

**PROPUESTA DE MODELO GEOLÓGICO DE LOS PROYECTOS MINEROS HD5-091
Y SGB-09101 DE CARBÓN, UBICADOS EN ZONAS ALEDAÑAS A LOS MUNICIPIOS
DE CIMITARRA Y LANDÁZURI, SANTANDER.**

Carlos Fernando Gómez Fernández

Trabajo de grado para optar al título de Geólogo

Director

PhD. Mario García González

Codirector

Ing. Benjamin José Torres Coronado

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2023

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	8
1. Planteamiento del problema.....	9
2. Objetivos	11
2.1 Objetivo General.....	11
2.2 Objetivos Específicos.....	11
3. Localización.....	12
4. Marco Teórico.....	14
4.1. Carbón.....	14
4.2. Clasificación de carbones	15
4.3. Carbón en Colombia	17
5. Marco Geológico	20
5.1. Estratigrafía.....	20
5.2. Tectónica.....	27
6. Metodología	28
6.1. Fase 1: Precampo	29
6.2. Fase 2: Levantamiento Geológico en Campo	29
6.3. Fase 3: Trabajo de oficina y elaboración de informe final.	30
7. Resultados	31
7.1 Geología local	31
7.1.1. Título minero HD5-091	31
7.1.1.1. Bocaminas de la fase exploratoria..	35
7.1.1.2. Calidad de los carbones..	36
7.1.1.3. Estimación de recursos..	37
7.1.1.4. Cálculo de recursos..	38
7.1.2. Título Minero SGB-09101	40
7.1.2.1. Bocaminas de la fase exploratoria.	45
7.1.2.2. Calidad de los carbones.	45
7.1.2.3. Estimación de recursos..	48
7.1.2.4. Cálculo de recursos..	48
8. Discusión.....	51
9. Conclusiones.....	52
10. Recomendaciones	53
Referencias Bibliográficas	54

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Mapa de localización de los Títulos Mineros HD5-091 y SGB-09101 (Plancha 150IB - 150ID Escala 1:25:000).</i>	12
Figura 2. <i>Subregiones de la Zona Carbonífera de Santander.</i>	19
Figura 3. <i>Columna Estratigráfica Generalizada para el Valle Medio del Magdalena en el sector del área de estudio.</i>	21
Figura 4. <i>Mapa Geológico de los Títulos SGB-09101(Cimitarra) y HD5-091 (Landázuri) y - (Plancha 150 - Cimitarra Escala 1:100.000).</i>	24
Figura 5. <i>Mapa geológico del título minero HD5-091</i>	32
Figura 6. <i>Columna estratigráfica 1</i>	34
Figura 7. <i>Mapa muestreo del título minero HD5-091</i>	36
Figura 8. <i>Correlación columnas estratigráficas</i>	38
Figura 9. <i>Mapa geológico del título minero SGB-09101</i>	42
Figura 10. <i>Columna estratigráfica 1 segmento 2</i>	44
Figura 11. <i>Mapa de muestreo del título minero SGB-09101</i>	47
Figura 12. <i>Correlación columnas estratigráficas</i>	49

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Clasificación General de Carbón Mineral según norma ASTM D388-12.</i>	16
Tabla 2. <i>Localización de columnas estratigráficas título minero HD5-091</i>	33
Tabla 3. <i>Especificaciones de los mantos 240 y 250 para el cálculo de recursos</i>	39
Tabla 4. <i>Localización de columnas estratigráficas título minero SGB-09101</i>	41
Tabla 5. <i>Localización muestras título minero SGB-09101</i>	46
Tabla 6. <i>Cálculo de recursos del título minero SGB-09101</i>	50

Lista de Apéndices

Apéndices adjuntos y pueden ser visualizados en el repositorio de la Biblioteca UIS

Apéndice A - Columnas y perfiles títulos mineros

Apéndice B - Clasificación muestras de carbón HD5-091 y SGB-09101

Resumen

Título: PROPUESTA DE MODELO GEOLÓGICO DE LOS PROYECTOS MINEROS HD5-091 Y SGB-09101 DE CARBÓN, UBICADOS EN ZONAS ALEDAÑAS A LOS MUNICIPIOS DE CIMITARRA Y LANDÁZURI, SANTANDER. *^{1*}

Autor: Carlos Fernando Gómez Fernández^{2*3*}

Palabras Clave: Título Minero; Carbón; Modelo Geológico; Landázuri; Cimitarra.

Descripción:

Se propone un modelo geológico para los proyectos mineros HD5-091 (Landázuri) y SGB-09101 (Cimitarra) en la modalidad práctica empresarial con la empresa American Geophysical Group S.A.S. El objetivo principal es enriquecer el conocimiento geológico en relación con la exploración y explotación de carbón en la zona de estudio.

El proceso incluyó la revisión de información bibliográfica, un levantamiento geológico y caracterización de los mantos de carbón. Con estos, se estableció un modelo geológico y se mapea la distribución de los mantos de carbón en los títulos mineros, identificando sitios para el desarrollo de bocaminas.

El modelo geológico describe rocas de la Formación Umir Medio y Superior, con mantos de carbón intercalados y evidencia de fallas asociadas a las Fallas La Salina. Los mantos con mayor potencial se localizaron en el bloque 2 (M210-270) del título HD5-091. Se excluyó un manto en el SGB-09101 por su espesor y geometría inadecuados.

Los carbones se clasificaron según la norma ASTM, principalmente como bituminosos medio a bajo volátil, con algunas muestras categorizadas como semi antracíticas, encontrando que ambos títulos son económicamente viables, por lo que se proponen 9 bocaminas para el título HD5-091 y 3 para el sector del título SGB-09101, respaldando el desarrollo y explotación de los proyectos mineros en etapas subsiguientes.

^{1*} Trabajo de Grado

^{2**} Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Programa académico. Director: Mario García Gonzalez. Geólogo P.hD. Codirector: Benjamin José Torres Coronado. Ing.

Abstract

Title: GEOLOGICAL MODEL PROPOSAL FOR COAL MINING PROJECTS HD5-091 (LANDÁZURI) AND SGB-09101 (CIMITARRA), IN SANTANDER, COLOMBIA.^{4*}

Author(s): Carlos Fernando Gómez Fernández⁵

Key Words: Mining Title; Coal; Geological Model; Landázuri; Cimitarra

Description:

A geological model is proposed for the mining projects HD5-091 (Landázuri) and SGB-09101 (Cimitarra) in the business practice mode with the company American Geophysical Group S.A.S. The main objective is to enrich the geological knowledge in relation to the exploration and exploitation of coal in the study area.

The process included the review of bibliographic information, a geological survey and characterization of the coal seams. With these, a geological model was established and the distribution of the coal seams in the mining titles was mapped, identifying sites for the development of mine entrances.

The geological model describes rocks of the Middle and Upper Umir Formation, with interbedded coal seams and evidence of faults associated with the La Salina Faults. The seams with the highest potential were located in block 2 (M210-270) of the HD5-091 title. One mantle in SGB-09101 was excluded due to inadequate thickness and geometry.

The coals were classified according to the ASTM standard, mainly as medium to low volatile bituminous, with some samples categorized as semi-anthracite, finding that both titles are economically viable, so 9 mine entrances are proposed for the HD5-091 title and 3 for the SGB-09101 title sector, supporting the development and exploitation of mining projects in subsequent stages.

^{4*} Degree Work

⁵Faculty of Physicochemical Engineering. School of Geology. Academic program. Director: Mario García Gonzalez. Geologist P.hD. Co-director: Benjamin José Torres Coronado. Ing.

Introducción

La explotación de carbón es una de las mayores actividades económicas de Colombia, entre 2012 y 2020, la producción anual de Colombia promedió 83,9 millones de toneladas, ubicándolo como el principal productor de carbón en América Latina, el 11° a nivel mundial y el 5° mayor exportador de carbón del mundo (Bustamante *et al.*, 2022). Sin embargo, la falta de conocimiento geológico detallado del territorio, así como las problemáticas sociales y ambientales relacionadas a la minería ilegal, dificultan el desarrollo de proyectos extractivos responsables (Fundación Universitaria del Área Andina [Areandina], 2019).

Reconociendo la importancia del conocimiento geológico para la elaboración de proyectos mineros de exploración y explotación que cumplan lo requerido dentro del marco normativo vigente para la minería legal en Colombia, se espera que el desarrollo de la presente investigación, mediante la modalidad de práctica empresarial con la empresa American Geophysical Group S.A.S, aporte a la construcción de un modelo geológico para los Títulos Mineros HD5-091(Landázuri) y SGB-09101(Cimitarra) en el departamento de Santander, que proporcione la información necesaria para aportar a la exploración y explotación de carbón en la región.

1. Planteamiento del problema

La minería de carbón en Colombia ha sido fundamental, tanto por sus aportes macroeconómicos y sus contribuciones al desarrollo de las regiones productoras, como por su participación en la matriz energética nacional y su uso como insumo en industrias como la papelera, cementera, química, siderúrgica y de producción de coque (Bustamante *et al.*, 2022).

A pesar de ser uno de los principales ejes de la matriz económica de Colombia, la actividad extractiva de minerales aún afronta muchos retos, entre ellos la falta de tecnificación, evidenciada en alarmantes cifras que indican que entre el 50% al 80% de la actividad extractiva en Colombia corresponde a minería ilegal (Juárez, 2016).

Uno de los factores que ha impedido la tecnificación de la minería en Colombia es la falta de conocimiento geológico del territorio, ya que para el año 2017 el estado de la cartografía geológica de Colombia a escala 1:100.000 cubría un 71,66% del país (Observatorio de Control y Vigilancia de las Finanzas y las Políticas Públicas de Colombia, 2018), donde se ha encontrado que estudios geológicos detallados y especializados en áreas como la geofísica, la geoquímica y el potencial de recursos del subsuelo continúan siendo un área de estudio incipiente en Colombia (Servicio Geológico Colombiano [SGC], 2014).

En los últimos años, para profundizar en el conocimiento geocientífico de hidrocarburos, se han elaborado modelos geológicos que permitan comprender las características geológicas de una zona (ej: estratigrafía-tectónica), con el fin de determinar la influencia en las propiedades petrofísicas de las rocas y en las características al momento de la producción de hidrocarburos (Pirela & Ramírez, 2017).

Ante la problemática expuesta, y considerando la importancia del conocimiento geocientífico integral del territorio en la generación de nuevas estrategias para el desarrollo económico, social y político de Colombia (SGC, 2022), así como del potencial minero en carbón de los municipios de Cimitarra y Landázuri (Gómez *et al.*, 2008) se plantea la siguiente pregunta de investigación ¿Qué aportes puede dar un modelo geológico durante las etapas de exploración y explotación de carbón en los Títulos Mineros HD5-091(Landázuri) y SGB-09101(Cimitarra)? la cual será respondida en el presente proyecto mediante la modalidad de práctica empresarial con la empresa American Geophysical Group S.A.S, donde el modelo geológico que se propondrá para el área de estudio se realizará mediante un levantamiento geológico detallado, que permita identificar el número de mantos de carbón, calidad, espesores y disposición, con el fin de desarrollar y ubicar las labores de exploración (galerías exploratorias) requeridas en esta fase y que se constituirán en el insumo para el cálculo del recurso y dar viabilidad del proyecto.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Elaborar una propuesta del modelo geológico general de los proyectos mineros bajo los títulos HD5-091 (Landázuri) y SGB-09101 (Cimitarra) con el fin de aportar al conocimiento geológico para la exploración y explotación de carbón en el área de estudio.

2.2 Objetivos Específicos

Consultar la información bibliográfica relacionada a la geología y proyectos mineros del área de estudio

Elaborar un levantamiento geológico a detalle y la caracterización de los mantos de carbón presentes en la zona.

Establecer una relación entre la información de las columnas estratigráficas levantadas, con el análisis de laboratorio de muestras y los trazados inferidos de mantos.

