactivo	Ausente	Ausente	Ausente
<b>Cueva de la Escuela de Berlín</b>	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Ausente	Presente, con crecimiento activo	Presente
<b>Cueva del Arco</b>	Presente	Ausente	Ausente	Presente	Ausente	Ausente	Ausente
<b>Cueva del Pino</b>	Presente, con crecimiento activo	Presente, con crecimiento activo	Presente, con crecimiento activo	Presente	Presente, con crecimiento activo	Presente	Presente
<b>Cueva del Río</b>	Presente, con crecimiento activo	Ausente	Presente, con crecimiento activo	Presente, con crecimiento activo	Presente, con crecimiento activo	Presente, con crecimiento activo	Presente
<b>Cueva los Carracos</b>	Presente	Presente	Presente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente

## 6. Discusión

La configuración estructural observada en el área de La Granja refleja un control tectónico claro sobre la evolución del sistema kárstico. Las cavidades presentan un patrón coherente con el campo de esfuerzos regional, dominado por una compresión NW–SE, evidenciada tanto en el mapa de lineamientos como en la orientación general de las cuevas. El tensor de esfuerzos obtenido ( $SH_{max} = 118^\circ$ ) coincide con el régimen compresivo de la Cordillera Oriental descrito por Kellogg et al. (1995) y Taboada et al. (2000), quienes señalan que la deformación de la cordillera estuvo controlada por procesos de inversión tectónica que generaron plegamientos y fallas con orientaciones predominantes NE–SW y N–S. Esto valida las mediciones estructurales realizadas y confirma que el sistema kárstico está condicionado por un mismo evento deformacional regional. La generación de clivaje penetrativo en las calizas de la Formación Rosa Blanca se explica por este régimen compresivo, lo que evidencia que la deformación tectónica ha condicionado tanto la estructura del macizo como la red kárstica. La integración del análisis estructural, la cartografía espeleológica y el uso de herramientas digitales (WinTensor, FracPaQ y VisualTopo) permitió vincular de manera cuantitativa los rasgos tectónicos con la morfología del karst. Localmente se identifica también un componente de rumbo con desplazamiento dextral en las estructuras orientadas hacia el NE o NEE, lo cual podría estar asociado con ajustes transcurrentes en respuesta a la compresión regional.

El papel del clivaje como estructura controlante es fundamental en el desarrollo del sistema. Sus planos, orientados entre  $20^\circ$  y  $40^\circ$ , funcionan como vías preferenciales de infiltración y flujo de agua subterránea en las calizas, facilitando la karstificación activa. Este comportamiento, documentado en campo, refuerza la propuesta de Mantilla et al. (2003)

sobre la importancia del clivaje en la Formación Rosa Blanca, y demuestra su influencia directa en la evolución de los sistemas kársticos de la región. Asimismo, se evidencia control estructural por fracturas en las charnelas de los anticlinales y a lo largo de los ejes de los sinclinales (Figuras 5 y 15), donde el fracturamiento favorece la disolución y circulación de agua subterránea, en concordancia con lo propuesto por Singhal y Gupta (2010) respecto a la disposición de fracturas en relación con estructuras plegadas.

Las galerías principales presentan dos orientaciones dominantes ( $30^{\circ}$ – $70^{\circ}$ ), asociadas al clivaje y a la disposición de las fracturas medidas, coincidiendo con los lineamientos NE–SW y NW–SE identificados en el modelo digital de terreno mediante la metodología de Mabee et al. (1994). Este patrón confirma la continuidad estructural entre superficie y subsuelo. Al igual que en el sistema kárstico de El Peñón, Santander (Sánchez et al., 2024), el karst de La Granja responde a un control estructural regional vinculado a la tectónica compresiva de la Cordillera Oriental. La aplicación del software FracPaQ siguiendo la metodología de Pedrera et al. (2015) permitió establecer la relación cuantitativa entre la orientación de los conductos y las estructuras geológicas, validando el control estructural sobre el desarrollo del karst.

