



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Evaluación de la variación vertical del contenido de azufre en mantos de carbón del municipio de Puerto Libertador, Córdoba.

Harlin Toncel Cujia

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de minas, Departamento de Materiales y Minerales
Medellín, Colombia
2019

Evaluación de la variación vertical del contenido de azufre en mantos de carbón del municipio de Puerto Libertador, Córdoba.

Harlin Toncel Cujia

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería – Recursos Minerales

Director (a):

Ph.D., Ciencias de la Tierra. Astrid Blandón

Línea de Investigación:

Explotación y Beneficio

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento Materiales y Minerales
Medellín, Colombia
2019

Agradecimientos

Esta tesis es el último paso de la Maestría en Ingeniería- Recursos Minerales de la Universidad Nacional de Colombia.

En primer lugar, quiero expresar mi gratitud a Astrid Blandón, directora de esta tesis, y gran mentora, quien desde el primer momento me apoyo y me acogió en el Laboratorio de Carbones, guiándome en el estudio del universo del carbón.

Así mismo a cada uno de mis familiares y amigos que me apoyaron durante estos años y no dejaron que cayera ante las adversidades que se presentaron.

Resumen

Este trabajo presenta la variación vertical del contenido de azufre en los diferentes plies de los mantos de carbón del municipio de Puerto Libertador Córdoba. Se seleccionaron 37 muestras aleatorias de 5 diferentes mantos, de las cuales, 15 muestras con el mayor contenido de azufre fueron sometidas a análisis próximo, humedad relativa, humedad superficial, humedad total, contenido de cenizas, carbono fijo, azufre total, poder calorífico, composición de macerales, formas de azufre, lavabilidad en medios densos, análisis petrográfico y ensayo de difracción de rayos X (DRX), lo anterior bajo los estándares de las normas ASTM e ISO. Los resultados arrojaron que en los diferentes mantos estudiados en el municipio de Puerto Libertador - Córdoba, el azufre se encuentra distribuido aleatoriamente y cada manto se comporta de forma diferente, denotando una obvia variación vertical del contenido de azufre en estos mantos, especialmente los mantos 1, 2 y 3. Con base a los resultados obtenidos se concluye que la variación vertical del azufre en mantos de carbón no necesariamente debe obedecer a la tendencia general que muestra la literatura, es decir una concentración de azufre que tiende hacia el techo del manto. Para disminuir el contenido de azufre total en estos mantos, se debe tener en cuenta la mejor opción de lavado en medios densos, se recomienda con una densidad de 1,6, ya que obtuvo mayor porcentaje de limpieza comparándolo con el de densidad de 1,4.

Palabras clave: Variación vertical, azufre, carbón, Municipio de Puerto Libertador.

Abstract

Evaluation of the vertical variation of the sulfur content in coal seams of the municipality of Puerto Libertador, Cordoba.

This paper presents the vertical variation of the sulfur content in the different layers of the coal layers of the municipality of Puerto Libertador Córdoba. 37 random samples of 5 different coal seam were selected, of which 15 samples with the highest sulfur content were subjected to a thorough analysis, relative moisture, surface moisture, total moisture, ash content, fixed carbon, total sulfur, calorific value, Composition of maceral, sulfur forms, washability in dense media, petrographic analysis and X-ray diffraction test (DRX), the above under the standards of ASTM and ISO. The results showed that in the different coal seams studied in the municipality of Puerto Libertador - Córdoba, the sulfur is distributed randomly and each coal seam behaves differently, which denotes an obvious vertical variation of the sulfur content in these coal seam, especially the coal seams 1, 2 and 3. Based on the results obtained, it is concluded that the vertical variation of sulfur in the coal layers must not necessarily be due to the general trend shown in the literature, that is, a concentration of sulfur that tends towards roof of the coal seam. To reduce the total sulfur content in these layers, the best washing option in dense media should be taken into account, it is recommended with a density of 1.6, since it obtained a higher percentage of cleaning compared to the density of 1,4.

Keywords: Vertical variation, sulfur, coal, Municipality of Puerto Libertador.

Contenido

	Pág.
1. Capítulo 1. Planteamiento del problema.....	3
1.1 Objetivos.....	5
1.1.1 Objetivo general.....	5
1.1.2 Objetivos específicos.....	5
1.2 Justificación.....	6
2. Capítulo 2. Estado del arte.....	9
2.1 Marco contextual.....	9
2.2 Marco conceptual.....	14
2.2.1 Carbón.....	14
2.2.2 Formación del carbón.....	17
2.2.3 Origen de los macerales.....	21
2.2.4 Minerales en el carbón.....	23
2.2.5 Minerales.....	24
2.2.6 Composición elemental del carbón.....	26
2.2.7 Azufre.....	26
2.2.8 Azufre en el carbón.....	27
3. Capítulo 3. Metodología.....	31
3.1 Alcance.....	31
3.2 Diseño.....	31
3.3 Población.....	31
3.4 Muestra.....	31
3.5 Localización.....	31
3.6 Metodología de muestreo.....	32
3.7 Materiales y Métodos.....	33
3.7.1 Toma de muestra (ASTM D2234).....	33
3.7.2 Metodología de preparación de la muestra (ASTM D2013).....	33
3.7.3 Metodología de análisis próximos (ASTM D3172 - 89(02).....	33
3.7.4 Metodología de humedad superficial (ASTM D3173).....	33
3.7.5 Metodología de humedad residual (ASTM D3173).....	33
3.7.6 Metodología de humedad total (ASTM D3302).....	34
3.7.7 Metodología de contenido de Cenizas (ASTM D3174).....	34
3.7.8 Metodología de material volátil (ISO 652).....	35
3.7.9 Metodología de carbono fijo (ASTM D3172).....	35
3.7.10 Metodología de azufre total (ASTM D4239).....	36
3.7.11 Metodología de poder calorífico superior cal/g (ASTM D5865).....	36
3.7.12 Metodología de composición de macerales (ASTM D2799).....	36

3.7.13 Metodología de formas de azufre (ASTM D2492).....	37
3.7.14 Metodología de lavabilidad (ASTM D4371)	37
3.7.15 Metodología de preparación de muestras para análisis petrográfico (ASTM D2797).....	37
4. Capítulo 4. Resultados	39
4.1 Descripción de cada ply en las muestras de núcleos en el pozo PLQ-05.....	39
4.1.1 Manto 1 pozo PLQ-05	41
4.1.2 Manto 2 pozo PLQ-05	43
4.1.3 Manto 3 pozo PLQ-05	44
4.1.4 Manto 4 pozo PLQ-05	46
4.1.5 Manto 5 pozo PLQ-05	47
4.2 Análisis próximo.....	50
4.3 Análisis petrográfico.....	54
4.4 Contenido de azufre por manto.....	55
4.5 Análisis de lavado de carbones en medios densos	57
4.6 Ensayos de Difracción de Rayos X (DRX) en muestras de carbón de Puerto Libertador	58
5. Conclusiones	61

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1: Núcleo Puerto Libertador. -----	4
Figura 2: Ejemplo de variación vertical del contenido de azufre en mantos de carbón de la Formación Amagá (Antioquia). Tomado de Blandón, 2007.-----	5
Figura 3: Zona deltaica-----	17
Figura 4: Llanura costera -----	18
Figura 5. Zona de manglar -----	18
Figura 6: Vitreño diaclasado. -----	19
Figura 7: Dureno-----	20
Figura 8: Componentes microscópicos del carbón. a. Vitrinita, b. Liptinita y c. Inertinita.	22
Figura 9: Diferentes formas de presentación del azufre pirítico en el carbón, observado al microscopio. -----	28
Figura 10: Efecto de la lluvia ácida-----	29
Figura 11: Formación de la lluvia acida -----	29
Figura 12: Corrosión formada en calderas de carbón.-----	30
Figura 13: Municipio Puerto Libertador, Departamento de Córdoba -----	32
Figura 14: Fotografía tomada de los núcleos del pozo de perforación. Puerto Libertador Córdoba. -----	32
Figura 15: Columnas estratigráficas de los mantos de carbón tomados de los núcleos del pozo de perforación PLQ-05 en Puerto Libertador Córdoba-----	39
Figura 16: Núcleo del pozo de perforación manto1.-----	41
Figura 17: Núcleo del pozo de perforación manto 2.-----	43
Figura 18: Núcleo del pozo de perforación manto 3.-----	44
Figura 19: Núcleo del pozo de perforación manto 4.-----	46
Figura 20: Núcleo del pozo de perforación manto 5.-----	47
Figura 21: DRX muestra PUC069083 -----	58
Figura 22: DRX muestra PUC069084. -----	59
Figura 23: DRX muestra PUC069085. -----	60

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1: Evaluación de resultados de análisis de diferentes formas de azufre. Datos laboratorio de carbones Universidad Nacional de Colombia, Medellín. -----	7
Tabla 2: Determinación de rangos de carbones, modificado de ASTM, 2004 -----	16
Tabla 3: Minerales contenidos en el carbón-----	25
Tabla 4: . Resultados de análisis próximos de las muestras de núcleo del Manto 1 en el Pozo PLQ-05 -----	50
Tabla 5: Resultados de análisis próximos de las muestras de núcleo del Manto 2 en el Pozo PLQ-05.-----	51
Tabla 6: Resultados de análisis próximos de las muestras de núcleo del Manto 3 en el Pozo PLQ-05.-----	51
Tabla 7: Resultados de análisis próximos de las muestras de núcleo del Manto 4 en el Pozo PLQ-05.-----	52
Tabla 8: Resultados de análisis próximos de las muestras de núcleo del Manto 5 en el Pozo PLQ-05.-----	52
Tabla 9: Resumen de los análisis próximos de los mantos totales. -----	53
Tabla 10: Conteo petrográfico. -----	54
Tabla 11: Diferentes formas de azufre.-----	55
Tabla 12: Lavado de carbones en medios denso1,4 y 1,6.-----	57

Introducción

En los mantos de carbón de la zona de Puerto Libertador, Córdoba, se desconoce dónde se encuentra la mayor parte del azufre contaminante y por observaciones previamente hechas se cree que el contenido de azufre generalmente se acumula en un solo ply del manto de carbón, generalmente en los plies cercanos al techo o al piso de los mantos.

El estudio se basó en analizar todas las capas (plies) de diferentes mantos de carbón en un proyecto de exploración efectuado por la empresa Frontier Coal de carbones en el municipio de Puerto Libertador en el departamento de Córdoba, para determinar en cuál de las capas (plies) se encuentra el mayor contenido de azufre, y posteriormente hacer las recomendaciones de beneficio y recuperación en base a los resultados obtenidos.