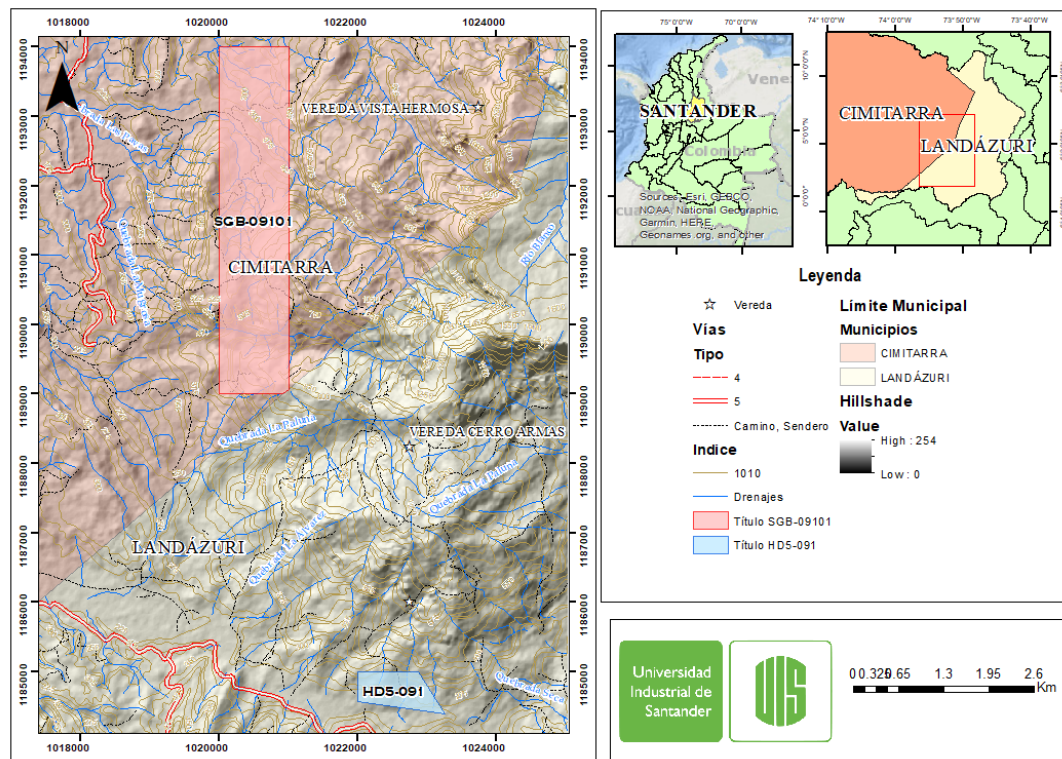
Identificar y definir las coordenadas de puntos con potencial para el desarrollo de bocaminas para exploración y futura explotación de carbón en la zona de interés.

3. Localización

Los proyectos mineros bajo los títulos SGB-09101 y HD5-091 se ubican en los municipios de Cimitarra y Landázuri respectivamente (Figura 1), al sur-occidente del departamento de Santander, siendo parte del piedemonte occidental de la Cordillera Oriental, en el sector del Valle Medio del Magdalena (VMM) (Gómez *et al.*, 2008).

Figura 1.

Mapa de localización de los Títulos Mineros HD5-091 y SGB-09101 (Plancha 150IB - 150ID Escala 1:25:000). Modificado de: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2013).



Nota. Localización a escala departamental y municipal del área de estudio.

El municipio de Cimitarra cuenta con una extensión de 3.165,60 Km² está organizado en casco urbano y la zona rural, donde está última consiste de 35 veredas, siendo la Vereda Vista Hermosa, la más cercana al Título Minero SGB-09101. El municipio hace parte de la vertiente occidental de la Cordillera Oriental, con un relieve suavemente ondulado, con alturas entre los 50 a 200 msnm. Hidrográficamente, pertenece a la cuenca del Río Magdalena y el casco urbano se ubica dentro de la microcuenca del Río Guayabito, que a su vez hace parte de la subcuenca del río Carare, destacándose el río Guayabito y localmente las quebradas La Mugrosa y Las Pavas. La precipitación media anual es de 2690 mm y el clima se clasifica entre Húmedo y Cálido Semi Húmedo, con una temperatura promedio de 27.5°C (Consejo Municipal Para la Gestión del Riesgo de Desastres [CMGRD], 2012; Gómez *et al.*, 2008).

El municipio de Landázuri se ubica en la Serranía de los Yariguies, con un área de 603,84 km², conformado por su cabecera Municipal, ocho corregimientos y sesenta y dos veredas, donde la Vereda Cerro Armas es la más cercana al Título Minero HD5-091. Su relieve es montañoso debido a su ubicación en la Cordillera Oriental, con un rango de alturas entre los 500 a 2000 msnm. Su clima es templado y oscila entre los 18°C a 24°C y una precipitación media anual es de 2000 a 3000 mm. La hidrografía de esta región consiste en los sistemas hidrográficos de las cuencas del Río Carare y del Opón, pertenecientes a la Gran Cuenca del Río Magdalena, donde localmente se observan las quebradas La Paluna, La Alvarez y Quebrada Seca (Gómez *et al.*, 2008; CMGRD, 2016).

4. Marco Teórico

4.1. Carbón

El carbón es una mezcla heterogénea de plantas remanentes y minerales asociados que sufrieron cambios físicos y químicos originados por procesos biológicos y geológicos, que se compone químicamente por oxígeno, hidrógeno, carbono, nitrógeno, azufre y materia mineral (Piñeres *et al.*, 2009).

El carbón se forma por la descomposición, compactación, sedimentación y endurecimiento de plantas prehistóricas, donde procesos como la combustión, gasificación, licuefacción, pirólisis, entre otros, producen una transformación de la materia orgánica en *lignito*, carbón *sub-bituminoso*, carbones *bituminosos* y *antracitas* (Barrera *et al.*, 2014; Piñeres *et al.*, 2009).

Los **macerales** son componentes individuales de materia orgánica que constituyen al carbón y son reconocibles con el microscopio óptico y se describen a partir de su forma, color, reflectancia, dureza, relieve de pulido, etc (Perez *et al.*, 2013). Según sus propiedades ópticas y composición química se pueden encontrar tres grupos macerales: vitrinita, liptinita, e inertinita (Piñeres *et al.*, 2009).

La **vitrinita** es un grupo de macerales de color gris y reflectancia media, derivado de material húmico de las plantas que ocurre en el carbón como capas relativamente puras o lentes de variado espesor, en fases continuas de grandes masas de carbón o como masas amorfas que rellenan cavidades, poros y fisuras. Su composición elemental depende del rango y oscila en un 77-96 % para el carbono; 6-1 % para el hidrógeno y 16-1 % de oxígeno, teniendo un origen derivado de plantas herbáceas y arborescentes (Gómez, 2015).

Los macerales del grupo de la **Liptinita** son de color gris oscuro a negro en inmersión en aceite, a veces algo transparente (baja reflectancia), siendo más oscuro que la vitrinita, que deriva de organismos específicos, como algas y bacterias o de partes de plantas superiores constituidas por sustancias no humificables, además de incluir algunos productos generados durante la carbonificación. Este grupo se caracteriza por tener un mayor contenido de hidrógeno (Perez *et al.*, 2013).

El grupo de la **Inertinita** consiste de aquellos macerales más escasos en los carbones, siendo prácticamente inertes a lo largo de los procesos de carbonización. Además, presentan un escaso contenido de hidrógeno y muy ricos en carbono, con máxima reflectividad y densidad (Subsecretaría de Minería de México, 2017).

4.2. Clasificación de carbones

La Norma ASTM (American Society for Testing and Materials) estableció un método de clasificación de carbones basado en parámetros obtenidos mediante el análisis próximo y el poder calorífico, estandarizando a nivel mundial términos como poder calorífico (PC), materia volátil (MV), humedad (Hd), ceniza (Cz) y carbono fijo (CF), de esta manera el el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (norma NTC 4196), adopta en su totalidad los lineamientos expuestos en la Norma americana ASTM D388-12, en lo que respecta a la clasificación de carbones (Barrera *et al.*, 2014).

La norma ASTM D388-12 (Tabla 1) clasifica a los carbones en dos rangos: *Bajo* y *Alto*, siendo los primeros aquellos cuyo poder calorífico superior, en base húmeda, es menor a 26,8MJ/kg (11500 BTU/lbm), en este rango están los carbones denominados **sub-bituminosos** y los **lignitos**. Mientras tanto, los carbones de alto rango son aquellos con un poder calorífico mayor a 26,8MJ/kg, como es el caso de los carbones **bituminosos** y **antracita** (ASTM, 2012).

Tabla 1.

Clasificación General de Carbón Mineral según norma ASTM D388-12. Tomado de: ASTM, (2012).

Tipo	CF (%)	MV (%)	PC (BTU/lbm)	PC (MJ/kg)	PC (kcal/kg)
Antracita	86-98	2-14			
Bituminoso (hulla)	69-78	14-31	10500-14000	24,5-32,6	5800-7780
Sub-bituminoso			9500-10500	22,1-24,5	5290-5860
Lignito y Turba			6300-8300	14,6-19,3	3500-4600

Nota. Valores de parámetros utilizados en la clasificación general de carbón mineral.

Los **análisis fisicoquímicos** y **petrográficos** básicos para las muestras de carbón en la fase de exploración y desarrollo de un proyecto minero en Colombia requieren del siguiente procedimiento propuesto por el Instituto Colombiano de Geología y Minería [Ingeominas], (2010):

1. Seleccionar y preparar las muestras a analizar mediante la técnica de cuarteo, que permite retener y descartar las muestras según su peso, para así identificar aquellas que se usarán para petrografía, análisis químico de cenizas o de fusibilidad de cenizas
2. Luego del cuarteo, se envía cada muestra a los siguientes estudios de laboratorio: análisis, humedad total, humedad residual, humedad de medición, humedad de equilibrio, materia volátil, cenizas, carbono fijo (por diferencia), poder calorífico, azufre total, gravedad específica verdadera, índice de molienda Hardgrove (y

humedad a la que se determine), carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno (por diferencia), formas de azufre e índice de hinchamiento (FSI). Se les practicará preparación de la muestra para análisis, humedad residual, materia volátil, carbono fijo (por diferencia), cenizas, poder calorífico, azufre total y gravedad específica verdadera.

3. Con los resultados de los análisis previos se pueden realizar ensayos específicos y tecnológicos, tales como dilatometría, plastometría, reflectancia media de la vitrina y análisis de macerales para carbones coquizables o de reactividad, porosidad, permeabilidad y elementos traza.

4.3. Carbón en Colombia

Colombia posee las mayores reservas de carbón en Latinoamérica, ya que cuenta con una disponibilidad de 6508 Mton de este recurso y a nivel mundial es el quinto exportador de carbón térmico (Barrera *et al.*, 2014). En el país se producen dos tipos de carbón: térmico y metalúrgico. El primero se usa como fuente de combustible, principalmente para la generación de electricidad y representa más del 90% de la producción del país desde el año 2012, mientras que el carbón metalúrgico se usa como reductor químico en algunos procesos industriales, como la siderúrgica, donde suele usarse su forma procesada, denominada coque, para producir acero y es mayoritariamente exportado (Bustamante *et al.*, 2022).

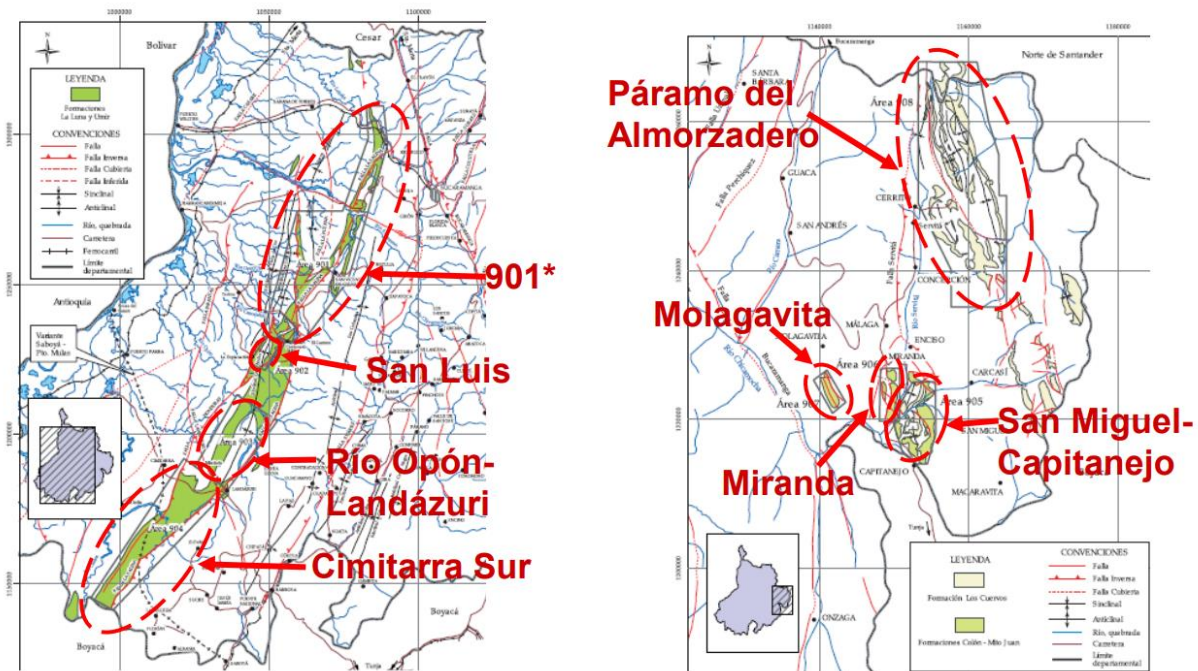
En el Mapa de Regiones, Zonas y Subzonas con carbón en Colombia propuesto por Pulido (1999), el país se puede dividir en cinco grandes regiones carboníferas: Atlántica, Central, Pacífica, Borde Llanero y Amazónica, de manera que el departamento de Santander hace parte de la región carbonífera central.