Las diferencias morfométricas entre las cuevas —con longitudes entre 75 y 1232 m— se explican por la densidad de fracturas y la disponibilidad de agua en cada sector. Las cavidades más cortas, como la Cueva del Arco y la Cueva de la Concordia, podrían representar relictos de sistemas kársticos antiguos que originalmente estuvieron interconectados y que hoy sólo se conservan parcialmente debido a la erosión. En contraste, las cavidades más extensas y ramificadas (Cueva del Río y Los Carracos) se asocian con zonas de karst más joven y de mayor fracturamiento, mientras que otras más simples reflejan

una evolución avanzada del sistema y menor permeabilidad. En la mayoría de los casos, el desarrollo es predominantemente horizontal, condicionado por estratos solubles y fracturas subhorizontales.

La distribución de espeleotemas también responde al control estructural e hidrológico en la medida que se facilita el tránsito del agua y permanencia de condiciones de humedad. Las cuevas del Pino y del Río presentan ornamentación activa y circulación constante, lo que indica procesos de karstificación vigentes, mientras que en cavidades como la Azul y Los Carracos los espeleotemas se encuentran inactivos. Las helictitas y coraloides, presentes en microambientes húmedos, evidencian flujos capilares lentos y condiciones estables de humedad.

El análisis del Cave Sensitivity Index (CSI) muestra que la mayoría de las cavidades presentan vulnerabilidad moderada a crítica, destacándose las cuevas del Pino y Los Carracos como las más sensibles, seguidas por la Escuela de Berlín y la del Arco. Estos resultados reflejan una alta fragilidad del sistema kárstico, asociada a la actividad hídrica, la ornamentación activa y la presencia de fauna. En consecuencia, se hace necesario implementar medidas de conservación y manejo que regulen la actividad espeleológica en los sectores más vulnerables, en concordancia con los criterios de Harley et al. (2011) y las recomendaciones de Villar (2021) sobre la gestión sostenible de cavidades naturales.

Finalmente, los hallazgos de esta investigación tienen implicaciones prácticas para la gestión territorial y la conservación del patrimonio geológico. El reconocimiento de un sistema kárstico estructuralmente controlado resalta su vulnerabilidad a la contaminación y la importancia de regular las actividades humanas. A la vez, el valor científico y natural de

estas cavidades ofrece oportunidades para el desarrollo del geoturismo sostenible, siempre que se fomente la educación ambiental y la protección de los entornos más frágiles.

## 7. Conclusiones

El sistema kárstico del corregimiento de La Granja se desarrolla bajo un control estructural claro, impuesto por las deformaciones compresivas que afectaron la Cordillera Oriental durante el Cenozoico. El campo de esfuerzos dominante, con orientación compresiva NW–SE ( $SH_{max} \approx 118^\circ$ ), condiciona la orientación, forma y evolución de las cavidades.

El clivaje se reconoce como la estructura controlante principal del desarrollo kárstico. Sus planos subverticales, orientados entre  $20^\circ$  y  $40^\circ$ , actúan como vías preferenciales de infiltración y flujo de agua subterránea, facilitando la disolución de las calizas de la Formación Rosa Blanca y la génesis de las cavidades. Este resultado evidencia la influencia directa de la deformación tectónica en los procesos de karstificación activa

Las galerías principales de las cuevas presentan dos orientaciones predominantes que coinciden con las direcciones de pliegues, clivaje y diaclasas transversales. Este patrón también se refleja en los lineamientos observados en superficie, evidenciando continuidad entre las estructuras superficiales y subterráneas. Los planos de estratificación mantienen una tendencia similar ( $30^\circ$ – $40^\circ$ ), lo que confirma una coherencia estructural generalizada en la zona.

La actividad de los espeleotemas y los valores del Cave Sensitivity Index (CSI) confirman que la karstificación continúa activa en varias cavidades, especialmente en las cuevas del Pino, Los Carracos y la Escuela de Berlín, las cuales presentan los mayores niveles de sensibilidad ambiental. Estas condiciones reflejan una alta fragilidad del sistema kárstico y destacan la necesidad de implementar estrategias de conservación y regulación del turismo espeleológico para mitigar los posibles impactos en las zonas más vulnerables.