El azufre en el carbón es un elemento indeseable y perjudicial, no solo desde el punto de vista económico sino también por sus efectos contaminantes, por tal razón la investigación va enfocada a determinar donde se encuentra la mayor cantidad de azufre para posteriormente proponer un mejor sistema de recuperación a los mineros que se ven afectados y a las industrias que utilizan carbón en calderas, generadoras de contaminación entre estas lluvias ácidas.

Mundialmente se ha analizado el azufre contenido en el carbón de muchas formas, tamaño, cantidad, tipo o forma de presentación. Con este proyecto se quiso introducir una nueva manera de analizar al carbón pre-explotación y determinar la manera más limpia de extraerlo y comercializarlo. Geológicamente, resultados esperados del proyecto definirían en gran parte de qué forma se contaminan los carbones con azufre y porque se acumulan en cierta parte exclusiva a lo largo y ancho de las estratificaciones de carbón.

En el siguiente proyecto se estudiaron 5 mantos de carbón en una zona virgen a través de perforaciones y toma de testigos, con indicios previos de altos contenidos de azufre, los cuales fueron sometidos a una serie de ensayos de laboratorio como análisis próximo,

análisis petrográfico, entre otros con la finalidad de determinar sus propiedades físicas y químicas, para posteriormente seleccionar los mantos objeto de estudios, seguido de una división por ply y muestreo detallado de cada uno, con el fin de determinar en cual se encuentra el mayor contenido de azufre. Hipotéticamente se asumió que por formación geológica y fenómenos bacteriales que sucedieron al momento de la formación, la mayor cantidad se debe formar en el ply adyacente al techo o al piso, y para comprobar se hicieron análisis de azufre de estos y de tipo de azufre para verificar que tipo de azufre se formó y corroborar la hipótesis antes planteada.

El Comité Internacional de Petrografía del Carbón (ICCP) en Blandón, A. y Rey, I. (2004) define el carbón como una roca sedimentaria combustible, formada de restos de vegetales en varios estados de preservación y afectada por una serie de procesos que involucran la compactación del material enterrado en cuencas inicialmente de poca profundidad. Luego de su creación natural pueden suceder fenómenos como la filtración de aguas marinas por encima de la capa de materia orgánica, estas aguas son ricas en minerales, materia inorgánica y sulfatos, dando lugar al sulfuro de azufre, por lo anterior se cree que en los plies superiores se acumula mayor concentración de azufre contaminante del carbón.

Los resultados obtenidos están enfocados para varios campos, entre ellos la geología del carbón, dado que se estudia la génesis y los procesos evolutivos de componentes del carbón, también se aplica a la explotación o extracción del carbón y en gran parte a su enriquecimiento para posterior comercialización, se puede definir la aplicación final como un valor agregado de ciertos mantos de carbón, puesto que, se supone el valor neto del carbón al aumentarle su riqueza o volverlo más limpio aumenta de manera significativa, empieza ser más demandado porque cumple con los requerimientos de las normas ambientales.

1. Capítulo 1. Planteamiento del problema

En el país, existen varias zonas con acumulaciones de carbón, definidas como zonas carboníferas, estas son las proveedoras de los mercados energéticos e industriales de gran parte del país y del mundo, por lo tanto, tener en el mercado un carbón más limpio significaría una mejora en los procesos de combustión de carbón y generación de energía. Muchas de estas zonas, poseen carbones extremadamente ricos y limpios, con bajas cantidades de cenizas, y altos contenidos de carbono fijo y poder calorífico, pero a su vez muchos presentan altos contenidos de azufre, que se vuelve contaminante y conlleva a la reducción de su precio y de su demanda, el presente proyecto se enfoca en una zona donde se tiene conocimiento previo de que existen altas concentraciones de azufre, y cabe resaltar que dentro de una misma zona carbonífera puede variar el contenido de azufre a lo largo y ancho de las mantos de carbón.

Se conoce del azufre como uno de los principales contaminantes del medio ambiente y generador de procesos perjudiciales como las lluvias ácidas. Mundialmente las normas y leyes protectoras del medio ambiente han puesto gran énfasis en las compañías o industrias generadoras de energía a partir de la combustión del carbón, debido a que sus procesos generan gran impacto negativo cuando utilizan carbones altos en azufre, a raíz de esto, estas empresas deciden usar carbones con bajo porcentaje de azufre, generando aumento en la demanda de carbones más limpios. Al generar un proceso de explotación selectivo y limpio para mantos de carbón, se estaría beneficiando al medio ambiente y a las empresas que utilizan estos.

Con en el presente proyecto se busca contribuir al mejoramiento de los procesos de extracción de carbón, haciéndolos más selectivos y limpios mediante la determinación de la variación vertical del contenido de azufre en los diferentes plies de los mantos de carbón del municipio de Puerto Libertador Córdoba.

Luego de varias discusiones se trató de dar respuesta a la siguiente pregunta, **¿En qué parte de los diferentes plies de un manto de carbón se encuentra el mayor contenido de azufre?**

En la figura 1. Se pueden identificar los diferentes plies que componen un manto de carbón, definidos por litotipos y características litológicas.

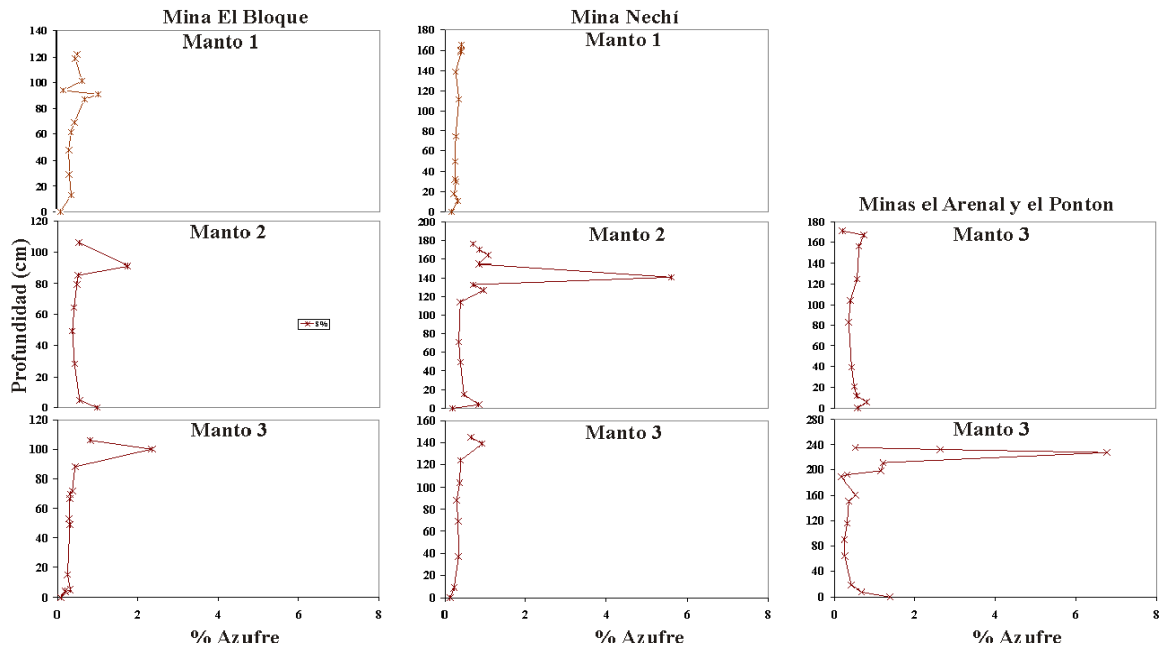
Figura 1: Núcleo Puerto Libertador.



Fuente: Autor

En la Figura 2, se ve claramente como los plies hacia el techo de los mantos en diferentes minas son los que mayor porcentaje de azufre tienen.

Figura 2: Ejemplo de variación vertical del contenido de azufre en mantos de carbón de la Formación Amagá (Antioquia). Tomado de Blandón, 2007.



Fuente:

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Determinar la variación vertical del contenido de azufre en los diferentes plies de los mantos de carbón del municipio de Puerto Libertador Córdoba.

1.1.2 Objetivos específicos

Estimar el contenido de azufre de cada uno de los plies en cada manto objeto de estudio.

Determinar las diferentes formas de presentación del azufre en los plies con mayor contenido de los diferentes mantos.

Analizar la composición maceral de las diferentes muestras de carbón, mediante petrografía.

Analizar la variación del contenido de azufre después de lavado del carbón en medios densos.

1.2 Justificación

Los principales motivos que se encontraron para estudiar el azufre contaminante en el carbón se centran en el uso de los datos de azufre, tomado de Blandon, A., 2007.

El azufre en el carbón es un elemento indeseable y perjudicial, no solo desde el punto de vista económico sino también por sus efectos contaminantes. Para ser utilizado en carbonización (coquización) o en combustión se requiere que el carbón tenga bajos porcentajes de azufre. El azufre total en los carbones utilizados para la generación de energía eléctrica no puede exceder de 0,8 – 1,0% (seco al aire) y un máximo de 0.8% en carbones utilizados para coquización, porque valores más altos afectan la calidad del acero. Thomas, 2002. tomado de (Blandon, A., 2007)

Al quemar el carbón, el azufre se convierte en óxidos que pueden contribuir a la formación de compuestos corrosivos en calderas, dando lugar a los fenómenos de fouling (deposición) y slagging (escoriamiento) y a contaminación atmosférica. En la industria de gasificación del carbón, se pueden usar carbones con relativamente alto contenido de azufre. Así en los Estados Unidos, se usan en esta industria carbones con azufre total por encima del 1,9%. Se estima que los costos de generación de electricidad a partir de carbón se pueden elevar en un 10% a causa del control ambiental que debe aplicarse al uso de carbones con alto contenido de azufre. (Blandon, A., 2007)

Para reducir el porcentaje de azufre en los carbones se utilizan los procesos de beneficio (lavado de carbones), en los cuales se hace necesario conocer la cantidad de azufre total y las formas en que este elemento se presenta (orgánico, pirítico y sulfático), su distribución y sus posibilidades de separación, con el fin de definir la rentabilidad de los procesos de utilización del carbón.

El azufre orgánico no se puede separar del carbón por métodos basados en las diferencias de gravedad específica. Es necesario utilizar medios químicos agresivos, lo cual hace menos rentable el uso del carbón.