La *Zona Carbonífera de Santander* produce principalmente carbón térmico, metalúrgico y antracítico, abarcando las unidades carboníferas compuestas por la formación Umir hacia el occidente y la formación Colón-Mito Juan, Catatumbo, Los Cuervos y Carbonera. De esta manera, cuenta con un potencial total de carbón explotable de 464 MM de toneladas, lo que la convierte en la región que tiene el octavo potencial más grande de carbón explotable en Colombia (Arthur D.Little, 2010).

La Zona Carbonífera correspondiente al departamento de Santander se divide en 8 subregiones (Figura 2), según Arthur D.Little (2010), quien las clasifica de la siguiente forma: 1. Vanegas - San Vicente de Chucurí - Río Cascajales; 2. San Luis; 3. Río Opón - Landázuri; 4. Cimitarra Sur; 5. San Miguel - Capitanejo; 6. Miranda; 7. Molagavita y 8. Páramo del Almorzadero.

Figura 2.

Subregiones de la Zona Carbonífera de Santander.



* 901: Vangeas-San Vicente de Chucurí-Río Cascajales

Nota. Localización de las subregiones de la Zona Carbonífera de Santander.

Modificado de: Arthur D.Little (2010).

Los municipios de Cimitarra y Landázuri, lugares donde se ubican los títulos mineros del proyecto, hacen parte de las subzonas Cimitarra Sur y Río Opon Landázuri:

La Subzona **Cimitarra Sur** incluye terrenos pertenecientes a los municipios de La Belleza, Sucre, El Peñón, Bolívar y Landázuri, donde parte de su área total cubre la plancha 150-ID del IGAC en escala 1:25.000. Para esta subzona se ha identificado a la Formación Umir como la portadora de mantos de carbón explotables, con un 56% de los mantos de carbón con un espesor mayor a 1 metro, que corresponden a carbones bituminosos de bajos a alto volátiles con propiedades aglomerantes (índice de hinchamiento superior a 4), lo cual los clasifica como

carbones metalúrgicos para la producción de coque o para mezclas con otros carbones para mejorar su calidad (Arthur D.Little, 2010; Monroy & Sandoval, 2014).

La Subzona del **Río Opón Landázuri** comprende los municipios Landázuri, Cimitarra, Vélez y Santa Helena del Opón, cubriendo las planchas 150-ID y 150-IB del IGAC en escala 1:25.000. Al igual que la subzona de Cimitarra Sur, la formación con mantos de carbón explotables es Umir, donde la secuencia carbonífera se ubica en la parte media y superior de esta. Estos mantos de carbón presentan en la base carbones semiantracíticos para uso térmico dado su gran poder calorífico superior y carbones bituminosos con propiedades aglomerantes que los clasifican como metalúrgicos para la producción de coque (Arthur D.Little, 2010; Monroy & Sandoval, 2014).

5. Marco Geológico

5.1. Estratigrafía

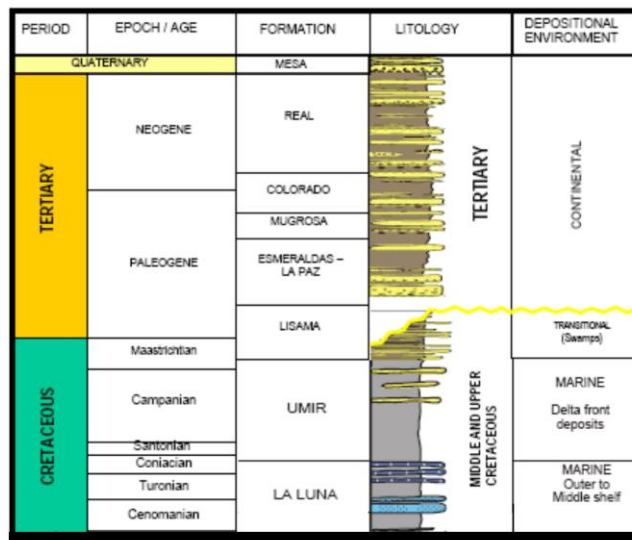
El Valle Medio del Magdalena se localiza entre las Cordilleras Central y Oriental, su área está delimitada al norte por la Falla de Bucaramanga y al Sur por la Falla de Cambao, donde su geología consiste en una cuenca intracordillera basculada hacia el oriente, con tendencia homoclinal, perturbada por algunos pliegues y fallas, resultado de eventos tectónicos distensivos y compresivos (Mojica & Franco, 1990). Con respecto a su estratigrafía, el VMM consiste de un basamento ígneo metamórfico de edades desde el Precámbrico al Paleozoico Inferior, el cual se encuentra suprayacido por una secuencia de rocas sedimentarias que van desde el Jurásico Tardío hasta el reciente (Jiménez *et al.*, 2016).

Esta cuenca comprende parte de los departamentos de Boyacá, Cundinamarca, Antioquia y Santander (Agencia Nacional de Hidrocarburos [ANH], 2012). Para este último, hacia los

municipios de Cimitarra y Landázuri, sectores donde se ubican los títulos mineros SGB-09101 y HD5-091 respectivamente, Gómez *et al.*, (2008) describe las siguientes unidades geológicas que abarcan del Cretácico Superior al Cuaternario, y se mencionan a continuación, de la más antigua a la más reciente:

Figura 3.

Columna Estratigráfica Generalizada para el Valle Medio del Magdalena en el sector del área de estudio.



Nota. Modificado de: Rolón, (2004).

La **Formación La Luna (Ksl)** es una secuencia sedimentaria, considerada como la roca generadora de hidrocarburos por excelencia del VMM, que subyace en contacto neto con la Formación Umir, con una edad que abarca desde el Turoniano inferior al Coniaciano y se subdivide formalmente en tres Miembro, descritos de base a tope: *Miembro Salada* de composición calcárea, en el cual afloran shales calcáreos, duros, negros, laminados en capas delgadas; *Miembro Pujamana* de shales grises a negros, calcáreos y finamente estratificados,

que varían localmente a una composición predominantemente arcillosa; y el *Miembro Galembó*, también calcáreo y compuesto principalmente por shales calcáreos duros, negros con concreciones discoidales, e intercalaciones de calizas arcillosas (Gómez *et al.*, 2008; Sarmiento *et al.*, 2015). Otros autores, como Moreno (2019), asignan un rango formacional a los Miembros de la Formación La Luna, estableciendo edades del Turoniano Superior para las Formaciones Salada y Pujamana, y una edad del Coniaciano-Santoniano para la Formación Galembó.

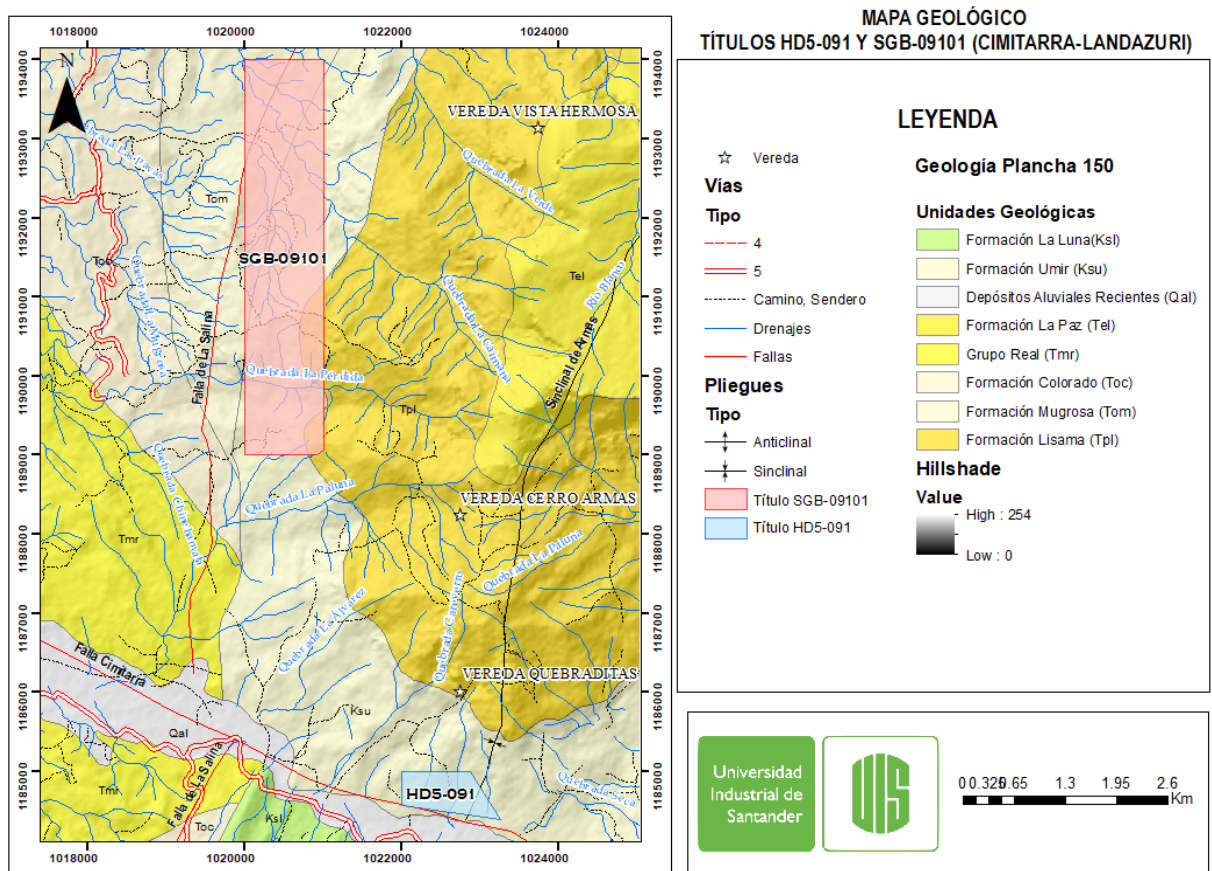
La **Formación Umir (Ksu)** es una unidad carbonífera que aflora en el área de estudio hacia el Sinclinal de Armas, descrita por Royero & Clavijo (2001) como shales grises a negros, carbonosos, micáceos, con concreciones ferruginosas, arcillolitas y lodolitas carbonosas, con nódulos ferruginosos e intercalaciones de areniscas y limolitas, junto con la presencia de capas de carbón entre 0,60 a 5,00 m de espesor, siendo las principales rocas que componen los Títulos Mineros de este proyecto (Figura 4). La **Formación Umir** se encuentra sobre la Formación La Luna en contacto transicional (Acevedo *et al.*, 2008), mientras que el contacto superior con la Formación Lisama es concordante (Royero & Clavijo, 2001).

Gómez *et al.*, (2008) describe los siguientes segmentos en el municipio de Landázuri: Un *primer segmento* con 51 m de espesor de capas medias de lodolitas negras intercaladas con capas medias de litoarenita de grano muy fino. El *segundo segmento* consiste de una secuencia de 134 m de espesor, compuesto por paquetes de arcillolita en capas delgadas, laminación plano paralela y contactos ondulados, intercaladas con capas medias de lodolitas silíceas, seguido de capas de sublitoarenitas de grano muy fino ligeramente calcárea, donde este segmento se caracteriza por la presencia de mantos de carbón, con espesores de 10 cm a 1,5 m. El *tercer segmento* presenta un espesor de 91 m, siendo una secuencia de capas delgadas de arcillolitas y lodolitas silíceas intercaladas con capas de sublitoarenitas de grano muy fino, con ocurrencia de mantos de carbón

de geometría tabular, de 10-20 cm de espesor. El *segmento final* tiene un espesor de 43 metros, donde afloran paquetes gruesos de lodolitas síliceas intercaladas con sublitoarenitas síliceas, seguidas de una secuencia de capas gruesas a muy gruesas de sublitoarenitas síliceas y un paquete de de capas delgadas a medias de lodolitas calcáreas y en el tope del segmento se presenta una secuencia de sublitoarenitas de grano fino a medio, donde este segmento tiene un contacto transicional rápido con la Formación Lisama.

Figura 4.

Mapa Geológico de los Títulos SGB-09101(Cimitarra) y HD5-091 (Landázuri) y - (Plancha 150 - Cimitarra Escala 1:100.000).



Nota. Modificado de Gómez et al., (2008).

La edad de la **Formación Umir** fue reportada por Morales (1958) como del Cretácico superior, (Maastrichtiano-Campaniano) debido a la presencia de *Siphogenerinoides cretácea*, *S. bramlettei* y *Ammobaculites Colombianus*. Su ambiente ha sido descrito como transicional con un depósito de corrientes activas y constantes, de otra manera la presencia de carbón sugiere un ambiente de dominio fundamentalmente estuarino (Gómez *et al.*, 2008).