En conjunto, los resultados demuestran que las estructuras producto de la deformación tectónica ejercen un control determinante en el desarrollo del sistema kárstico de La Granja. Las orientaciones estructurales identificadas, la conectividad de las fracturas y la coherencia entre los patrones de deformación y la red de cavidades confirman la hipótesis planteada y permiten comprender la evolución kárstica bajo un régimen compresivo activo en el sur de Santander. Estos hallazgos amplían el conocimiento sobre el control estructural en sistemas kársticos de la Cordillera Oriental.

## 8. Recomendaciones

Se recomienda extender el análisis estructural hacia las zonas adyacentes al corregimiento de La Granja para evaluar la continuidad de las orientaciones identificadas y determinar si el campo de esfuerzos NW-SE calculado se mantiene a escala regional. Este tipo de comparación permitirá precisar los límites de influencia del régimen compresivo cenozoico y comprender mejor la relación tectono-karstológica a lo largo del flanco occidental de la Cordillera Oriental.

Integrar estudios hidrogeológicos y geofísicos orientados a caracterizar la dinámica subterránea y la conectividad entre cavidades, mediante el uso de trazadores, tomografía eléctrica y georradar. Esta aproximación permitirá comprender mejor el comportamiento hidrodinámico del sistema y su vulnerabilidad ambiental.

Realizar dataciones y análisis geoquímicos de espeleotemas y depósitos secundarios, con el fin de establecer una cronología de los procesos de karstificación y su relación con los eventos tectónicos y climáticos que han afectado la región.

Desarrollar una caracterización geomorfológica de alta resolución, apoyada en modelos digitales de terreno y fotogrametría con dron, para identificar y clasificar de forma precisa las formas exokársticas y su relación con las estructuras subyacentes.

Fortalecer la conservación y gestión del patrimonio kárstico de La Granja, mediante la elaboración de un plan de manejo espeleológico que promueva la protección de las cavidades, la educación ambiental y el aprovechamiento sostenible del sistema en iniciativas de geoturismo y divulgación científica.

**Referencias**

- Andreu, J., Calaforra, J., Cañaveras, J., Cuevas, S., Durán, J., Policarp, G., García del Cura, M., Garcia, A., Gázquez, F., Ordóñez, S., & Sánchez, S. (2016). Karst: un concepto muy diverso. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 24(1), 6-20.
- Angelier, J. (1994). Fault slip analysis and palaeostress reconstruction. In P. L. Hancock (Ed.), *Continental deformation* (pp. 53–100). Oxford, England: Pergamon Press.
- Arita, H. T. (1996). The conservation of cave-roosting bats in Yucatan, Mexico. *Biological Conservation*, 76(2), 177-185.
- Bögli, A. (2012). *Karst hydrology and physical speleology*. Springer Science & Business Media.
- Bürgli, H. (1954). El Cretáceo Inferior en los alrededores de Villa de Leyva, Boyacá. *Boletín Geológico*, 2(1), 5–22.
- Carbonell, P. J. T. (2011). *Estirando montañas: Pliegues, fallas y aplicaciones de la geología estructural*. La Lupa.
- Cardona Ramírez, D. M. (2012). *Patrón anidado de distribución de murciélagos en un conjunto de cuevas del Enclave Seco del Chicamocha (Santander-Colombia) [Tesis de maestría, Universidad Internacional Menéndez Pelayo]*.
- Davis, G., Reynolds, S & Kluth, C. (2011). *Structural geology of rocks and regions*. John Wiley y Sons.