El azufre pirítico con ciertas limitaciones se puede retirar del carbón por métodos gravimétricos. Por tanto, el valor del azufre pirítico puede ser indicativo de la cantidad de azufre que es susceptible de eliminación por métodos de beneficio convencionales.

Cantidades muy altas de azufre sulfato, pueden indicar que el carbón respectivo ha sido alterado por meteorización.

El azufre pirítico y el porcentaje de humedad son un indicativo de las posibilidades de ignición espontánea del carbón almacenado. Esto se debe probablemente a que en el ambiente húmedo la pirita se oxida formando sulfato ferroso, el cual es de mayor volumen que la pirita original. El aumento de volumen provoca un rompimiento y desmenuzamiento del carbón, incrementando su área superficial, lo cual agrava la tendencia a la ignición por la acción directa del oxígeno del aire sobre el carbón (Blandon, A. 2007).

El valor del azufre total es uno de los parámetros especificados frecuentemente en contratos de compra venta de carbones. Se utiliza también en cálculos de materia mineral.

En la Tabla 1 se muestran los resultados de análisis de diferentes formas de azufre como manera de ejemplo, en los cuales se puede apreciar que el tipo de azufre más alto es el orgánico, seguido del pirítico y por último el de sulfato.

Tabla 1: Evaluación de resultados de análisis de diferentes formas de azufre. Datos Laboratorio de Carbones Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

Muestra	Azufre total	Azufre orgánico	Azufre pirítico	Azufre de sulfato
89	2.07	1.727	0.201	0.143
90	0.82	0.753	0.054	0.012
94	0.90	0.628	0.270	0.002
97	1.09	0.942	0.133	0.014
163	1.11	0.917	0.176	0.017
164	1.10	0.818	0.078	0.204

2. Capítulo 2. Estado del arte

2.1 Marco contextual

En los últimos años, el beneficio de carbón ha recibido considerable atención. Con las enmiendas a la Ley de Aire Limpio de 1990 aprobado en los EE.UU. y con estrictas restricciones ambientales en otros países. La eliminación de azufre a partir del carbón ha tomado una importancia más crítica, tanto así, que en la mayoría de los escenarios es preferible la eliminación en la fuente al lavado de gases de combustión como comúnmente se opta. (Meffe, et al., 1995).

Meffe, et al., (1995) Plantean que las ventajas de utilizar lodos de carbón beneficiados como una fuente combustible para caldera son muchos: su poder calorífico es mayor, la abrasión de bombas y toberas de inyección se reduce, la manipulación de la ceniza y la posible reducción de potencia de la caldera se reducen al mínimo, y por supuesto, el beneficio del medio ambiente debido a la reducción en el contenido de azufre. Sin embargo, en Colombia, los estudios enfocados en darle un uso alternativo, o mejor beneficio con valor agregado a los combustibles es poco, en especial al carbón.

Por lo que se refiere a la contaminación por azufre, generalmente se ha demostrado que se produce principalmente por la combustión de combustibles en procesos industriales, tráfico de vehículos y calderas de calefacción, dando lugar al dióxido de azufre SO_2 al interactuar con partículas de oxígeno, si se combina con el agua presente en la atmosfera se genera la llamada lluvia ácida, causante de daños a infraestructuras y afectaciones a la salud. (Tyler, et al., 2013) (Oyarzún, 2010) (WHO, 2005) (Sánchez, 1999).

Chou (2012) argumenta que los estudios geoquímicos de azufre en el carbón comprenden varios aspectos importantes relacionados a la naturaleza y origen de azufre en carbones, incluyendo la abundancia y distribución de azufre en los mantos de carbón, la abundancia

de azufre en litotipos de carbón y macerales, características y significación geoquímica de compuestos orgánicos que contienen azufre, estudios isotópicos de azufre relativas a las fuentes de azufre en los carbones y ambientes sedimentarios que controlan la geoquímica del azufre en el carbón. La literatura sugiere que la variación de azufre en el carbón está estrechamente relacionada a los ambientes de depósito de las capas de carbón. Para el carbón bajo en azufre (<1% S), se deriva de azufre principalmente de material de las plantas originales. Para carbones con concentración media (1% a <3% S) y alta de azufre ($\geq 3\%$ S), hay dos principales fuentes: la primera corresponde a materiales de las plantas originales y la segunda al sulfato en el agua de mar que inundó los pantanos de turba. La abundancia de azufre en el carbón es atribuida en gran medida por el grado de influencia del agua de mar durante la acumulación de turba y por cambios postdeposicionales (diagénesis). En carbones con alto contenido de azufre, el sulfato de agua de mar se difunde en la turba, que se redujo posteriormente por bacterias en sulfuro de hidrógeno, polisulfuros, y azufre elemental. La reducción de las especies de azufre en la turba (sulfuro de hidrógeno, azufre elemental y polisulfuros) reaccionan con la materia orgánica para formar compuestos orgánicos de azufre.

En realidad ya existen muchos estudios y alternativas que buscan disminuir el contenido de contaminantes del carbón, especialmente el azufre, la biolixiviación es uno de estos procesos. Kiani, et al., (2014) argumentan que la biolixiviación de pirita del carbón es una opción prometedora para reducir el contenido de azufre de los carbones con alto contenido de azufre desde un punto de vista económico, técnico y ambiental. En esta investigación, un cultivo mixto de microorganismos acidófilo mesófilos hierro y azufre oxidantes incluyendo *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans* y *Leptospirillum ferrooxidans* fue utilizado para eliminar el azufre pirítico en carbones con alto contenido de azufre encontrados en Mehr Azin, Tabas, Irán.

Desarrollar un buen proceso de beneficio al carbón contaminado con azufre, genera grandes beneficios no solo en el ámbito ambiental, sino también en lo económico, así lo demuestra Aramburú, et al., (2007) en su investigación "Disminución del contenido de azufre en carbón mineral mediante procesos metalúrgicos para uso industrial", en este trabajo fue seleccionada una muestra representativa de los mantos de carbón, las cuales fueron sometidas a pruebas metalúrgicas de flotación, los resultados obtenidos demuestran una reducción significativa del porcentaje de azufre en las muestras, pasando

de 2.32% de contenido de azufre a un 1,37% llegando al rango que exige la industria, minimizando el impacto ambiental, evitando la fragilidad de las piezas de la siderurgia y alargando el tiempo de vida de los refractarios.

Willians y Keith (1963) observan que la distribución de azufre generalmente en turberas con influencia marina, presentan mayor contenido de azufre que en aquellos casos donde no existe tal influencia. Por su parte, Querol, et al., (1993) determinaron el contenido, distribución y origen del azufre en los carbones Albineses del distrito minero de Teruel, obteniendo como resultado que “los contenidos medios de azufre de las capas de carbón de la formación Escucha tienden a disminuir hacia el techo de las series estratigráficas, mientras que horizontalmente, a nivel de cuenca, tienden a incrementarse en los afloramientos más septentrionales”. Es decir, que la tendencia vertical va acorde con la relación que generalmente la literatura ha demostrado entre la influencia marina del medio de depósito y el mayor contenido de azufre de las capas de carbón.

Querol, et al., (1989), afirman que las principales variaciones en la distribución vertical del contenido de azufre en mantos de carbones Albineses de la cuenca del Maestrazgo, son derivadas a las variaciones del contenido de sulfuros. Por lo tanto, el contenido de azufre orgánico será más o menos constante, o como mínimo sus variaciones serán despreciables frente a las del azufre pirítico. Además, encontraron una clara tendencia al aumento del contenido de azufre total y pirítico hacia el techo de las capas con techos marinos o facies marinas muy próximas al techo, donde la máxima concentración de azufre total se produce en los 20 – 30 cm superiores a las capas, con la probabilidad de que los contenidos de azufre total se multipliquen con respecto a los del centro. Lo anterior, resalta la relación existente entre la influencia marina y el aumento del contenido de azufre en las capas de carbón.

Para cumplir con las restricciones sobre el impacto ambiental de las emisiones de óxido de azufre, algunos carbones necesitan un cierto grado de eliminación de azufre. Como el contenido de azufre en el carbón puede variar mucho de un lugar a otro, la eliminación de azufre (también conocida como desulfuración) de cualquier carbón depende de diferentes formas de azufre, y el proceso aplicable es único y puede no ser transferible a otros carbones (Kumar, D., y Kumar, D., 2018)..

La eficiencia de la desulfuración es definida como (Tasi, 1982 en Kumar, D., y Kumar, D., 2018):

$$\text{Eficiencia de desulfuración}(\%) = \frac{S \text{ en muestra} - S \text{ en producto}) * 100}{S \text{ en muestra}} \quad \text{Donde,}$$

S = Contenido de Azufre

La evaluación anterior no incluye el rendimiento real de carbón limpio. Por lo tanto, se requiere un cálculo más útil ya que solo indica reducción de azufre. El azufre eliminado en porcentaje en peso del carbón alimentado mediante un proceso de limpieza de carbón se calcula como (Kawatra y Eisele, 2001 en Kumar, D., y Kumar, D., 2018):

$$\text{emoción de azufre} (\%) = \frac{(100 - \text{rendimiento} \%) * (\text{Desperdicios} \% S)}{\text{muestra de carbón} \% S}$$

Para comparar varios procesos de separación, la eficiencia de separación para eliminar una impureza particular se puede definir como:

$$\text{Eficiencia de separación} = \text{Recuperación deseada}(\%) - (100 - \text{Remoción de azufre}(\%))$$

Donde,

$$\text{Recuperación deseada}(\%) = \frac{(\text{Rendimiento} \%) * (\text{Valor de carbón limpio})}{\text{Valor de muestra de carbón}}$$

$$\text{Valor del carbón} = \text{Material combustible o valor de calentamiento}$$

Los tipos de sulfuros y sus modos de ocurrencia en el carbón tienen una gran influencia en la eficiencia del proceso de desulfuración. Existen diferencias consideraciones en las propiedades físicas y químicas del carbón. Las diferencias en estas propiedades pueden ayudar a la separación mediante trituración selectiva, método de medio denso, flotación y separador magnético.