La **Formación Lisama (Tpl)** aflora en el Sinclinal de Armas, abarcando parte del segmento sureste del Título Minero SGB-09101 (Figura 4). La unidad está compuesta por limolitas abigarradas con intercalaciones de areniscas verdes y pardas, hacia el tope presenta algunas capas delgadas de carbón (Royero & Clavijo, 2001), que varía localmente de areniscas de grano fino a medio grises y rojizas en capas medias intercaladas con limolitas a areniscas de grano medio intercaladas con lodolitas (Valle, 2018). La unidad presenta un contacto normal y transicional con la Formación Umir que la infrayace y el contacto superior con la formación La Paz se trata de una discordancia regional (Eoceno tardío) y discordancia angular (Montaño *et al.*, 2016; Valle, 2018). Su ambiente es de origen fluvial con eventos periódicos de inundación y exposición bajo fuerte influencia estuarina (Gómez *et al.*, 2008).

La **Formación La Paz (Tel)** aflora en el núcleo del Sinclinal de Armas, localmente consiste de conglomerados de guijos y areniscas matriz soportada, siendo su contacto inferior con la Formación Lisama una inconformidad regional y discordancia angular, mientras que el contacto superior con la Formación Esmeraldas es concordante (Gómez *et al.*, 2008; Valle, 2018). Su edad ha sido descrita a partir de su posición estratigráfica como del Eoceno Superior (Morales, 1958; Moreno, 2019). Su ambiente de sedimentación es de origen continental (Valle, 2018).

La **Formación Mugrosa (Tom)** aflora al noroeste del Título Minero SGB-09101 (Figura 4) y está compuesta en su parte inferior por areniscas gris verdosas, de grano fino a medio, con

intercalaciones de lodolitas grises a azulosas y algunas capas de areniscas conglomeráticas. La parte media consta de shales moteados con algunas intercalaciones de arenisca, hacia la parte superior hay lodolitas moteadas, fosilíferas (Clavijo y Royero, 2001). El contacto inferior de la Formación Mugrosa es discordante con la Formación Esmeraldas y el contacto superior con la Formación Colorado es concordante y su edad se considera del Eoceno superior a Oligoceno inferior (Casadiego *et al.*, 2010; Gómez *et al.*, 2008). Su ambiente de sedimentación es de sistemas fluviales de llanuras aluviales y ríos meándricos (Valle, 2018).

La **Formación Colorado (Toc)** es una secuencia de arcillas de color gris claro, púrpura y tonalidades rojas con intercalaciones de cuarzo arenitas a subarcosas de grano medio en capas tabulares, la cual está en contacto concordante con la infrayacente Formación Mugrosa y es discordante con el suprayacente Grupo Real. Se le asigna una edad del Oligoceno superior y un ambiente de depósito de llanura costera deltaica (Gómez *et al.*, 2008; Valle, 2018).

El **Grupo Real (Tmr)** aflora en el área de estudio en capas gruesas de areniscas líticas intercaladas con niveles tabulares a lenticulares de conglomerados con guijos y gravas de rocas sedimentarias, cuarzo lechoso y chert negro y ocre; e intercalaciones de capas gruesas de arcillolita limosa gris verdosa y su contacto con la infrayacente Formación Colorado es discordante (Gómez *et al.*, 2008; Valle, 2018). La sedimentación de esta unidad corresponde al Mioceno Superior, su material depositado es proporcionado por el levantamiento y erosión de la Serranía de San Lucas y el Macizo de Santander (Beltrán, 2012).

Los depósitos del Cuaternario presentes en el área de estudio consisten en **Depósitos Aluviales Recientes (Qal)**, los cuales corresponden a bloques de limolitas calcáreas, chert, arcillolitas y areniscas pertenecientes a las formaciones: La luna, Umir, Lisama, La paz y Esmeraldas, los cuales han sido transportados por las corrientes principales como el río Guayabito,

mientras que hacia el municipio de Cimitarra comienza la alternancia de los depósitos de piedemonte y la llanura de inundación del río Magdalena (Qal) (Gómez *et al.*, 2008; Valle, 2018).

5.2. Tectónica

El VMM se define como una depresión tectónica asimétrica y limitada por dos frentes cabalgantes de vergencia opuesta, (Córdoba *et al.*, 1996). Sus límites fueron definidos por (Barrero *et al.*, 2007) al Norte con el sistema de fallas de Espíritu Santo; al Noreste, el sistema de fallas Bucaramanga-Santa Marta; al Sureste, el sistema de fallas Bituima y La Salina y al Oeste, la Serranía de San Lucas y la Cordillera Central. De esta manera, al occidente tiene un borde pasivo, instalado en parte sobre materiales de la Cordillera Central, mientras que por la Cordillera Oriental, la deformación se incrementa de manera continua y cambia a un margen compresional (Mojica & Franco, 1990).

El VMM está basculado hacia el este, afectado por pliegues y fallas (Mojica & Franco, 1990), que para el sector donde se ubican los Títulos Mineros objeto de estudio se presentan las siguientes estructuras:

La **Falla La Salina** hace parte de un sistema de fallas con rumbo regional SSW – NNE, que en el área de estudio corresponde a un sistema de cabalgamientos regionales con vergencia occidental, que pone en contacto rocas del Cretáceo Superior, como las Formaciones La Luna y Umir, con rocas del Mioceno – Oligoceno de las Formaciones Colorado, Mugrosa y Grupo Real. También, se ha descrito esta falla como parte de las estructuras cabalgantes pertenecientes a un sistema de serie de pares anticlinal-sinclinal, asimétricos y en-echelon a lo largo del borde occidental de la Cordillera Oriental, como se evidencia en el área de estudio al configurar el flanco occidental del Sinclinal de Armas (Gómez *et al.*, 2008; Mojica & Franco, 1990; Valle, 2018).

La **Falla de Cimitarra** hace parte de un juego de fallas normales, poco espaciadas a lo largo del borde oriental de la Cordillera Central, que puede tener un componente importante de movimiento dextral y ser antitéticas de la Falla de Bucaramanga (Mojica & Franco, 1990). En esta predomina el rumbo deslizante con desplazamiento lateral izquierdo, afectando rocas de las secuencias terciarias, además de presentar alto ángulo de buzamiento y una edad asociada a la orogenia andina (Gómez *et al.*, 2008).

Con respecto a pliegues, **el Sinclinal de Armas** está configurado por el sistema de fallas de La Salina (Valle, 2018) y corresponde a un sinclinal asimétrico, con un eje en dirección N30°E, en el núcleo de la estructura se encuentran rocas de la Formación La Paz y en su flanco occidental afloran rocas de las formaciones Lisama y Umir (Monroy & Sandoval, 2014).

6. Metodología

El desarrollo del presente proyecto bajo la modalidad de práctica empresarial con la empresa American Geophysical Group S.A.S utilizará siguiente metodología, según los parámetros acogidos por la Agencia Nacional de Minería de Colombia Mediante Resolución No. 299 del 13 de junio de 2018, bajo los términos de referencia propuestos en el inciso de diseño y planeamiento de la explotación para proyectos a cielo abierto (Agencia Nacional de Minería, 2018).

La metodología que se emplea para la elaboración a cabalidad del proyecto de grado en modalidad de práctica empresarial se dividirá en las siguientes cuatro fases:

- **Fase 1:** Pre-campo.
- **Fase 2:** Levantamiento Geológico en Campo.
- **Fase 3:** Trabajo de oficina y elaboración de informe final.

6.1. Fase 1: Precampo

Las actividades de pre campo inician con la delimitación del área de estudio, definida bajo el área de los títulos mineros HD5-091 (Landázuri) y SGB-09101 (Cimitarra), para luego realizar una recopilación y revisión bibliográfica del estado del arte por medio de visitas a la zona de estudio, uso de herramientas SIG, como Google Earth y lectura de la información existente que ayuden a conocer de manera general las ubicaciones y la geología presente en los títulos mineros anteriormente mencionados.

Con la caracterización inicial de la zona se procede a definir los puntos de interés a visitar durante la fase de campo, para lo cual será necesario elaborar los mapas base de la zona mediante el uso de insumos de fuentes de información libres como lo son el IGAC y el Servicio Geológico Colombiano. Como resultado de esta fase se deben entregar la recopilación bibliográfica de la zona, la caracterización geológica a partir de la literatura consultada y los mapas de localización y geología general que se utilizarán durante el levantamiento de campo.

6.2. Fase 2: Levantamiento Geológico en Campo

La Fase 2 abarca todas las actividades relacionadas a la adquisición de la información geológica pertinente al estudio en el área de interés. Las actividades a realizar durante esta fase consisten de una caracterización de la geología general, mediante el levantamiento de columnas estratigráficas de la zona, así como del trazado inferido de los mantos de carbón y adquisición de muestras para su posterior análisis en laboratorio. Para la identificación de y toma de muestras de carbón se seguirán los parámetros de descripción, muestreo y clasificación de carbón propuestos por Ingeominas (2010).

Los resultados del levantamiento geológico se verán expresados en descripciones de la geología general de la zona, así como de los mantos de carbón identificados, los cuales serán

representados mediante cartografía geológica y columnas estratigráficas. En el caso de las muestras de carbón, estas deberán ser seleccionadas mediante la técnica de cuarteo, para así ser posteriormente enviadas a laboratorio.

6.3. Fase 3: Trabajo de oficina y elaboración de informe final.

La fase final del proyecto consiste en el trabajo de oficina, el cual se enfocará en el procesamiento de la información obtenida durante la fase de levantamiento geológico en campo. Esto significa que se analizarán los datos litológicos y estructurales evidenciados en la cartografía geológica y columnas estratigráficas que se entregarán, lo cual sentará las bases del modelo geológico a proponer para la zona.

Las muestras de carbón seleccionadas para el análisis serán enviadas al laboratorio Interlabco S.A.S, con el fin de caracterizar los carbones de los Títulos Mineros mencionados. Los parámetros a analizar mediante las pruebas de laboratorio serán humedad total, cenizas, materia volátil, carbono fijo, contenido de azufre, poder calorífico, hinchamiento y peso específico, siguiendo los estándares definidos en Norma ASTM D388-12 (ASTM, 2012) con el fin de clasificar los carbones con base a su comercialización.

Con la información geológica encontrada y la interpretación de los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio se procede a construir el modelo geológico para la zona, junto con la identificación de posibles bocatomas para exploración minera de carbón en el área de estudio. Las conclusiones y productos de esta fase deberán ser compilados en el libro final de este proyecto, que a manera de anexos incluirá la cartografía geológica, columnas estratigráficas y resultados de las pruebas de laboratorio.

7. Resultados

7.1 Geología local

A partir de la consulta de la información bibliográfica presente sobre el área de estudio, se encontró que la geología que enmarca la zona corresponde, a nivel regional, al Valle Medio del Magdalena, con unidades principalmente sedimentarias, que abarcan desde el Cretácico Superior al Cuaternario y una tectónica asociada a la Falla La Salina y el Sinclinal de Armas. Además, se ha encontrado un alto potencial en recursos de hidrocarburos para esta región.

Considerando las características regionales encontradas para el área de estudio, se procedió a identificar zonas de mayor interés para la investigación. Por lo tanto, se escogió enfocar el proyecto a la caracterización, análisis y estimación de recursos de la Formación Umir, ya que corresponde a la unidad de mayor cobertura en los sectores correspondientes a ambos títulos mineros.