- Delvaux, D., & Sperner, B. (2003). New aspects of tectonic stress inversion concerning tensor program. Geological Society, London, Special Publications, 212, 75-100.  
<https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2003.212.01.06>
- Étayo–Serna, F. (1968). El sistema Cretácico en la región de Villa de Leyva y zonas próximas. Geología Colombiana, 5, 5–74.
- Fernández, J. L., Martínez, R. G., & López, M. A. (2023). La espeleología como herramienta para el estudio de la biodiversidad subterránea: un enfoque en los ecosistemas kársticos. Revista de Geología Aplicada y Medio Ambiente, 15(2), 45-60
- Ford, D., & Williams, P. (2007). Karst hydrogeology and geomorphology. John Wiley.  
<https://doi.org/10.1002/9781118684986>
- Forti, P., & Hill, C. A. (1997). Cave minerals of the world (pp. 284-285). National Speleological Society.
- Fossen, H. (2010). Structural geology. Cambridge university press.
- Gèze, B. (1973). Lexique des termes français de spéléologie physique et de karstologie.
- Gómez, L., Lancharos, J., López, C., Patiño, A., Beltrán, A., Renzoni, G., Guerra, A., y Quintero, C. (2008). Cartografía geológica y muestreo geoquímico escala 1:100.000 de la plancha 150, Cimitarra. Valle Medio del Magdalena. INGEOMINAS.
- Gutiérrez, M. (2008). Geomorfología. Pearson Educación.
- Harley, G. L., Polk, J. S., North, L. A., & Reeder, P. P. (2011). Application of a cave inventory system to stimulate development of management strategies: The case of west-central Florida, USA. Journal of Environmental Management, 92(10), 2547–2557.

- Healy, D., Rizzo, R., Cornwell, D., Farrell, N., Watkins, H., Gomez, R., Timms, N & Smith, M (2017). FracPaQ: A MATLAB™ toolbox for the quantification of fracture patterns. *Journal of Structural Geology*, 95, 1-16.
- Hill, C. A. (2000). Sulfuric acid speleogenesis of Carlsbad Cavern and other caves in the Guadalupe Mountains of New Mexico and Texas. *Journal of Cave and Karst Studies*, 62(2), 77-90. <https://caves.org/pub/journal/PDF/V62/v62n2-Hill.pdf>
- Hudleston, P & Treagus, S. (2010). Information from folds: A review, *Journal of Structural Geology*, Volume 32, Issue 12.
- Julivert, M. (1968). *Lexique Stratigraphique International, Amérique Latine. Colombie (première partie), Précambrien, Paléozoïque, Mésozoïque, et intrusions d'âge mésozoïque–tertiaire (Vol. 5, pp. 1–651)*. Centre National de la Recherche Scientifique.
- Kellogg, J. N., Vega, V., Stallings, T. C., & Aiken, C. L. (1995). Tectonic development of Panama, Costa Rica, and the Colombian Andes: Constraints from Global Positioning System geodetic studies and gravity. In P. Mann (Ed.), *Geologic and tectonic development of the Caribbean Plate Boundary in Southern Central America* (pp. 75–90). Geological Society of America. <https://doi.org/10.1130/SPE295>
- Klimchouk, A. B. (2007). *Hypogene Speleogenesis: Hydrogeological and Morphogenetic Perspective*. NCKRI Special Paper, 1/
- Mabee, S., Hardcastle, K & Wise, D. (1994). A method of collecting and analyzing lineaments for regional-scale fractured-bedrock aquifer studies. *Groundwater*, 32(6), 884-894.