Es mucha la literatura acerca de la eliminación del azufre en carbón o como comúnmente se conoce (desulfuración), a continuación, se presentan algunas de las investigaciones más recientes al respecto:

Xiaodong, Y., et al, (2019), en su investigación “Desulfuración de carbón fino con alto contenido de azufre utilizando un novedoso proceso combinado de beneficio”, la prueba de separación de carbón fino con alto contenido de azufre se realizó mediante el proceso combinado de separador seco compuesto y dispositivo de desulfuración por microondas. Los efectos de la amplitud, frecuencia y velocidad del gas sobre la eficiencia de desulfuración del separador seco compuesto se estudiaron sistemáticamente y se determinó el grado significativo de influencia entre varios factores. Analizaron los efectos de diferentes reactivos, potencia, tiempo de irradiación y temperatura sobre el efecto de la desulfuración por microondas y concluyeron que: a medida que aumenta la intensidad de separación SS, los resultados de separación son mucho mejores, y a medida que aumenta la tasa de desulfuración SD, el efecto de desulfuración es mucho mejor. Además, La eficiencia de desulfuración por microondas fue promovida por la solución de NaOH. Cuando la potencia de microondas era de 450 W, la tasa de desulfuración podía alcanzar el 37,8% y, en primer lugar, aumentaba y luego se mantenía estable con el aumento adicional de la temperatura y el tiempo de irradiación. El aumento de la tasa de desulfuración es más obvio con la extensión del tiempo de irradiación. Después de la desulfuración por el reactor de microondas, los contenidos de rendimiento, azufre y cenizas del carbón limpio son 60.8%, 0.98% y 9.74%, respectivamente, lo que indica que el azufre orgánico puede eliminarse efectivamente. Para finalizar encontraron que el carbón fino con alto contenido de cenizas y alto contenido de azufre de 6–0 mm puede separarse de manera efectiva y eficiente a través de un proceso de beneficio combinado de limpieza en seco compuesta y aparato de desulfuración por microondas. Por su parte, Yanfeng, S., et al, (2019), estudiaron la transformación y distribución de azufre durante la pirólisis de una mezcla industrial de carbón coquizable con carbón con alto contenido de azufre orgánico implementando un reactor de lecho fijo, encontrando que la adición de carbón con alto contenido de azufre orgánico a la mezcla de carbón resultó en un aumento del contenido de azufre en el coque, pero la tasa de desulfuración también aumentó durante la pirólisis de la mezcla de carbón. Afirman que una mayor cantidad de radicales que contienen azufre en materias volátiles del carbón con alto contenido de azufre orgánico promueve las interacciones con el coque naciente, dando como resultado una mayor retención de azufre en la superficie del coque.

Bhupendra, S, M y Barun, K., (2018), desarrollaron estudios experimentales sobre la desulfuración de carbón Indio con alto contenido de azufre por aglomeración de aceite,

usando aceite de linaza. En los experimentos tuvieron en cuenta parámetros esenciales como el pH, tamaño de la partícula, densidad de la pulpa, la dosis de aceite de linaza, entre otros, para determinar su impacto de las propiedades del carbón limpio como la relación de reducción de azufre, la relación de reducción de cenizas y la relación del valor de poder calorífico, encontrando que la muestra de carbón crudo con contenido de azufre del 5.52%, 13.47% de cenizas y poder calorífico de 7038 kcal/kg, puede ser beneficiado para producir carbón limpio con 2.18% de contenido de azufre, 5.32% de cenizas y 7769 kcal/kg de poder calorífico. El análisis petrográfico confirmó aún más los aumentos en vitrinita, inertinita y liptinita de 68.62 a 73.61%, 12.45 a 14.07% y 3.25 a 4.27% respectivamente en el carbón limpio junto con la reducción de azufre pirítico (de 9.37 a 3.87%) y materia mineral (de 6.31 a 4.18%). Paralelo a esto, Longfei, T., et al, (2018) investigaron un novedoso y eficaz método de desulfuración reductora para el azufre tiofeno en carbones con alto contenido de azufre orgánico, utilizando el tec-butóxido de potasio/hidrosilano. Las disminuciones en el contenido de azufre obtenidas confirmaron las posibilidades de una eliminación efectiva de azufre tiofeno en el carbón, utilizando el sistema reductor, dando un punto de referencia para la eliminación del azufre tiofeno en carbones con alto contenido de azufre orgánico.

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Carbón

El Comité Internacional de Petrografía del Carbón define al carbón como: "Una roca sedimentaria combustible, formada principalmente a partir de restos vegetales que en diverso estado de conservación, sufrieron un enterramiento, y después una compactación en cuencas originalmente poco profundas (Blandon, 2007).

Las cuencas se dividen generalmente en límnicas (o intracontinentales) y parálicas (abiertas a las incursiones marinas). Lo más frecuente es que el fondo de las cuencas se fue hundiendo progresivamente de una manera más o menos regular (subsistencia), hasta profundidades a veces importantes. Restos principalmente vegetales, pero también algunos restos animales quedaron entonces sometidos a la acción de los factores clásicos de enterramiento, especialmente a la temperatura y a la presión. Mientras que la temperatura modifica la composición química de los carbones, el aumento de la presión (peso de los sedimentos superiores y fenómenos tectónicos sufridos por el sedimento) es

el factor que modifica las propiedades físicas del carbón como la dureza, la resistencia mecánica, la anisotropía óptica y la porosidad. (Blandon, 2007).

Como consecuencia del proceso anterior, en la caracterización de un carbón hay que tener en cuenta:

El tipo, que depende de la naturaleza de la materia orgánica que lo originó, y de las condiciones en que fueron depositadas, y

El rango, es decir, el grado de evolución que ha alcanzado un carbón a lo largo de su historia geológica, desde el momento en que se depositó la materia orgánica hasta el momento actual. Siendo éstas últimas, las variaciones que más influyen en la diferenciación de un carbón (ICCP, 1994).

▪ **Carbonificación**

El grado de transformación de la materia orgánica a través de la serie turba, lignito, carbones sub-bituminosos, bituminosos, antracita y meta-antracita es lo que se conoce como carbonificación o rango del carbón y se toma como base el grado de alteración física y química.

▪ **Causas de la carbonificación**

Temperatura (T)

100 – 170 °C para carbones bituminosos

170 – 250 °C para antracitas

Presión (P)

Mientras las altas temperaturas aceleran las reacciones químicas, la presión promueve la carbonificación físico estructural. Así la influencia de la presión es mayor durante la compactación. Hay disminución de la porosidad al igual que la humedad con la profundidad.

Tiempo (t)

Tiene influencia en altas temperaturas y puede ser insignificante en bajas temperaturas. A temperaturas menores de 50 °C la tasa de conversión es tan baja que el tiempo no tiene efecto apreciable sobre la materia orgánica.

A temperaturas mayores 130 °C las reacciones se dan a tasas tan altas que el tiempo no juega un papel importante. Es notablemente poderoso entre 70 y 100°C

Tabla 2: Determinación del rango del carbón, modificado de ASTM

Clases/Grupo	Carbono Fijo (slmm) ^g		Materia Volátil (slmm)		Poder Calorífico (Húmedo) ^{B(Imm)^H}				Carácter aglomerante
	Igual o mayor	Menor	Mayor	Igual o menor	Btu/lb		Mj/kg ^C		
					Igual o mayor	Menor	Igual o mayor	Menor	
Antracítico:									
Meta-antracita	98	--	--	2	--	--	--	--	No Aglomerantes
Antracita	92	98	2	8	--	--	--	--	
Semiantracita ^D	86	92	8	14	--	--	--	--	
Bituminosos:									
Bituminoso B V.	78	86	14	22	--	--	--	--	Comúnmente Aglomerantes ^E
Bituminoso M V.	69	78	22	31	--	--	--	--	
Bituminoso A.V. A	--	69	31	--	14.000 ^F	--	32.557	--	
Bituminoso A.V. B	--	--	--	--	13.000 ^F	14.000	30.232	32.557	
Bituminoso A.V. C	--	--	--	--	11.500	13.000	26.743	30.232	
					10.500	11.500	24.418	26.743	Aglomerante
Subbituminosos:									
Subbituminoso A	--	--	--	--	10.500	11.500	24.418	26.743	No Aglomerantes
Subbituminoso B	--	--	--	--	9.500	10.500	22.090	24.418	
Subbituminoso C	--	--	--	--	8.300	9.500	19.300	22.090	
Ligníticos:									
Lignito A	--	--	--	--	8.300	8.300	14.650	19.300	
Lignito B	--	--	--	--	--	6.300	--	14.650	

Convenciones de la tabla 2. Clasificación por rango

- ^A Esta clasificación no aplica a ciertos carbones
- ^B Húmedo se refiere a carbón que contiene su humedad natural inherente, pero no la que incluye el agua visible o en la superficie del carbón.
- ^C Megajoules por kilogramo. Para convertir Unidades térmicas británicas por libra a megajoules por kilogramo, se multiplica por 0.0023255.
- ^D Si aglomera se clasifica en el grupo de bajos en volátiles de la clase de los bituminosos.
- ^E Puede haber algunas variedades no aglomerantes en los grupos de la clase de los bituminosos, y hay notables excepciones en el grupo de los bituminosos altos en volátiles C.
- ^F Carbones que tienen 69% o más de carbono fijo en base seca libre de materia mineral, se deberían clasificar de acuerdo al carbono fijo, sin importar el poder calorífico.
- ^G Base seca libre de materia mineral.
- ^H Base libre de materia mineral

2.2.2 Formación del carbón

Los siguientes factores son cruciales en la formación de una turbera

El desarrollo evolutivo de la flora

El clima

Posición geográfica y estructural de la región

Figura 3: Zona deltáica



Fuente:

Figura 4: Llanura costera



Fuente:

Figura 5. Zona de manglar



Fuente:

- **Constituyentes macroscópicos del carbón (litotipos)**

La descripción macroscópica de los carbones es uno de los criterios más utilizados en la identificación y correlación de los mantos de carbón, ya que los perfiles (dos o más) de un mismo manto son similares en diferentes lugares de una misma cuenca, lo cual hace que un manto de carbón se pueda identificar por la descripción detallada de las distintas bandas

reconocibles macroscópicamente, debido a que éstas son muy constantes lateralmente en sus características. (Blandon, A., 2007).

El manual del Comité Internacional de Petrografía del Carbón define los litotipos como “Bandas reconocibles macroscópicamente en los carbones húmicos”, clasificándolos en cuatro tipos: Vitreno (bandas brillantes), Clareno (bandas semibrillantes), Dureno (bandas opacas), Fuseno (bandas muy opacas) (Blandon 2007).