7.1.1. Título minero HD5-091

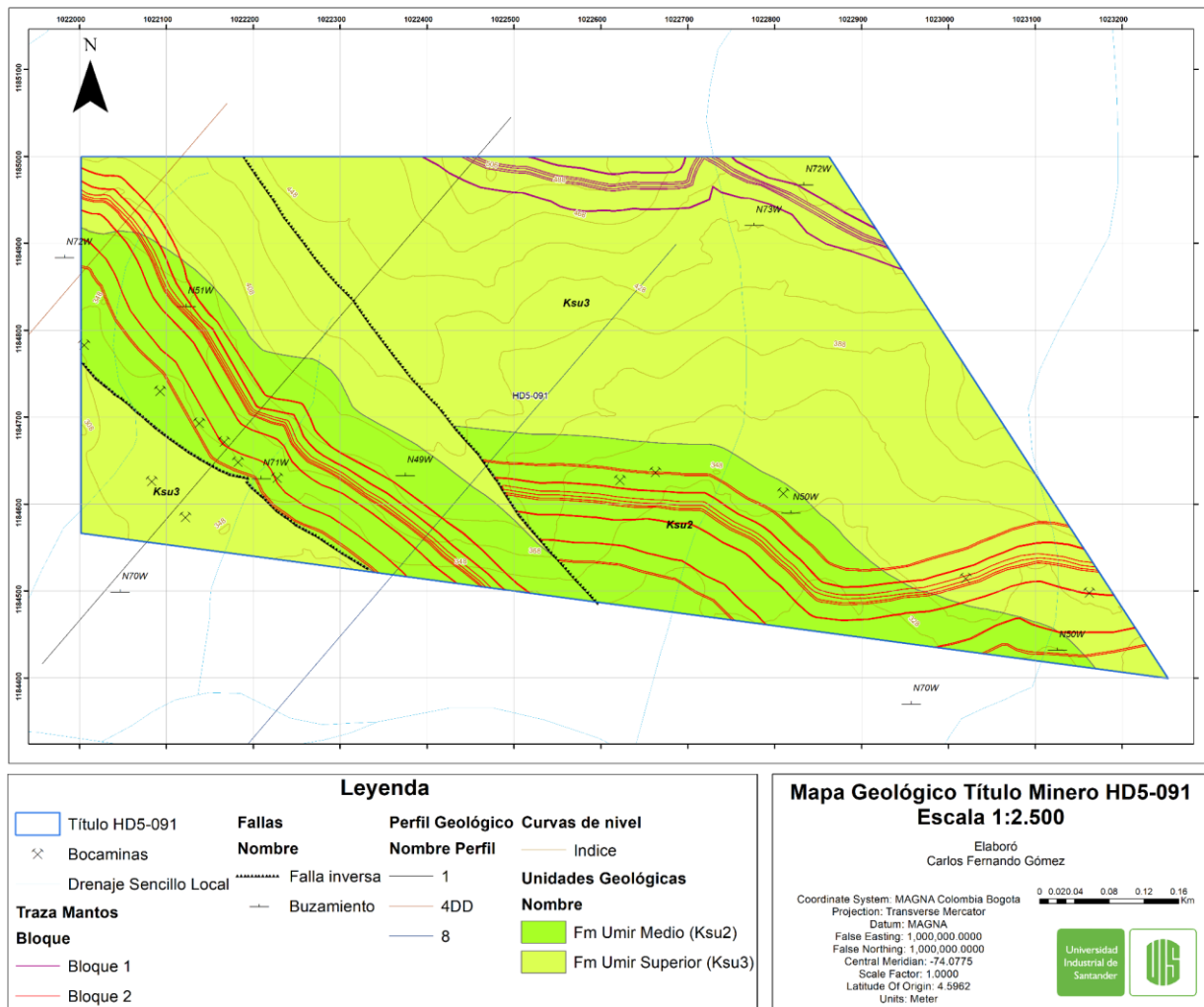
La Formación Umir en este título minero se divide en dos bloques, según los mantos de carbón identificados. El bloque uno considera 4 mantos (310, 320, 330 y 340) al suroeste El bloque dos consiste de 7 mantos (210, 220, 230, 240, 250, 260 y 270) y . Debido a las condiciones de acceso y topografía de la zona, el bloque uno fue descartado durante la fase exploratoria, mientras que los mantos 240 y 250 son los de mayor interés, debido a sus espesores, baja alteración y poca variabilidad en la zona, lo cual fue corroborado en Riveros, (2023).

En los mantos del bloque 1 aflora la Formación Umir Medio (Ksu2) (Figura 5), de la cual se tomaron datos estructurales, identificando dos fallas inversas que delimitan los miembros superior y medio de la Formación Umir. Estructuralmente, los mantos 240 y 250 presentaron

rumbos entre N49W a N71W hacia el suroeste del área de estudio, mientras que el rumbo hacia el costado sureste de los mantos mantuvo una tendencia de N50W.

Figura 5.

Mapa geológico del título minero HD5-091



Nota. Unidades geológicas locales, traza de mantos, perfiles geológicos y bocaminas.

Con respecto a la estratigrafía a escala local, se levantaron 5 columnas estratigráficas (Apéndice A- Figuras A1, A2, A3, A4) del miembro medio de la Formación Umir, donde las coordenadas de localización de cada una se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2

Localización de columnas estratigráficas título minero HD5-091

Nombre	X inicial	Y inicial
Columna 1	-73.877065	6.266185
Columna 2	-73.875887	6.265928
Columna 3	-73.874931	6.265336
Columna 4	-73.872829	6.265874
Columna 5	-73.877584	6.266554

Nota. Coordenadas de localización de columnas estratigráficas.

En la Figura 6 se muestra la columna estratigráfica 1 para este título minero, mientras que la descripción de cada una se presenta a continuación:

- **Columna 1:** Intercalaciones lodosas y presencia de mantos de carbón, con orientación predominante de N26E/20.
- **Columna 2:** Intercalaciones lodosas, junto con cintas y mantos de carbón. La orientación reportada fue de N62W/30NE.
- **Columna 3:** Continuidad de la secuencia, con intercalaciones lodosas, además de cintas y mantos de carbón. Orientación de N60W/30NE.
- **Columna 4:** Intercalaciones lodosas y cintas y mantos de carbón. N70W/45NE.
- **Columna 5:** Levantamiento de columna estratigráfica local, para correlacionar información. Se registra orientación N20W/22NE.

Complementario al mapa geológico del título minero y levantamiento de columnas estratigráficas, se presentan los perfiles geológicos (1, 4DD y 8) (Apéndice A Figuras B1, B2, B3), de los cuales se pudo evidenciar lo siguiente:

- **Perfil 1:** El manto 240 presenta una litología de arcillolitas intercaladas con los niveles carboníferos. En el caso del manto 250, predomina una composición de lodolitas, mientras que en el manto 260 se da un cambio a limos y arcillas.
- **Perfil 4DD:** En este perfil se evidencia una secuencia de lutitas que están intercalando los mantos de carbón 240 y 250.
- **Perfil 8:** Se encuentra una secuencia de lodolitas que están intercalando los mantos 240 y 250. En este caso, el manto 240 aflora de nuevo hacia el tope de la secuencia.

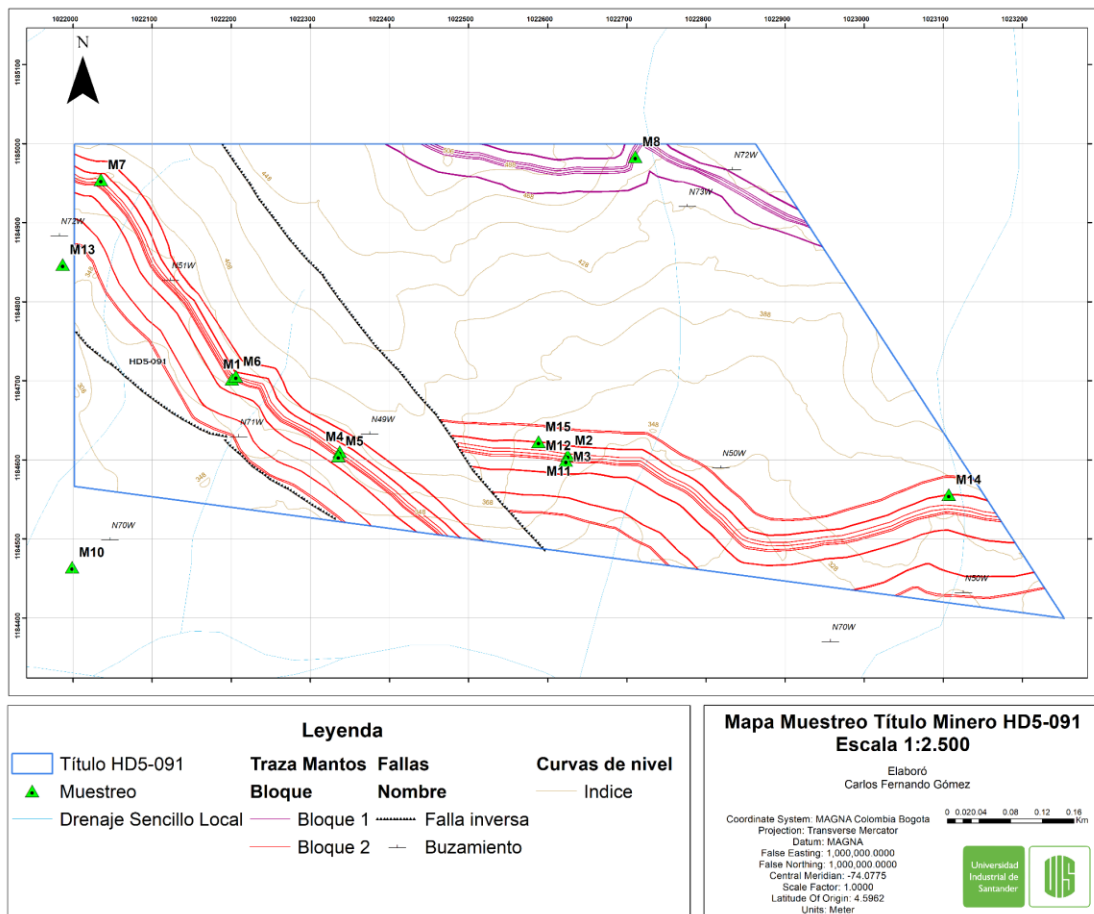
7.1.1.1. Bocaminas de la fase exploratoria. Al analizar las características geológicas encontradas para el área de estudio, se plantearon establecer 9 bocaminas en los mantos del bloque 2 (Figura 5), identificando 2 sectores para la fase exploratoria, en los cuales se consideraron la localización geográfica de los mantos de interés y los acuerdos existentes entre la empresa y las comunidades que habitan el sector.

El primer sector abarca la faja sureste de la Formación Umir Medio, definiendo 6 bocaminas que permitan identificar a fondo los recursos presentes en los mantos 240 y 250. Por otro lado, el segundo sector plantea 3 bocaminas que permitan comprender los recursos de los mantos de interés hacia la franja suroeste del título minero.

7.1.1.2. Calidad de los carbones. Para evaluar la calidad de los carbones pertenecientes al bloque 2 del título minero, se llevó a cabo un muestreo en varios puntos del área de estudio, recolectando un total de 15 muestras (Figura 7), de las cuales la M13, M15, M9 y M10 no fueron consideradas dentro del presente análisis, debido a su ubicación geográfica con respecto al área evaluada. También, se aclara que la norma utilizada para clasificar los carbones fue la ASTM (Apéndice B).

Figura 7.

Mapa muestreo del título minero HD5-091



Nota. Localización geográfica de las 15 muestras (M1-M15) recolectadas.

Para el sector 1 se consideraron las siguientes muestras: M1, M4, M5, M6 y M7; las cuales permitieron caracterizar los carbones de los mantos 240 y 250 para esta región del título minero. De esta manera, se clasificaron los carbones de la muestra M1 como meta antracita, mientras que las muestras M4 y M5 consisten de antracitas y las muestras M6 y M7, se clasifican como carbón bituminoso bajo volátil y semiantracita respectivamente.

El segundo sector abarca las muestras M2, M3, M11, M12 y M14, de las cuales se pudieron analizar los mantos 240 a 260. Además, la muestra M12 permitió caracterizar el manto 320, con el propósito de analizar los tipos de carbones pertenecientes a los mantos del bloque 1. La clasificación encontrada se describe a continuación: En la categoría de Bituminoso bajo volátil se encuentran las muestras M2 y M3; las muestras M12 y M14 se clasificaron como semi-antracitas y la muestra M11 se definió como una antracita.

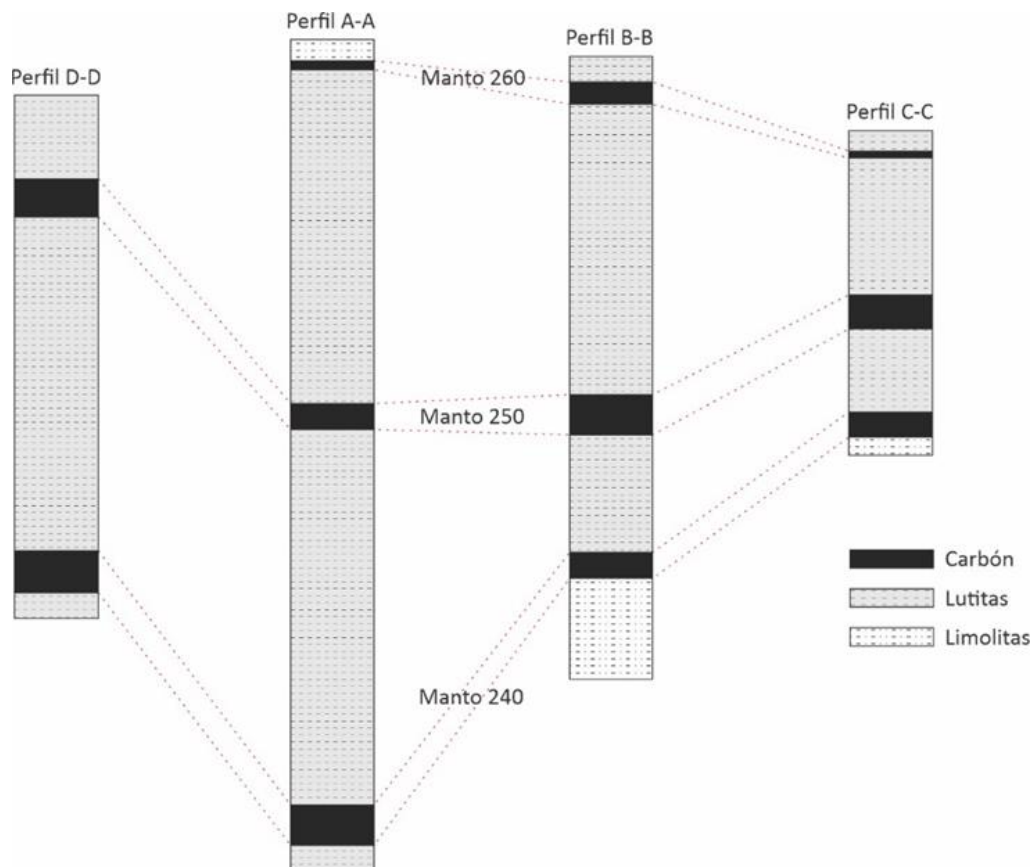
7.1.1.3. Estimación de recursos. La estimación de recursos se realizó a partir de los parámetros expuestos en el Estándar Colombiano de recursos y Reservas Minerales ECRR (Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales [CCRR], 2018). Para este título y como se expresó previamente, se consideraron los mantos 240 y 250 por su extensión, espesor y tipo de carbón (Bituminoso a semi-antracita), que junto con el estudio elaborado por Jaramillo *et al.*, (2022) para el título HD5-091 permitieron evaluar el potencial de recursos de los mantos mencionados.