- Mantilla, L., Cruz, L., Colegial, J. (2003). Introducción a la geología del sector Vélez–Bolívar Guavatá (dpto. de Santander, Colombia) y su importancia para la exploración de depósitos hidrotermales. *Boletín de Geología*, 25(40), 39–57.
- Martínez, J. (2002). *Geología estructural y dinámica global*. Departamento De Geología, Universidad De Salamanca, Curso.
- Morales, L. G., Tanner, H. H., Jones, S. H., Barker, M. H. S., O'Donoghue, D. J., Mohler, C. E., Dubois, E. P., Jacobs, C., & Goss, C. R. (1958). General geology and oil occurrences of Middle Magdalena Valley, Colombia: South America. En L. G. Weeks (Ed.), *Habitat of oil symposium* (pp. 641–695). American Association of Petroleum Geologists.
- Núñez Jiménez, A., Viña Bayes, N., Acevedo Gonzalez, M., Rodriguez, J. M., Iturralde Vinent, M., & Graña Gonzalez, Á. (1988). *Cuevas y Carsos* (E. CientíficoTécnica, Ed.; Primera re). Ministerio de Cultura de Cuba
- Pedreira, A., Luque-Espinar, J. A., Martos-Rosillo, S., Pardo-Igúzquiza, E., Durán-Valsero, J. J., Martínez-Moreno, F., & Guardiola-Albert, C. (2015). Structural controls on karstic conduits in a collisional orogen (Sierra de las Nieves, Betic Cordillera, S Spain). *Geomorphology*, 238, 15-26.
- Pomar, L., Ginés, A., & Ginés, J. (1976). Morfología, estructura y origen de los espeleotemas epiacuáticos. *Association for Mexican Cave Studies*. Recuperado de <http://www.mexicancaves.org/other/mundos05.pdf>
- Radulovic, M. (2013). A new view on karst genesis. *Carbonates and Evaporites*. 28. 10.1007/s13146-012-0125-2

Renzoni, G., & Ospina, C. (1969). Geología del cuadrángulo J12 (Informe No. 1546, 30 pp.). Ingeominas.

Rodríguez, J y Lasso, C. (2019). Geología e Hidroquímica de las cuevas y cavernas de El Peñón (Andes) Santander, Colombia. Biodiversidad subterránea y epigea de los sistemas cársticos de El Peñón (Andes), Santander, Colombia.

Rodríguez–Rodríguez, C., & Rojas–Ladino, R. (1985). Estratigrafía y tectónica de la serie infracretácica en los alrededores de San Félix, Cordillera Central de Colombia. En F. Etayo–Serna & F. Laverde–Montaño (Eds.), Proyecto Cretácico (Publicaciones Geológicas Especiales del Ingeominas, 16, pp. XXI–1–XXI–21). Ingeominas.

Rossello, E. (2010). Curso de Geología Estructural, material didáctico. CONICET, Universidad de Buenos Aires.

Royero, J., y Clavijo, J., 2001. Mapa Geológico Generalizado Departamento de Santander. Ingeominas.

Sánchez, M., Pulido, H. D., y Velandia, F. (2024). Structural geology of El Peñón karst system along an anticlinorium of the northern Andes, Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 141, 10493.

Shanov, S., & Kostov, K. (2015). Dynamic Tectonics and Karst. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-43992-0>

Singhal, B., & Gupta, R. (2010). Applied Hydrogeology of Fractured Rocks <https://doi.org/10.1007/978-90-481-8799-7>

- Taboada, A., Rivera, L., Fuenzalida, A., Cisternas, A., Philip, H., Bijwaard, H., Olaya, J., & Rivera, C. (2000). Geodynamics of the northern Andes: Subductions and Intracontinental deformation (Colombia). *Tectonics*, 19(5): 787-813
- Ulloa, C.E., - Rodríguez, E.M. (1979). Geología de las planchas 170, Vélez, 190 Chiquinquirá, Colombia. Instituto Colombiano de Geología y Minería (Ingeominas), Ministerio de Minas y Energía, República de Colombia.
- Valdivieso Bohórquez, G. E (2022). Parámetros espeleométricos para levantamientos espeleológicos de cavidades colombianas. *Mundo subterráneo: Revista de espeleología*, (8), 2-20.
- Van Der Pluijm, B & Marshak, S. (2004). *Earth Structure: An Introduction to Structural Geology and Tectonics*. 2nd Edition, WW Norton, New York
- Villar, P. S. (2021). Más de un siglo de exploración espeleológica (1908-2020) en el Karst de La Llera (Llanes, Asturias): una revisión histórica. *Gota a Gota*, (24), 27-44.
- Wheeler, O. C. (1929). Report on the Palmira series with notes on stratigraphy of the Umir, Lisama, and La Paz formations near the east part of the Mares Concession. *Ecopetrol*, internal report, 1-18.