Vitreno (vitrain) es un material negro, vítreo brillante, frágil, ocurre en bandas delgadas de orden centimétrico. El vitreno se rompe en fragmentos angulares y es común encontrarlo concentrado en las fracciones finas de los productos de la minería del carbón, ver figura 6. El vitreno se encuentra en muchos carbones húmicos y consiste generalmente del microlitotipo vitrita (maceral vitrinita) con algo del microlitotipo clarita (vitrinita, liptinita) rica en vitrinita (Blandon, 2007).

Figura 6: Vitreno diaclasado.



Fuente:

Clareno (clarain) es un material brillante con lustre sedoso entre vitreno y dureno se presenta en láminas finas frecuentemente menores de 1 mm. Incluye los microlitotipos vitrita, clarita, durita, fusita y trimacerita (vitrinita, liptinita e inertinita) (Blandon, 2007).

Dureno (durain) es un material gris a negro con un lustre mate, las superficies de fractura son rugosas, solamente lentes de espesores entre 3 – 10 mm son referidos como dureno,

ver figura 7; el durenó es menos común que el vitrenó y el clarenó en carbones húmicos, pero puede ocurrir como capas extensas en mantos de carbón. El durenó está compuesto de los microlitotipos durita (inertita + liptinita) y trimacerita (vitrinita, liptinita e inertinita) (Blandon, 2007).

Figura 7: Durenó



Fuente:

Fuseno (Fusain) es un material negro, blando, friable y fácilmente desintegrable a polvo de fibras negras, ocurre en los carbones como lentes, generalmente de varios milímetros de espesor, frecuentemente concentrado en capas discretas en el carbón. En muchos carbones el fuseno es un litotipo menor compuesto del microlitotipo fusita (maceral fusinita) (Blandon, 2007).

La utilización de los términos de Stopes para la descripción de carbones en núcleos de perforación y en afloramientos se hace difícil, ya que los cuatro litotipos ocurren frecuentemente como finas láminas o lentes con espesores de orden milimétrico y el estricto uso de los términos de Stopes podría llevar a un detalle extremo en la descripción litológica, mientras en la práctica solo un número limitado de unidades litológicas son requeridas. Para propósitos prácticos han sido propuestas por varios autores terminologías alternativas basadas en la clasificación básica de Stopes.

Stach (1982), En Blandon, (2004) en su texto de Petrografía del Carbón acepta la misma definición de litotipos e incluye dos litotipos para los carbones sapropélicos: los Cannel y Boghead. Según este autor, las características más comunes que se presentan en los carbones sapropélicos, es su brillo sedoso, la textura homogénea, la raya marrón, la ausencia de estratificación y su alta dureza. La fractura frecuentemente es concoide,

especialmente en los Cannel. La distinción entre los carbones sapropélicos, sólo se puede hacer microscópicamente, siendo los carbones Boghead aquellos que presentan un alto contenido de algas (Alginita) y los Cannel muy ricos en granos de polen y esporas.

Carbón cannel. El carbón cannel es negro, opaco y homogéneo, presenta fractura concoidea y está compuesto principalmente por mioesporas y lodos orgánicos, que fueron depositados en ambientes acuosos, tales como lagos poco profundos.

El carbón boghead es un carbón formado por algas, el criterio para la definición de carbón boghead es que toda la masa de ese carbón se origina de material algáceo, sin considerar el estado de preservación de las colonias de algas, es decir pueden estar bien preservadas o completamente descompuestas.

Entre estos dos tipos mayores de carbones sapropélicos, se pueden reconocer formas transicionales o intermedias tales como cannel – boghead o boghead - cannel. La descripción macroscópica del carbón proporciona una cantidad de datos que complementados con los ensayos de laboratorio definen la calidad del carbón, la cual influenciará los procesos de minería, beneficio o preparación y los distintos procesos de transformación del carbón.

- **Constituyentes microscópicos del carbón.**

El carbón no es una sustancia homogénea, sino que está constituido por varios componentes microscópicos de origen orgánico a los cuales se les denomina "Macerales", en analogía al término de "Minerales" empleado para designar los componentes microscópicos de las rocas inorgánicas (Bustin 1985, Stach's, 1982).

Mientras que un mineral se caracteriza por: tener una composición química bien definida, uniformidad de su sustancia y porque la mayoría de ellos son cristalinos, un maceral varía ampliamente en su composición química, en sus propiedades físicas y no es cristalino, pudiendo diferenciarse solamente por sus características petrográficas. (Blandón, A. y Rey I., 2004).

2.2.3 Origen de los macerales

Los macerales del carbón son en parte remanentes de plantas, en donde su forma o estructura botánica se conserva hasta el estado de carbones bituminosos; también pueden

ser los productos de la degradación de los restos orgánicos de los cuales se originan. De igual manera, se pueden formar macerales durante la etapa de carbonificación, a los que se les denomina macerales secundarios, tal es el caso de la exsudatinita, que es un maceral secundario del grupo de las liptinitas.

Al hablar estrictamente de macerales, se entiende que son libres de inclusiones minerales; sin embargo, pueden contener componentes inorgánicos de tamaño microscópico que pudieron estar presentes en el material orgánico original o bien que se formaron durante el primer estado de carbonificación como compuestos complejos de materia orgánica e inorgánica.

Estas mezclas inorgánicas están agrupadas bajo el término de minerales inherentes. Los minerales microscópicamente visibles no se toman como parte de los macerales y se deben registrar separadamente en los análisis microscópicos (Blandon, A. y Rey I., 2004).

Los macerales con base en el poder reflector se clasifican en tres grupos:

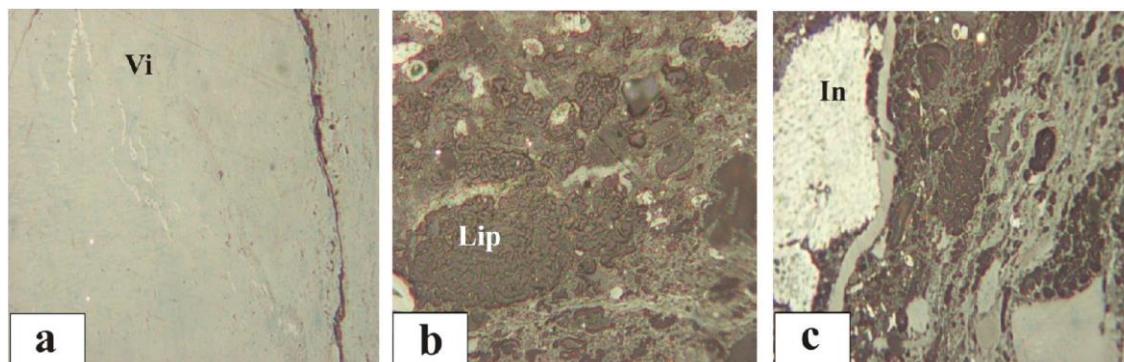
Vitrinitas / Huminitas – materiales leñosos (tallos y leños)

Liptinitas / Exinitas - esporas, resinas y cutículas

Inertinitas – Material de plantas oxidadas

Los distintos macerales se distinguen entre sí por su poder reflector, la forma, la estructura, el color, la anisotropía, la fluorescencia, el relieve (dureza al desbastado y pulimento), la microdureza (Blandon, A. y Rey I., 2004).

Figura 8: Componentes microscópicos del carbón. a. Vitrinita, b. Liptinita y c. Inertinita.



Fuente: Blandón, A. y Rey I., 2004

2.2.4 Minerales en el carbón

La Materia Mineral del carbón representa la fracción no combustible y es definida por la Standard Australia (1995, 2000) como “la suma de los minerales y materia inorgánica asociada con el carbón”, (Ward, 2002 en Blandón y Rey, 2004), incluye tres constituyentes fundamentalmente diferentes:

Las sales disueltas y otras sustancias inorgánicas contenidas en el agua de los poros del carbón.

Los elementos inorgánicos incorporados con los componentes orgánicos de los macerales del carbón.

Las partículas inorgánicas discretas, cristalinas o no cristalinas, que representan los minerales propiamente dichos.

Según Blandon, A., y Rey I. 2004, Los minerales en el carbón pueden resultar de la transformación de constituyentes biogénicos como phytolitos y fragmentos esqueléticos, pueden ser de origen detrítico introducidos en la turbera como epiclastos o piroclastos, pueden formarse a partir de procesos de precipitación autigénica, singenéticamente o en estadios posteriores rellenando poros y otros espacios por procesos epigénicos. Pueden también representar soluciones y productos de precipitación de material biogénico y detrítico, o ser derivados de las soluciones de descomposición de la materia orgánica en el estrato de turba.

Los constituyentes inorgánicos no minerales se pueden formar a partir de un amplio rango de aguas superficiales redistribuidas en los estratos por efectos de migración posdeposicional.

Los constituyentes inorgánicos no minerales se pueden formar a partir de un amplio rango de aguas superficiales redistribuidas en los estratos por efectos de migración posdeposicional.

Todos los carbones contienen constituyentes inorgánicos, los cuales se clasifican genéticamente de la siguiente manera:

Materia inorgánica singenética, representada por la materia inorgánica presente en las plantas originales y que persiste dentro de la turba y en el carbón, un ejemplo es la sílice presente en algunas plantas.

Asociaciones complejas de materiales inorgánicos y orgánicos singenéticos y minerales que se constituyeron durante las etapas tempranas de formación de la turba o que fueron depositados por el agua o el viento en los ambientes de acumulación de la materia orgánica. Un ejemplo de estos complejos es el reemplazamiento de hidrógeno en un carboxilo para formar un carboxilato cálcico. La materia inorgánica en forma no mineral puede estar dispersa a través de la turba o el carbón a una escala molecular.

Minerales tales como el circón pueden haber sido introducidos de las áreas aledañas durante la depositación de la turba.