Desde un análisis superficial, se encontró que hay una variación composicional en los segmentos de la Formación Umir Medio, que junto con las características asociadas al fallamiento presente el área de estudio, dificulta elaborar una estimación acertada a partir de los datos tomados en campo, problemática que también fue evidenciada en Riveros, (2023).

7.1.1.4. Cálculo de recursos. Para el cálculo de recursos se tuvieron en cuenta cuatro trincheras presentes en el área de estudio de este título minero (Jaramillo et al., 2022; Riveros, 2023). En este caso, solo se evaluaron los mantos 240 y 250 por sus características y potencial previamente expuestos. Además, en la Figura 8, se puede apreciar que el manto 260 presenta variaciones en su espesor hacia el sector suroeste, por lo tanto se optó por no considerarlo para esta etapa del proyecto.

Figura 8

Correlación columnas estratigráficas



Nota. Tomado de: Riveros, (2023).

En el cálculo de los recursos es necesario contar con los datos de área (A), promedio de espesor del manto (e), densidad del carbón (p) e inclinación del manto (ϕ) para obtener el valor del recurso calculado (R). Relacionando cada uno de estos parámetros se presenta la siguiente ecuación para el cálculo de recursos:

$$R = (A * e * p) / \text{Cos}\phi$$

Las especificaciones de los mantos 240 y 250 fueron tomadas de Riveros, (2023) y Jaramillo *et al.*, (2022), donde se compilan en la Tabla 2, con la respectiva distinción de recursos indicados e inferidos.

Tabla 3

Especificaciones de los mantos 240 y 250 para el cálculo de recursos

Manto	Espesor (m)	Área (A)	Buzamiento	Densidad (p)	Tipo	Recurso calculado (R)	Total (Ton)
240	1.2	31605,51	33	1,3	Indicados	58,789	167,830
250	2	37367,78	27	1,3		109,041	
240	1.2	114323,16	35	1,3	Inferidos	217,718	1,454,447
250	2	434541,6	24	1,3		1,236,729	

Nota. Modificado de Riveros, (2023).

7.1.2. Título Minero SGB-09101

Se identificaron 4 mantos de carbón en este título minero, que fueron denominados como M10, M11, M16 y M17. Estos se extienden diagonalmente desde el centro de la zona de estudio hasta el costado izquierdo inferior, donde los títulos M16 y M17 son los de mayor área.

Las rocas que afloran en la zona donde se ubican los mantos corresponden principalmente a la Formación Umir Superior, y en menor medida a las unidades geológicas Formación Umir Medio y Formación La Lisama (Figura 9).

Estructuralmente, los datos de este tipo fueron limitados, donde solo se puede rescatar el trazo regional de la Falla La Salina al noroeste del título minero, la cual ha sido previamente descrita como un sistema de cabalgamientos regionales con vergencia occidental.

Para el análisis estratigráfico de este título, se levantaron 6 columnas estratigráficas (Apéndice A Figuras C1, C2, C3, C4, C5) en campo, donde la primera fue dividida en dos segmentos. Las coordenadas de localización geográfica de dichas columnas se presentan a continuación (Tabla 4):

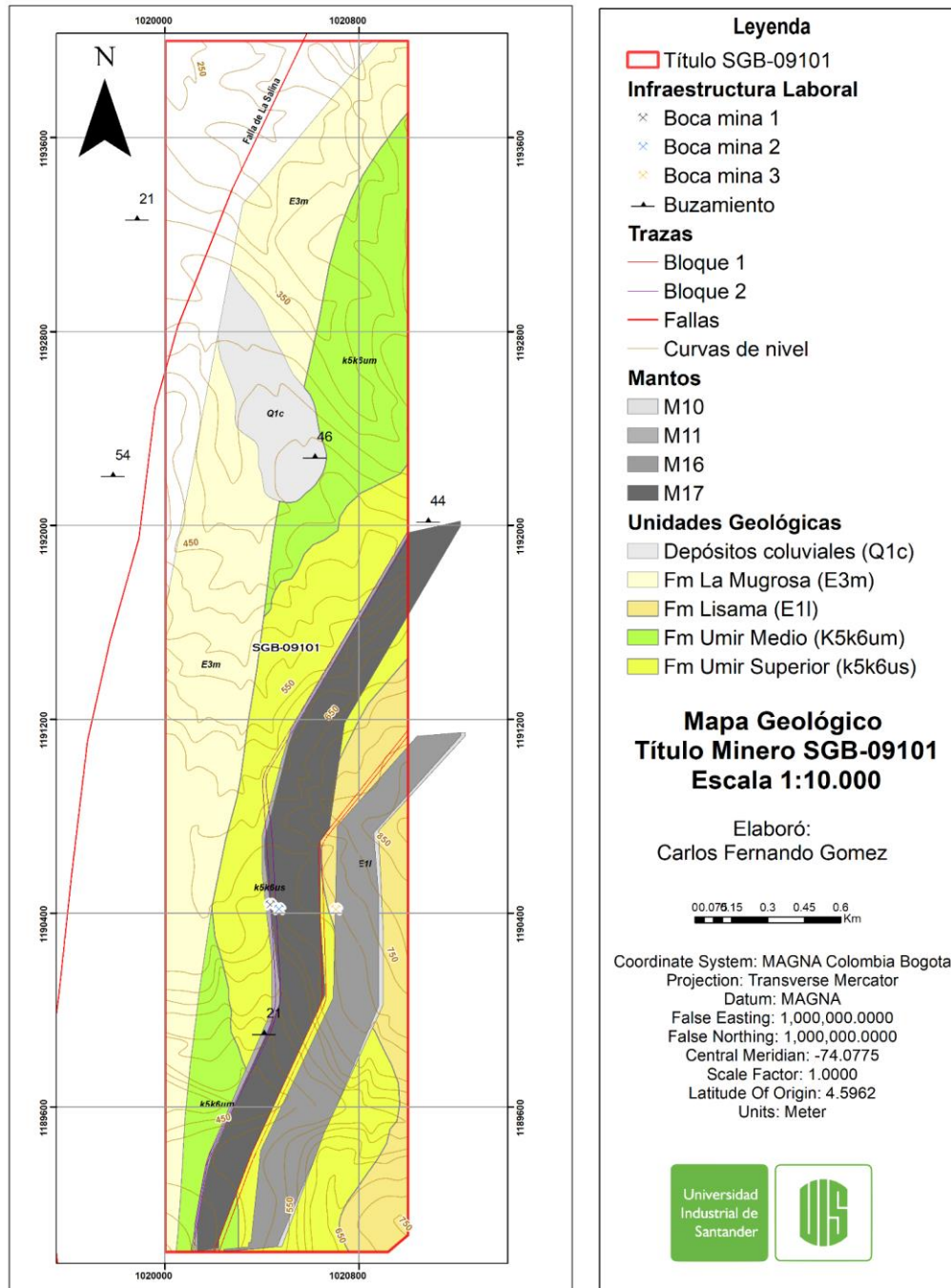
Tabla 4*Localización de columnas estratigráficas título minero SGB-09101*

Nombre	X inicial	Y inicial	X final	Y final
Columna 1 segmento 1	4900971.0494	2254819.14583	4900992.0494	2254939.14583
Columna segmento 2	4901227.43116	2254819.14583	4901242.43116	2254899.14583
Columna 2	4901026.20411	2255184.22525	4901076.20411	2255264.22525
Columna 3	4901328.56762	2255846.50374	4901378.56762	2255886.50374
Columna 4	4901355.84915	2255465.24859	4901405.84915	2255515.24859
Columna 5	4901291.98272	2256537.20697	4901316.98272	2256637.20697
Columna 6	4901573.16922	2257153.55508	4901623.16922	2257228.55508

Nota. Coordenadas de localización de columnas estratigráficas

Figura 9.

Mapa geológico del título minero SGB-09101



Nota. Unidades geológicas, trazas de mantos y bocaminas del título minero SGB-09101.

Para analizar la estratigrafía de la zona, se presenta la descripción de la Columna 1 Segmento 2 (Figura 10), de la cual se encontró lo siguiente:

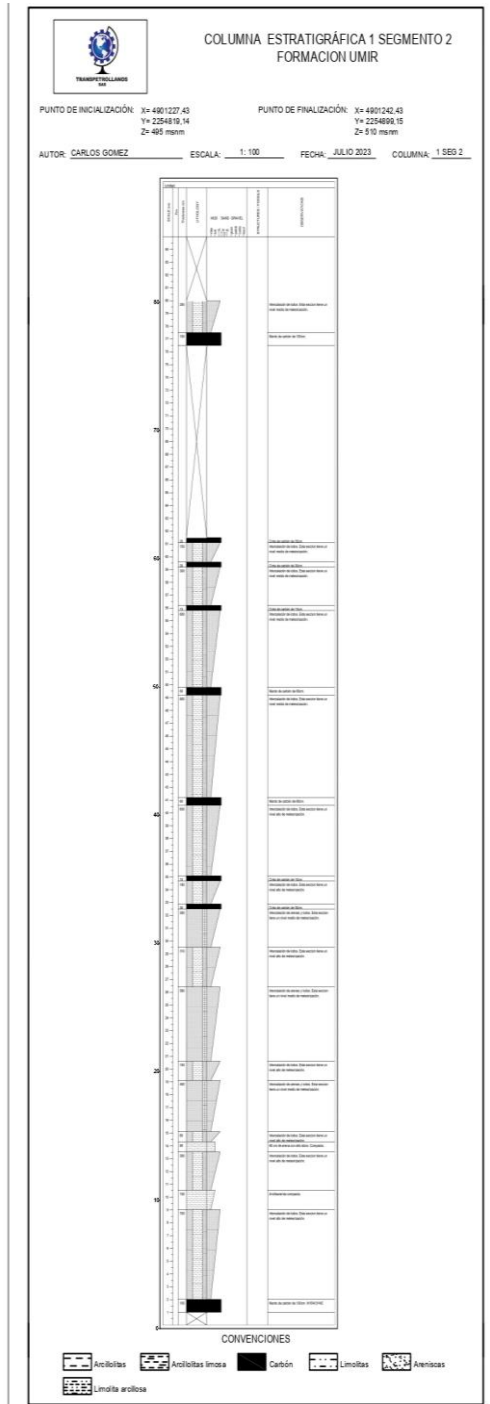
A la base de esta columna aparece un manto de carbón de 100 cm con dato estructural de N15W/31NE. Luego, le sigue un paquete de lodos altamente meteorizados intercalados con arcilloarenitas compactas y areniscas compactas con alto porcentaje de sílice. Esta sección tiene un espesor de 1860 cm. Continuando, está un paquete de arenas y lodos altamente meteorizados intercalados con un espesor total de 1190 cm.

Posteriormente, se encuentra una sección con un espesor total de 2858 cm, la cual consiste de una intercalación de lodos medianamente meteorizados interpuestos con cintas y mantos de carbón con espesores variados. Las primeras dos cintas de carbón tienen un espesor de 30 y 10 cm respectivamente, seguidas de dos mantos de carbón de 60 cm cada uno, para luego encontrar 3 cintas de carbón de 13, 30 y 25 cm. Continuando, se encontró una sección que no pudo ser descrita, ya que se encontraba cubierta por vegetación/elementos antrópicos.

Finalmente, hacia el tope de la columna aparece un manto de carbón de 100 cm, seguido de un nivel de intercalaciones de lodo medianamente meteorizado, que culmina con una sección cubierta al tope de la columna que no pudo describirse.

Figura 10

Columna estratigráfica 1 segmento 2



Nota. Columna estratigráfica 1 segmento 2 Formación Umir.