Minerales epigénéticos, especialmente carbonatos y sulfuros (principalmente la pirita), los cuales se forman después de la consolidación del carbón, por cristalización en fracturas, fisuras o cavidades, a partir del ascenso o descenso de soluciones. Tales minerales pueden resultar también de la alteración de minerales depositados primariamente. Es frecuentemente difícil y puede ser imposible asignar la ocurrencia inorgánica del carbón en uno de estos tres grupos. La morfología de los granos minerales y sus rasgos mineralógicos pueden servir de guía de diagnóstico

2.2.5 Minerales

Gran parte de la materia inorgánica del carbón se presenta como minerales y se distribuyen entre o intra los macerales. Los granos individuales varían de tamaño desde menos de una micra hasta decenas o cientos de micras. En la tabla 3 se presenta una lista de los minerales más comunes en el carbón

Tabla 3: Minerales contenidos en el carbón

Clase	Nombre	Fórmula química	Abundancia relativa
Sulfuros	Pirita	FeS ₂	Raro – Común
	Marcasita	FeS ₂	Raro
	Esfalerita	ZnS	Raro
	Calcopirita	CuFeS ₂	muy Raro
	Galena	PbS	muy Raro
	Pirrotina	Fe _{1-x} S	muy Raro
Cloruros	Halita	NaCl	Raro
	Silvita	KCl	Raro
	Bischofita	MgCl ₂ ·6H ₂ O	Raro
Óxidos e Hidróxidos	Cuarzo	SiO ₂	Común
	Hematita	FeO ₂ O ₃	Raro
	Magnetita	FeO ₃ O ₄	Raro
	Rutilo	TiO ₂	Raro
	Diáspora	AlOOH	Raro
	Goethita	FeOOH	Raro
	Limonita	FeOOH * H ₂ O	Raro
Carbonatos	Calcita	CaCO ₃	Común
	Siderita	FeCO ₃	Común
	Dolomita	(Ca, Mg) CO ₃	Raro-Común
	Ankerita	(Ca, FE, Mg) CO ₃	Raro
Sulfatos	Yeso	CaSO ₄ .2H ₂ O	Raro-Común
	Anhidrita	CaSO ₄	Raro
	Barita	BaSO ₄	Raro
	Basanita	CaSO ₄ ½ H ₂ O	Raro
	Jarosita	Kfe ₃ (SO ₄) ₂ 6H ₂ O	Raro
	Kieserita	MgSO ₄ . H ₂ O	Raro-Común
	Mirabilita	Na ₂ SO ₄ . 10 H ₂ O	Muy raro
	Tenardita	Na ₂ SO ₄	Muy raro
Fosfatos	Apatita	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (F,Cl,OH)	Muy raro
Minerales arcillosos	Caolinita	Al ₄ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₈	Muy común
	Illita	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂	Muy común
	Mezcla de capas de arcillas	[Al ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ x H ₂ O]	común
	Montmorillonita	Al ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ . H ₂ O	Común
	Clorita	Mg ₅ Al(AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₈	Raro-Común
	Halloysita	Al ₄ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₈	Raro
Feldespatos	Albita	NaAlSi ₃ O ₈	Raro
	Ortoclasa	KAlSi ₃ O ₈	Raro
	Sanidina	KAlSi ₃ O ₈	Raro
	Biotita	K(Mg,Fe) ₃ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂	Raro
	Zircón	ZrSiO ₄	Raro

2.2.6 Composición elemental del carbón

En el carbón pueden estar presentes gran parte de los elementos existentes y que se encuentran en la tabla periódica.

Dependiendo de la concentración en la que los elementos se encuentren en el carbón, se pueden clasificar en: Elementos Mayores, Elementos Menores y Elementos Traza.

Los Elementos Mayores representados por el carbono, el hidrógeno, el oxígeno, el nitrógeno y el azufre (C, H, O, N, y S), constituyen la matriz orgánica y su concentración se expresa generalmente como porcentaje en peso (Blandon, A. y Rey I., 2004).

Los Elementos Menores representados por el silicio, el aluminio, el calcio, el magnesio, el potasio, el sodio, el hierro, el manganeso, el fósforo y el titanio, hacen parte de la composición de las cenizas del carbón y sus concentraciones están entre 100 y 1000 ppm. El carbón también contiene halógenos: bromo, cloro y flúor, que pueden alcanzar concentraciones similares a las de los elementos menores (Blandon, A. y Rey I., 2004).

Cualquier elemento no mayor, contenido en el carbón y con una concentración por debajo de 100 ppm, se considera un elemento traza, es decir cualquiera de los elementos existentes: Ag, As, Au, Ba, Be, Bi, B, Br, Cd, Ca, Ce, Cs, Cl, Co, Cr, Cu, Dy, Er, Eu, Fl, Ga, Ge, Hf, Hg, Ho, In, I, Ir, La, Li, Lu, Mn, Mo, Nd, Ni, Os, Pb, Pd, Pt, Pr, Rb, Re, Rh, Ru, Sb, Sc, Se, Sm, Sn, Sr, Ta, Tb, Te, Th, Ti, Tm, U, V, W, Y, Yb, Zn, Zr. Blandon, A. y Rey I., 2004.

2.2.7 Azufre

El azufre es un nutriente vegetal importante porque es un componente vital de varias proteínas. Su escasez frena el crecimiento de las plantas y reduce el rendimiento de los cultivos. Las propiedades químicas básicas del azufre siguen siendo las mismas independientemente de la forma en que se use. Por lo tanto, la química del azufre es el vínculo entre las diversas aplicaciones y usos del elemento y establece los límites intrínsecos de cualquier proceso en el que esté involucrado el azufre. Tanto la química básica como el uso industrial del azufre influyen en la producción de energía y en la medida en que se puede proteger el medio ambiente. Con base a lo anterior, el azufre es un parámetro importante en la elección de nuevas tecnologías y en la determinación de leyes ambientales prácticamente aplicables. Si la química básica del azufre está dando como

resultado productos indeseables, o la termodinámica o la cinética son desfavorables, todos los esfuerzos, incluida la legislación, la presión política, el dinero o la ingeniería, son en vano (Meyer, B. 1977).

▪ **Usos del azufre.**

Usos industriales Pólvora (S), ácido sulfúrico en metalurgia e industria química, construcción ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), fertilizante $(NH_4)_2SO_4$, pavonado, plaguicida ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$), blanqueador textil (SO_2), medicinal (sulfamidas, penicilina), fotografía (tiosulfato de sodio), galvanoplastia (sulfatos), papel (bisulfito de calcio y bisulfato de calcio), vulcanización, fumigación, técnica de primeros auxilios para enyesar partes fracturadas ($CaSO_4 \cdot H_2O$), desinfección de toneles (SO_2) (Holguín, S., y Estrada, D., 2009).

2.2.8 Azufre en el carbón

El azufre se encuentra en los carbones en proporciones variables desde 0.1% hasta más del 10%, es uno de los constituyentes del carbón más preocupantes y problemáticos no solo económicamente sino también por sus efectos contaminantes. Considerándose en el segundo lugar después de las cenizas (Blandon, A. y Rey I., 2004).

El azufre se presenta entonces en el carbón en tres formas: Azufre pirítico, azufre de sulfato y azufre orgánico. La suma de estas tres formas da como resultado el azufre total, Ramírez, 1992, en Blandon, A y Rey I., 2004. Catorce años después, Kumar, D., y Kumar, D. (2018) en su libro Sustainable Management of Coal Preparation, afirman que el azufre en carbón puede presentarse de cuatro diferentes formas:

Disulfuro de hierro, pirita o marcasita.

Sulfatos inorgánicos, principalmente de calcio y hierro.

El azufre unido orgánicamente también puede estar presente en algunos carbones.

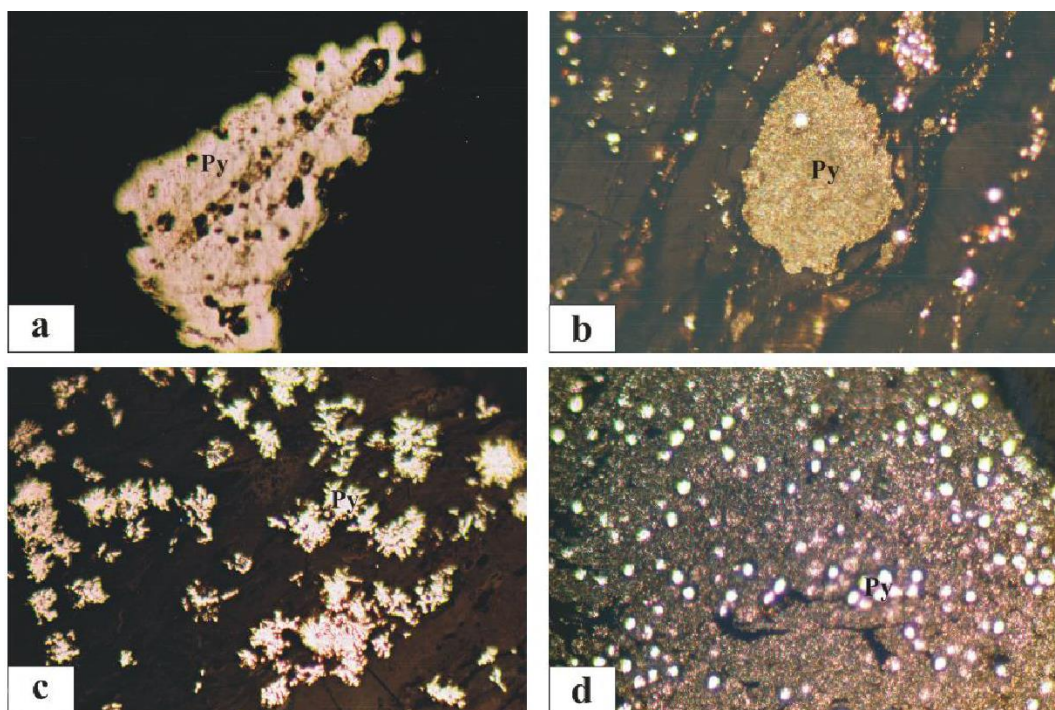
Azufre elemental.

El azufre orgánico está finamente distribuido y es imposible separarlo por medios físicos del carbón. Este azufre se considera singenético.

El azufre de pirita se puede separar del carbón, si los granos framboidales son lo suficientemente grandes, como para que se disgreguen en la molienda y el lavado. La pirita framboidal es también singenética y es producida por organismos microbianos sulfuroreductores. La pirita que se encuentra rellenando diaclasas en el carbón se considera epigenética y puede ser, en gran parte, separada del carbón en el beneficio. La pirita juega un papel importante en la combustión espontánea en pilas de carbón (Blandon, A. y Rey I., 2004).

El azufre de sulfato no es combustible y pasa directamente a las cenizas, por tanto una mala acumulación de cenizas genera una contaminación de aguas tanto superficiales como subterráneas. Ramírez, 1992, en Blandon, A. y Rey I., 2004.

Figura 9: Diferentes formas de presentación del azufre pirítico en el carbón, observado al microscopio.



Fuente: (Blandon, A. y Rey I., 2004).

En relación al azufre elemental, (Kawatra y Eisele, 2001 en Kumar, D., y Kumar, D, 2018) hacen referencia a que los carbones recién extraídos no tienen azufre elemental. Este se encuentra en carbones que han sido oxidados en cierta medida. El nivel absoluto de azufre elemental es bajo, ya que es una etapa intermedia en la oxidación a sulfato de hierro. Si el

azufre elemental está asociado con la superficie de la pirita y la marcasita, la química de la superficie de estos minerales cambia. Como resultado, estos minerales se parecerán a la superficie del carbón. Por lo tanto, será difícil separar el azufre pirítico muy fino del carbón mediante un proceso de flotación.

Con respecto al comportamiento durante la combustión el azufre del carbón se puede dividir en azufre combustible y azufre incombustible. Al azufre combustible se le considera perjudicial y se encuentra en el pirítico y en parte en el azufre orgánico.

El dióxido de azufre generado en la combustión del carbón causa un gran problema ambiental. La lluvia ácida se produce por la reacción del dióxido de azufre con el vapor de agua de la atmósfera produciéndose ácido sulfúrico el cual es muy corrosivo. Ramírez 1992, en (Blandon, A. y Rey I., 2004).

Figura 10: Efecto de la lluvia ácida



Fuente:

Figura 11: Formación de la lluvia acida



Fuente:

Figura 12: Escoria formada en calderas de carbón.



Fuente:

3. Capítulo 3. Metodología

3.1 Alcance

Explicativo

3.2 Diseño

Experimental

3.3 Población

Mantos de carbón de la empresa Frontier Coal de carbones en el municipio de Puerto Libertador en el departamento de Córdoba.

3.4 Muestra

37 testigos de 5 mantos de carbón.

3.5 Localización

Puerto Libertador se encuentra en el departamento de Córdoba. La cabecera municipal está localizada aproximadamente a los 07°53'41" de latitud norte y 75°40'12" de longitud oeste, a una altura sobre el nivel del mar de 90 m y una extensión de 2.062 km², con una distancia de 170 km por vía terrestre de Montería, la capital departamental. Los límites territoriales son: al norte, al oeste y este con Montelíbano en el departamento de Córdoba, al este con el municipio de Tarazá en el departamento de Antioquia y al sur con Ituango en el departamento de Antioquia (IGAC 2015).

Figura 13: Municipio Puerto Libertador, Departamento de Córdoba

Fuente: C.I. Carbones del Caribe S.A. 2008. r

3.6 Metodología de muestreo

Luego de obtener las diferentes muestras de los mantos de carbón, tomadas de las perforaciones hechas. (ver figura 14), se hizo la descripción macroscópica de los carbones, y se definieron e identificaron los diferentes plies que componía cada uno de los 5 mantos de carbón, mediante una descripción detallada de las distintas bandas reconocibles macroscópicamente, (vitreno, durenó y fuseno), cambio de tamaño del carbón, y su fractura.

Figura 14: Fotografía tomada de los núcleos del pozo de perforación. Puerto Libertador Córdoba.

Fuente: Autor,

3.7 Materiales y Métodos

3.7.1 Toma de muestra (ASTM D2234)

Los procedimientos de muestreo de propósito general están destinados a proporcionar, en 19 de 20 casos, los resultados de cenizas secas que estén dentro de un intervalo de $\pm \frac{1}{10}$ de los resultados promedio de cenizas secas que se obtendrían en un muestreo hipotético repetido.

3.7.2 Metodología de preparación de la muestra (ASTM D2013)

Esta práctica cubre la reducción y división de muestras brutas o divididas, y la preparación de muestras compuestas, e incluyendo las porciones individuales para análisis de laboratorio.

3.7.3 Metodología de análisis próximos (ASTM D3172-89(02))

Se conoce como análisis próximos cortos los que comprenden humedad, cenizas, material volátil y carbono fijo y los análisis próximos largos incluyen los próximos cortos más los análisis de azufre y poder calorífico.

3.7.4 Metodología de humedad superficial (ASTM D3173)

Para el cálculo de la humedad superficial se aplicó la ecuación:

$$ADL = \frac{L}{G} * 100$$

Donde:

ADL = Porcentaje de pérdida de peso por secado al aire.

L = Pérdida de peso por secado al aire en g.

G = Peso de la muestra bruta en g.

3.7.5 Metodología de humedad residual (ASTM D3173)

Para este análisis, una muestra de carbón fue vertida en una capsula de porcelana, seguidamente se llevó a horno previamente calentado y fue expuesta a una temperatura

de 105 ± 3 °C durante una hora, finalizado este tiempo, se pesaron y se procedió a calcular la humedad residual con la ecuación:

$$R = \frac{(W - H)}{W} * 100$$

Donde:

R = Porcentaje de humedad residual

W = Gramos usados

H = Gramos de muestra luego del calentamiento.

3.7.6 Metodología de humedad total (ASTM D3302)

Este método se basa en la pérdida de peso de una muestra de carbón en una atmosfera de aire bajo condiciones rígidamente controladas de temperatura, tiempo y flujo de aire. Se calcula a partir de la pérdida o ganancia en el secado al aire y la humedad residual. Para el cálculo se utilizó la siguiente ecuación:

$$M = \left[R * \frac{(100 - ADL)}{100} \right] + ADL$$

Donde:

M = Porcentaje de humedad total.

ADL = Porcentaje de pérdida de peso por secado al aire.

R = Porcentaje de humedad residual.

3.7.7 Metodología de contenido de Cenizas (ASTM D3174)

El % de cenizas se determina pesando el residuo restante después de quemar el carbón o el coque bajo condiciones rígidamente controladas de peso de la muestra, temperatura, tiempo, atmosfera y especificaciones del equipo. Para el cálculo del % de cenizas se utilizó la ecuación:

$$\% \text{ de cenizas} = \left[\frac{(A - B)}{C} \right] * 100$$

Donde:

A = Peso de la cápsula con tapa, y el residuo de cenizas en g.

B = Peso de la cápsula vacía con tapa en g.

C = Peso de la muestra de análisis utilizada en g.

3.7.8 Metodología de material volátil (ISO 652)

Una porción de la muestra se calienta fuera del contacto con el aire a 950 ° C durante 7 min. El porcentaje de fracción de masa de materia volátil se calcula a partir de la pérdida de masa de la porción de prueba después de deducir la pérdida de masa debido a la humedad. La materia volátil, en la muestra analizada, expresada como una fracción de masa porcentual, está dada por la ecuación:

$$V = \left[\frac{100 (m_2 - m_3)}{m_2 - m_1} \right] - \omega_{H_2O}$$

Donde:

V = Materia Volátil.

m_1 = Masa, expresada en gramos, del crisol y la tapa vacíos.

m_2 = Masa, expresada en gramos, del crisol y la tapa y la porción de prueba antes de calentar.

m_3 = Masa, expresada en gramos, del crisol y la tapa y el contenido después del calentamiento.

ω_{H_2O} = Humedad, expresada como una fracción de masa porcentual, en la muestra analizada, determinada de acuerdo con el método especificado en ISO 11722 para carbón o ISO 687 para coque.

3.7.9 Metodología de carbono fijo (ASTM D3172)

Este método de prueba, se pueden usar para establecer el rango de carbones, mostrar la proporción de componentes combustibles e incombustibles, proporcionar la base para la compra y venta, y evaluar el beneficio o para otros fines. El carbono fijo es un valor

calculado. Es el resultado de la suma del porcentaje de humedad, cenizas y materia volátil restada de 100. Todos los porcentajes deben estar en la misma base de referencia de humedad.

$$\text{Carbono fijo} = 100 - (\% \text{ de humedad} + \% \text{ de cenizas} + \% \text{ de materia volátil})$$

3.7.10 Metodología de azufre total (ASTM D4239)

Este método de prueba cubre la determinación de azufre en muestras de carbón o coque mediante combustión en horno de tubo a alta temperatura.

3.7.11 Metodología de poder calorífico superior cal/g (ASTM D5865)

La capacidad calorífica se determina quemando una masa específica de ácido benzoico en oxígeno. Una cantidad comparable de la muestra de análisis se quema en las mismas condiciones en el calorímetro. El valor calorífico de la muestra de análisis se calcula multiplicando el aumento de temperatura corregido, ajustado para efectos de calor extraños, por la capacidad de calor y dividiendo por la masa de la muestra.

3.7.12 Metodología de composición de macerales (ASTM D2799)

Este método de prueba cubre el equipo y las técnicas utilizadas para determinar la composición física de una muestra de carbón en términos de porcentaje en volumen de los componentes orgánicos y de la materia mineral, si se desea. Los componentes en una muestra representativa de carbón triturado, se identifican bajo un microscopio de acuerdo con su reflectancia, otras propiedades ópticas y morfología. Las proporciones de estos componentes en una muestra se determinan observando un número estadísticamente adecuado de puntos y sumando los representativos de cada componente. Solo las proporciones de área de los componentes se determinan en una sección de superficie de una muestra. Sin embargo, las proporciones de área y volumen son las mismas cuando los componentes se distribuyen aleatoriamente en toda la muestra. El porcentaje en volumen de los componentes físicos del carbón se usa como ayuda en la correlación de la capa de carbón y en la caracterización de los carbones para su uso en procesos de carbonización, gasificación, licuefacción y combustión.

3.7.13 Metodología de formas de azufre (ASTM D2492)

Este método de prueba se aplica a la determinación de sulfato de azufre y azufre pirítico en carbón y calcula el azufre orgánico por diferencia. Este método de prueba no es aplicable al coque u otros materiales carbonosos. Los monosulfuros (piritas y $[\text{FeS}]_2$ son disulfuros) de hierro y elementos como el cadmio, el plomo, el vanadio y el zinc pueden estar presentes en el carbón. En el rango de 0 a 100 ppm, estos monosulfuros no contribuyen significativamente al contenido total de sulfuro inorgánico.

3.7.14 Metodología de lavabilidad (ASTM D4371)

Este método de prueba describe los procedimientos para determinar las características de lavabilidad de las fracciones de carbón grueso y las fracciones de carbón fino. Cada muestra que se analiza puede tener más de una fracción de tamaño de carbón grueso y más de una fracción de tamaño de carbón fino. Cada fracción de tamaño tiene un límite de tamaño superior y un límite de tamaño inferior, ninguno de los cuales se superpone con la siguiente fracción de tamaño mayor o menor.