7.1.2.1. Bocaminas de la fase exploratoria. Luego de analizar la estratigrafía de la zona, así como las características de los mantos de carbón encontrados, se plantearon realizar 3 bocaminas para este título minero (Figura 9). La bocamina 1 se localiza en el manto M11, cerca del límite establecido con el manto M17, que es el lugar donde se establece la bocamina 2 en el manto M17. La tercera bocamina se ubica en el manto M16.

En el caso del manto M10 no fue posible definir una bocamina, por varios motivos, entre ellos las condiciones topográficas de este sector del área de estudio. Además, como se mencionó al plantear las bocaminas del título minero HD5-091, se deben llegar a acuerdos entre la empresa y las comunidades que residen y/o se encuentran cerca del lugar, por lo que no fue posible garantizar dicho acercamiento para establecer una bocamina para este manto.

7.1.2.2. Calidad de los carbones. Se identificaron 4 mantos de carbón para el título minero SGB-09101 (M10, M11, M16, M17), de los cuales se tomaron 13 muestras (Apéndice B) con el fin de clasificar los carbones en esta zona, siguiendo los parámetros establecidos por la norma ASTM. La localización de los puntos muestreados se puede observar en la Figura 11. También, se muestran las coordenadas de las muestras tomadas en la Tabla 4. La interpretación y análisis de los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio se complementó con la información presentada en Sandoval & Cuello, (2022).

Para el caso del manto M10 se recolectaron las muestras WM130, MS-362 y MS-363, y los resultados de los análisis químicos exhiben un rango de clasificación entre bituminosos bajo a alto volátil. Además, se observa un índice de hinchamiento de 71/2, lo que sugiere que este carbón posee propiedades aglomerantes.

Tabla 5.*Localización muestras título minero SGB-09101*

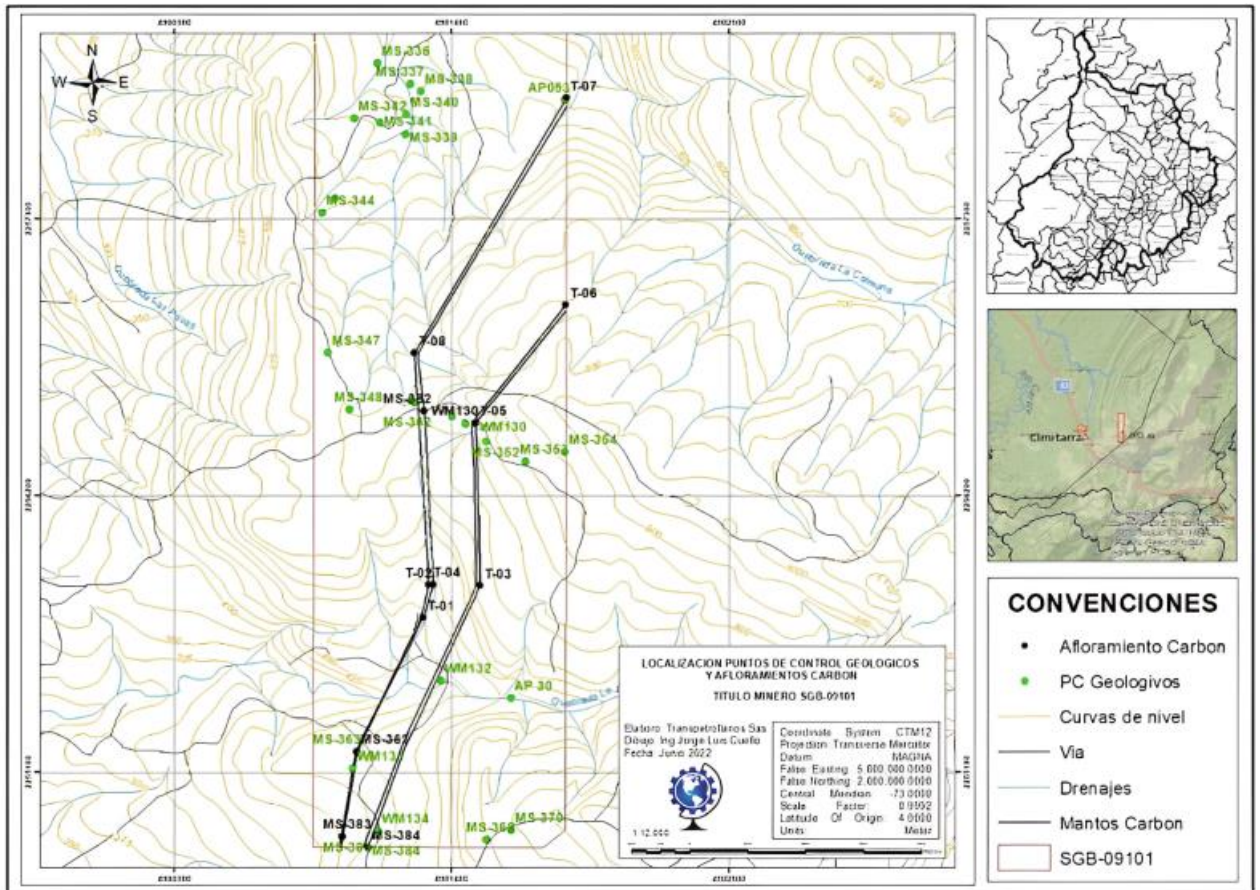
COORDENADAS			
CÓDIGO	X	Y	REF
WM130	4901496,548	2256489,482	87041
MS-362	4901291,788	2256537,873	87042
MS-363	4901026,167	2255184,346	87043
MS-383	4900967,511	2254847,697	87044
MS-384	4901070,354	2254805,513	87045
T-01	4901287,838	2255716,438	87046
T-02	4901328,605	2255847,142	87047
T-03	4901515,709	2255844,258	87048
T-04	4901309,995	2255848,888	87049
T-05	4901496,548	2256489,482	87050
T-06	4901854,123	2256958,743	87051
T-07	4901855,836	2257780,826	87052
T-08	4901252,981	2256767,887	87053

Nota. Coordenadas de localización de las muestras tomadas.

Por otro lado, en el manto M11, se tomaron las muestras MS-383 y MS-384, de las cuales se encontró que la clasificación de estos carbones es bituminosos bajo volátil, con propiedades aglomerantes. Para los mantos M16 y M17, se identificaron las muestras T-01, T-02, T-03, T-04, T-05, T-06, T-07 y T-08, donde los análisis químicos revelaron que estos carbones encajan en la clasificación de Bituminosos Bajo Volátil. Asimismo, se observó un índice de hinchamiento de 6, lo que sugiere que este tipo de carbón también posee propiedades aglomerantes.

Figura 11

Mapa de muestreo del título minero SGB-09101



Nota. Tomado de: Sandoval & Cuello, (2022).

7.1.2.3. Estimación de recursos. La estimación de recursos se llevó cabo aplicando la misma metodología que en el título minero HD5-091, es decir, se consideraron los parámetros establecidos dentro del Estándar Colombiano de recursos y Reservas Minerales ECRR (CCRR, 2018), por lo que de nuevo se tuvo en cuenta el espesor de los mantos, evitando la variabilidad de los mismo. Por lo tanto, el manto M10 fue descartado en esta estimación, ya que su dirección de buzamiento hacia el norte no era la más apropiada para esta etapa del proyecto.

De esta manera, se considera que los mantos de carbón de este título minero están presentándose principalmente en las rocas de la Formación Umir Medio y Superior, lo que permite identificar las zonas de mayor potencial económico en el área de estudio.

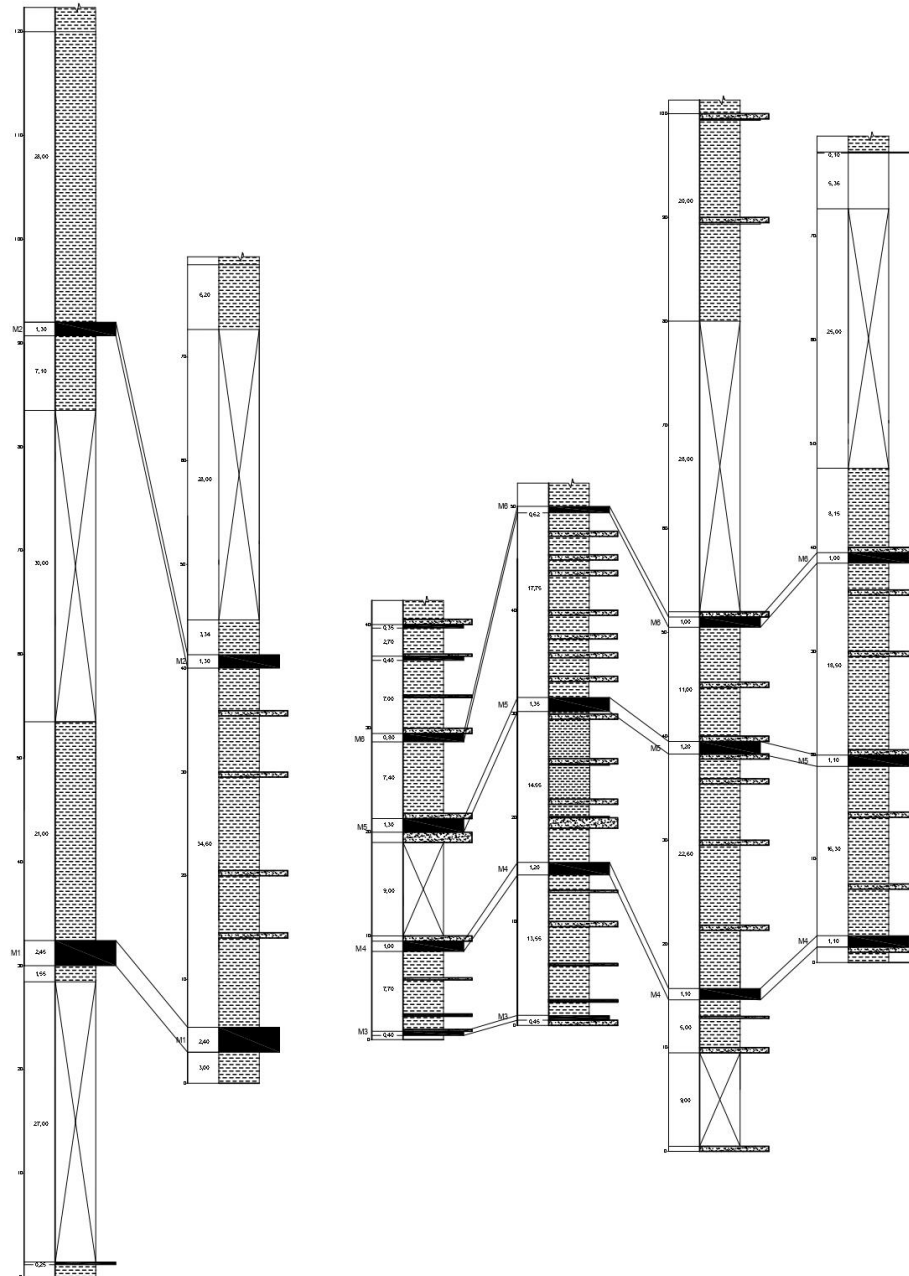
7.1.2.4 Cálculo de recursos. De los 4 mantos de carbón encontrados para esta zona, solo se tomaron los mantos M11, M16 y M17, ya que el manto M10 fue descartado por los motivos mencionados en el inciso anterior. La correlación de las columnas estratigráficas correspondientes a las trincheras se observa en la Figura 12, donde se evidencia la dirección de buzamiento del manto M10, motivo por el cual no se utilizó durante esta etapa del proyecto.

El cálculo de recursos se llevó a cabo utilizando la misma metodología propuesta para el título minero HD5-091, donde se relacionaron el área, promedio de espesor del manto, densidad del carbón e inclinación del manto para obtener los recursos calculados de cada uno de los mantos identificados.

Los resultados de este cálculo se condensan en la Tabla X, donde se encuentran los valores inferidos e indicados para los tres mantos considerados en esta etapa del proyecto. Sin embargo, por las limitaciones y protección de datos de la empresa, para este título minero no se muestran algunas especificaciones de los mantos, por lo que dicha información se puede corroborar con los datos presentados en Sandoval & Cuello, (2022).

Figura 12

Correlación columnas estratigráficas



Nota. Correlación de las columnas estratigráficas del título minero SGB-09101.

Tabla 6*Cálculo de recursos del título minero SGB-09101*

Manto	Tipo	Recurso calculado (R)	Total (Ton)
M11	Indicados	4373187.523	8457580.674
M16		1739157.628	
M17		2345235.523	
M11	Inferidos	6122462.533	11840612.944
M16		2434820.679	
M17		3283329.732	

Nota. Modificado de Sandoval & Cuello, (2022).

8. Discusión

La geología de los títulos mineros HD5-091 (Landázuri) y SGB-09101 (Cimitarra) está fuertemente asociada a los eventos geológicos que dieron origen a las rocas de la Formación Umir, principalmente Umir Medio y Superior. Los ambientes que dieron origen a estas unidades se pueden asociar a un yacimiento de edad cretácico superior, asociado a un paleoambiente de lagoon, con influencia mareal, que contó con las condiciones óptimas para la sedimentación de materia orgánica, generando mantos cuyo espesor alcanza los 2.8 metros en el sector del título SGB-09101 y los 1.8 metros para el título HD5-091 (Jaramillo *et al.*, 2022; Sandoval & Cuello, 2022).

A partir de los resultados encontrados, se puede decir que la Formación Umir en la zona de estudio presenta una composición predominante de paquetes de lodos y arenas meteorizados intercalados con carbones de espesores variables, desde cintas de 10 a 30 cm, llegando a encontrarse mantos de carbón de espesores de hasta 100 cm. Sin embargo, hay zonas que no pudieron ser caracterizadas por limitaciones de tiempo y acceso a la zona, principalmente en el título minero SGB-09101, por lo que no se descarta que existan otros puntos con potencial económico dentro del área de estudio.

Los resultados de la fase exploratoria y caracterización de los mantos de carbón indican que por la clasificación de semi antracitas de bituminosos bajo a alto volátil de los carbones muestreados, así como la geometría de los mantos, los proyectos de los títulos mineros HD5-091 (Landázuri) y SGB-09101 son económicamente viables. Por lo tanto, se requiere complementar la información y elaborar los estudios necesarios para continuar con las siguientes etapas del proyecto según lo planteado por el modelo geológico encontrado.

9. Conclusiones

El modelo geológico de los títulos mineros HD5-091 (Landázuri) y SGB-09101 (Cimitarra) corresponde a las rocas y estructuras asociadas a las formaciones Umir Medio y Superior, encontrando una secuencia de lodos y areniscas meteorizados intercalados con mantos de carbón, evidenciando un fallamiento en la región asociado a las Fallas La Salina. De estas se pudieron identificar 11 mantos de carbón para el título HD5-091 y 4 para el SGB-09101.

Los mantos de carbón del título minero HD5-091 con mejor potencial de recursos fueron los encontrados en el bloque 2 (M210-270), donde los mantos 240 y 250 presentaron las mejores condiciones para la estimación y cálculo de recursos. En el caso del título SGB-09101, se identificaron 4 mantos con potencial de recursos, de los cuales solo se descartó el manto M10 por su espesor y geometría.

Los carbones de los títulos mineros HD5-091 y SGB-09101 fueron clasificados con la norma ASTM como bituminosos medio a bajo volátil y en menor medida como semi antracíticos.

Las toneladas indicadas e inferidas del título minero HD5-091 son 167,830 y 1,454,447 respectivamente. Por otro lado, las toneladas indicadas para el título SGB-09101 son 8457580.674 y las inferidas 11840612.944. A partir de la clasificación de las muestras y modelo geológico propuesto, se consideran ambos títulos como económicamente viables.

Se plantean 9 bocaminas para el título minero HD5-091 y 3 bocaminas para el sector del título minero SGB-09101, para dar continuidad con las fases de desarrollo y explotación de los proyectos mineros.

10. Recomendaciones

Se recomienda estudiar a fondo las zonas propuestas para las bocaminas, con el fin de complementar los recursos inferidos y poder desarrollar las siguientes fases del proyecto. También, se recomienda fortalecer la toma de datos estructurales que permitan caracterizar la tectónica presente en los títulos mineros y así determinar a mayor profundidad su influencia en los recursos presentes en esta región.

Referencias Bibliográficas

- Acevedo, R., Daza, D., Prince, M., Rojas, D., Sanchez, C., y Petróleos del Norte S.A.-Petrolatina energy Plc. (2008). *An integrated approach to the exploration of fractured reservoirs: A challenge in the Cretaceous rocks of the Middle Magdalena Valley Basin, Colombia*. ACGGP, Colombia, pp. 1-10.
- Agencia Nacional de Hidrocarburos [ANH]. (2012). *Cuenca Valle Medio Del Magdalena Integración Geológica de la Digitalización y Análisis de Núcleos*. ANH
- Agencia Nacional de Minería. (2018). *Resolución 299 de 2018*. Agencia Nacional de Minería. <https://www.anm.gov.co/?q=content/resoluci%C3%B3n-299-de-2018>
- American Society for Testing and Materials [ASTM]. (2012). *Standard Classification of Coals by Rank*. ASTM International. <https://www.astm.org/d0388-19a.html>
- Arthur D.Little. (2010). *Análisis de tecnología y estrategia de promoción para desarrollos de Gas Metano Asociado al Carbón (CBM) en Colombia*. Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH).
- Barrera, R; Pérez, J.F y Salazar, C. (2014). *Carbones colombianos: clasificación y caracterización termoquímica para aplicaciones energéticas*. Revista ION, 27(2), 43-54.
- Barrero, D; Pardo, A; Vargas, C y Martínez, J. (2007). *Colombian sedimentary basins: Nomenclature, Boundaries and Petroleum Geology, a New Proposal*. Agencia Nacional de Hidrocarburos -ANH - Edited and compiled by: ANH and B&M Exploration Ltda. Bogotá.
- Beltrán, D.C. (2012). *Estudio Sedimentológico comparativo entre las Formaciones Mugrosa y Colorado; y Modelamiento de los niveles de las Arenas A2 de la Formación Colorado en*

- el Campo Casabe en la Cuenca del Valle Medio del Magdalena de Colombia.* [Tesis de Pregrado]. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- Bustamante, P.E; García, R.E; Maya, O; Rodríguez, J.F y Aguilar, T. (2022). *Minería de Carbón en Colombia: Transformando el futuro de la industria.* Ministerio de Minas y Energía de Colombia, Bogotá D.C
- Casadiego, E; Ortiz, A; Meza, G., y Colegial, J. D. (2010). *Caracterización de la Continuidad Lateral y Vertical de las Areniscas Continentales: El caso de la Formación Mugrosa en el Campo Llanito y Casabe.* Boletín De Geología, 32(2).
- Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales [CCRR]. (2018). *Estándar Colombiano para el reporte público de resultados de exploración, recursos y reservas minerales.* ECRR. Agencia Nacional de Minería. https://www.anm.gov.co/sites/default/files/ecrr_espanol_version_final.pdf
- Consejo Municipal Para la Gestión del Riesgo de Desastres [CMGRD]. (2012). *Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres, Municipio de Cimitarra, Santander.* Alcaldía de Cimitarra. <https://repositoriocdim.esap.edu.co/bitstream/handle/123456789/23118/27471-1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Consejo Municipal Para la Gestión del Riesgo de Desastres [CMGRD]. (2016). *Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres, Municipio de Landázuri, Santander.* Alcaldía de Landázuri. https://landazurisantander.micolombiadigital.gov.co/sites/landazurisantander/content/files/000093/4614_pmgrd-landazuri.pdf
- Córdoba, F; Rolón, L; Buchelli, F & Suarez, M. (1996). *Provincia petrolífera del Valle Medio del Magdalena, Colombia.* Empresa Colombiana de Petróleos (ECOPETROL). p. 603- 605. Santafé de Bogotá.

- Fundación Universitaria del Área Andina [Areandina]. (2019). *Minería legal vs extracción ilegal en Colombia*. Área Andina. <https://www.areandina.edu.co/noticias/mineria-legal-vs-extraccion-ilegal-en-colombia>
- Gómez, L.A; Lancheros, J.A; 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*. Ingeominas, Bogotá D.C.
- Gómez, O. P. (2015). *Carbones. colombianos. Atlas petrográfico*. Tunja: Editorial UPTC.
- Subsecretaría de Minería de México. (2017). *Perfil de Mercado del Carbón*. Dirección General de Desarrollo Minero, México D.F.
- Instituto Colombiano de Geología y Minería [Ingeominas]. (2010). *El carbón Muestreo, análisis y clasificación de recursos y reservas*. 2da Edición, Ingeominas, Bogotá D.C ISBN: 978-958
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi [Igac]. (2013). *Hoja 150IB-Cimitarra y Hoja 150ID-Landázuri, Departamento de Santander, Escala 1:25.000*. [MAPA] IGAC.
- Jaramillo, M.O; Sandoval, M y Cuello, J. (2022). *Programa de Trabajos y Obras Contrato Único de Concesión HD5-091 para la Explotación de Carbón en el Municipio de Landázuri Departamento de Santander*. Agencia Nacional de Minería (ANM).
- Jimenez, G; López, O; Jaimes, L y Umaña, R.M (2016). *Variaciones en el estilo estructural relacionado con anisotropías de basamento en el Valle Medio del Magdalena*. Rev. acad. colomb. cienc. exact. fis. nat. vol.40 no.155 Bogotá Apr./June 2016 <https://doi.org/10.18257/raccefyn.293>
- Juárez, F. (2016). *La minería ilegal en Colombia: un conflicto de narrativas*. El Ágora U.S.B., 16(1), 135-146.

- Mojica, J. & Franco, R. (1990). *Estructura y Evolución Tectónica del Valle Medio y Superior del Magdalena*.- Geol. Colombiana 17, pp.41-64, 14 figs., 2 Tablas, Bogotá.
- Monroy, W.O & Sandoval, M. (2014). *Exploración y Evaluación de Carbones en el Área de Cimitarra sur y sur del área del Río Opón - Landázuri del Departamento de Santander*. Servicio Geológico Colombiano (Dirección de Recursos Minerales-Grupo de Investigación y Exploración de Recursos Minerales Energéticos Carbón), Bogotá.
- Montaño, P.C., Nova, G., Bayona, G., Mahecha, H., Ayala, C., Jaramillo, C., y De La Parra, F. (2016). *Análisis de secuencias y procedencia en sucesiones sedimentarias de grano fino: un ejemplo de la Formación Umir y base de la Formación Lisama, en el sector de Simacota (Santander, Colombia)*. Boletín de Geología, 38 (1): 51-72.
- Morales, L. G. (1958). *General geology and oil occurrences of the Middle Magdalena Valley, Colombia*. Symposium on the habitat of oil, American Association of Petroleum Geologists. 76p Tulsa.
- Moreno, G. (2019). *Mapa geológico del Valle Medio del Magdalena en los alrededores del puente El Tablazo, departamento de Santander*. En Estudios geológicos y paleontológicos sobre el Cretácico en la región del embalse del río Sogamoso, Valle Medio del Magdalena, dirección científica y edición de Fernando Etayo-Serna. Compilación de los Estudios Geológicos Oficiales en Colombia vol. XXIII. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Pérez, A; Borrego, A.G; Sierra, M y Martín, A. (2013). *Petrografía del Carbón*. Universidad de Granada - Instituto de Ciencia y Tecnología del Carbono (INCAR) - España
- Piñeres, J.L; Barraza, J.M y Blandón, A.S. (2009). *Constantes cinéticas de flotación del grupo maceral vitrinita de dos carbones colombianos*. Ingeniería e Investigación, 29(3), 29-35.

- Pirela, M. A y Ramírez, R. (2017). *Modelo geológico-estructural del yacimiento VENI del noroeste del lago de Maracaibo*. *Minería y Geología*, 33(1), 43-57.
- Pulido, O. (1999). *Mapa de Regiones - Zonas y Subzonas con Carbón en Colombia*. Ingeominas, Bogotá D.C.
- Riveros, W.D. (2023). *Propuesta de modelo geológico del proyecto minero HD5-091 de carbón, ubicado en Landázuri, Santander*. (Tesis de pregrado). Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Royero, J.M., y Clavijo, J. (2001). *Memoria Explicativa Mapa Geológico Generalizado Departamento de Santander, escala 1:400.00*. INGEOMINAS, Bogotá.
- Sandoval, M y Cuello, J.L. (2022). *Programa de Trabajos y Obras del Contrato Único de Concesión SGB-09101 para la Explotación de Carbón en el Municipio de Cimitarra Y Landázuri, Departamento de Santander*. Agencia Nacional de Minería (ANM).
- Sarmiento, G; Puentes, E & Sierra, C. (2015). *Estratigrafía y Petrofacies de la Formación La Luna en el Sinclinal de Nuevo Mundo, Valle Medio del Magdalena*. *Geología Norandina*. 12. 21-40.
- Servicio Geológico Colombiano [SGC]. (2014). *Ampliación del Conocimiento Geológico y del Potencial de recursos del Subsuelo de la Nación – Servicio Geológico Colombiano*. Sistema de Seguimiento de Proyectos de Inversión-Departamento Nacional de Planeación de Colombia.
- Servicio Geológico Colombiano [SGC]. (2022). *Plan estratégico del conocimiento geocientífico del territorio colombiano 2022-2032*. ISBN digital: 978-958-53993-4-1

Valle, L.C. (2018). *Cartografía Geológica, Caracterización y Cálculo de Recursos de Carbón del Título Minero EK7-151, Municipio de Landázuri Santander*. [Tesis de Pregrado]. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.