3.7.15 Metodología de preparación de muestras para análisis petrográfico (ASTM D2797)

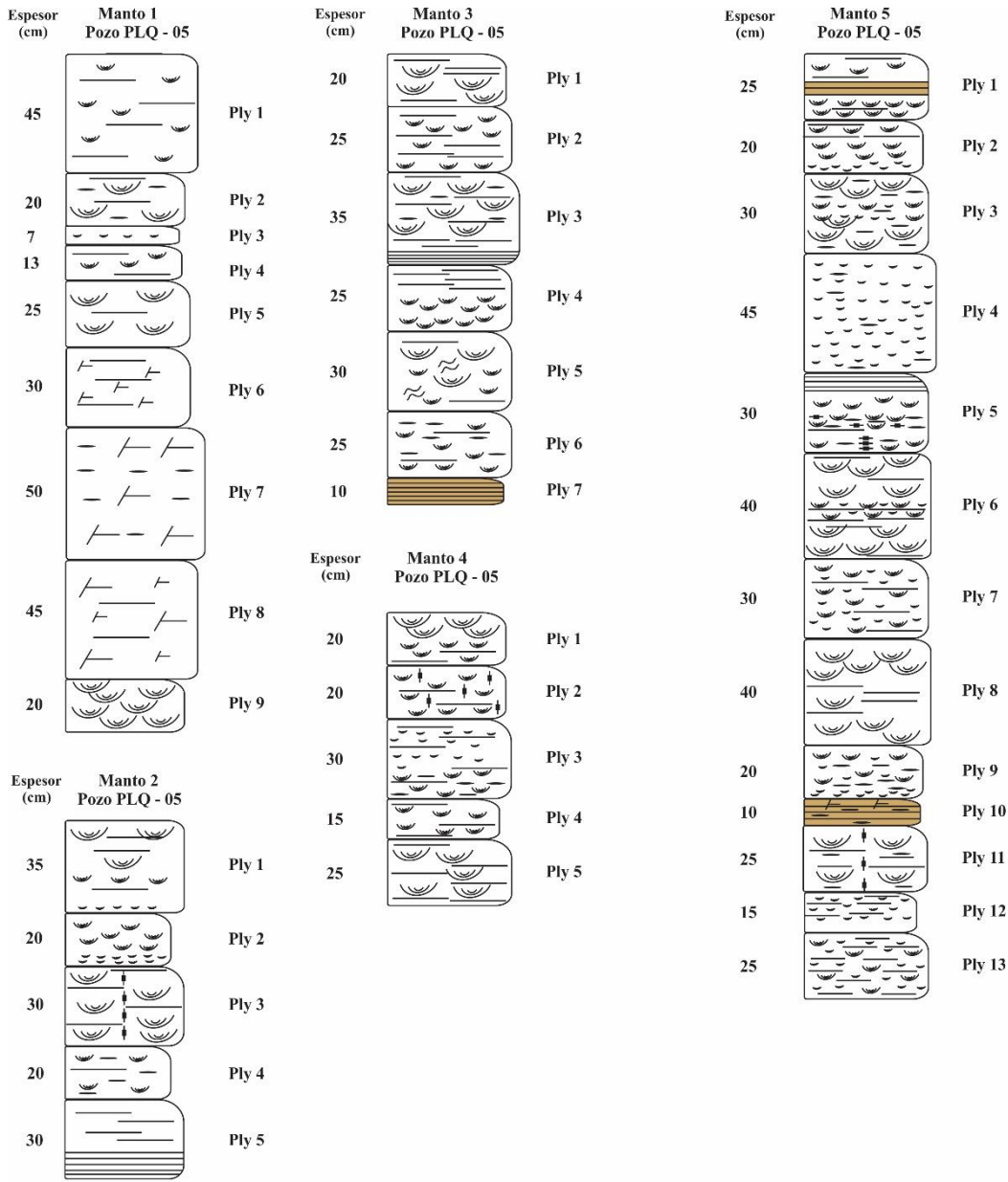
Esta práctica cubre los procedimientos de laboratorio para la preparación de muestras granulares de carbón para su examen con un microscopio utilizando iluminación de luz reflejada. No se aplica a la preparación de bloques de carbón orientados.

4. Capítulo 4. Resultados

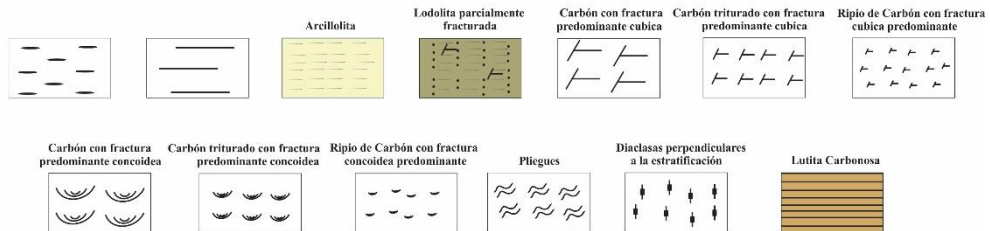
4.1 Descripción de cada ply en las muestras de núcleos en el pozo PLQ-05

La descripción de cada ply diferenciados por su tipo de fractura, litotipos, tamaño de los fragmentos como resultado de las fracturas, diaclasas y fallas; color y otras características macroscópicas, de los distintos mantos se esquematiza en las columnas estratigráficas de la figura 14 A a E; y se describirán detalladamente a continuación para cada uno de los mantos.

Figura 15: Columnas estratigráficas de los mantos de carbón tomados de los núcleos del pozo de perforación PLQ - 05 en Puerto Libertador Córdoba



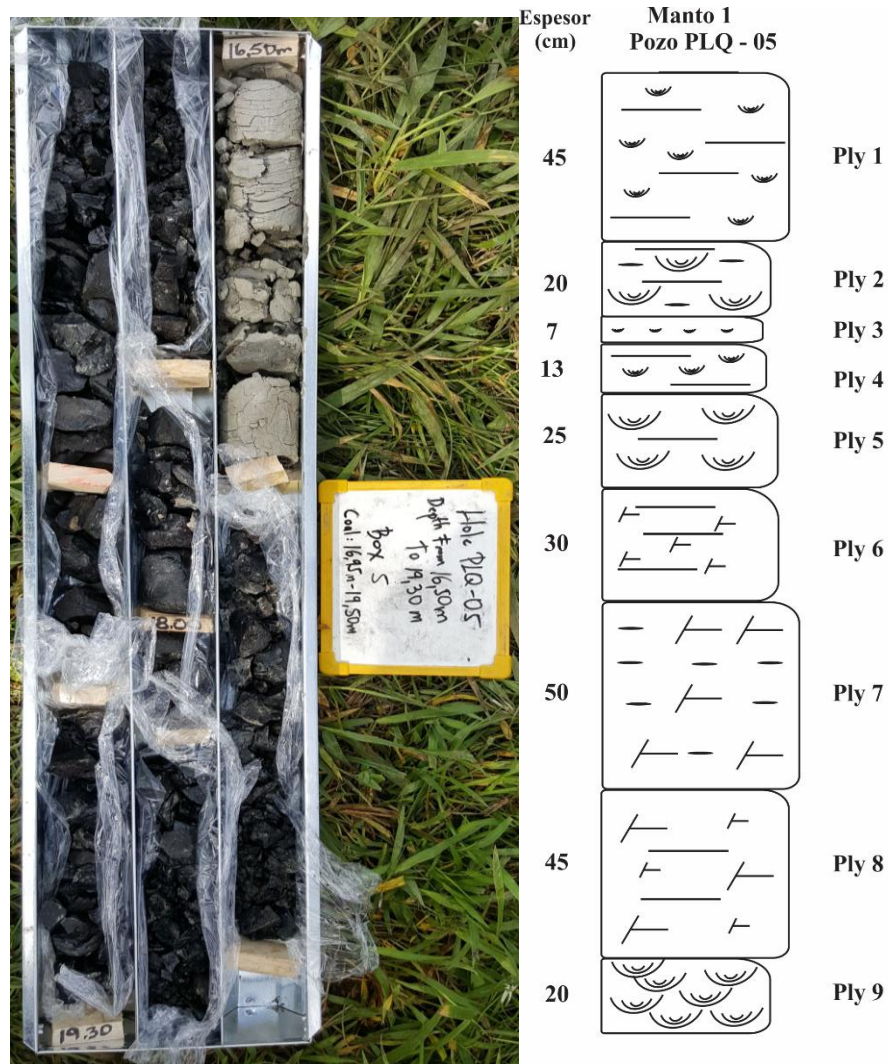
Pozo PLQ - 05 Puerto Libertador (Córdoba)



Fuente:

4.1.1 Manto 1 Pozo PLQ - 05

Figura 16: Núcleo del Manto1 en el de pozo de perforación y descripción de los plies.



Fuente: Autor.

El manto de carbón va desde 16,95 m hasta 19,50 m para un total de 2,55 m de espesor aparente, que se divide en 9 plies, ver Tabla 4.

M1-1. Primer ply del manto 1 de carbón, va desde 16,95 m hasta 17,40 m. Carbón conformado por durenó con pequeñas bandas de vitrenó, carbón fracturado de manera concoidea, tamaños de los fragmentos desde medio a pequeño.

M1-2. Segundo ply del manto 1 de carbón, va desde 17,40 m a 17,60 m. Carbón conformado por dureno con lentes y bandas de vitreno, su tamaño es grande y presenta fractura concoidea, en algunas partes presenta trozos de carbón con textura extraña o apariencia quemada con olor a petróleo.

M1-3. Tercer ply del manto 1 de carbón, va desde 17,60 m a 17,67 m. Carbón muy fracturado y húmedo, arcilloso. No se puede visualizar los litotipos por estar muy fracturado, casi ripio.

M1-4. Cuarto ply del manto 1 de carbón, va desde 17,67 m a 17,80 m. El Carbón se vuelve más compacto y de tamaño medio, presenta dureno con pequeñas bandas de vitreno y fractura concoidea.

M1-5. Quinto ply del manto 1 de carbón, va desde 17,80 m a 18,05 m. Carbón mucho más compacto, y de tamaño grande, solo un par de bandas de vitreno muy pequeñas en dureno.

M1-6. Sexto ply del manto 1 de carbón, va desde 18,05 m a 18,35 m. El Carbón cambia la fractura y se vuelve de menor tamaño, presenta dureno con pequeñas bandas no continuas de vitreno y en diferentes tonos unas bandas más brillantes que otras.

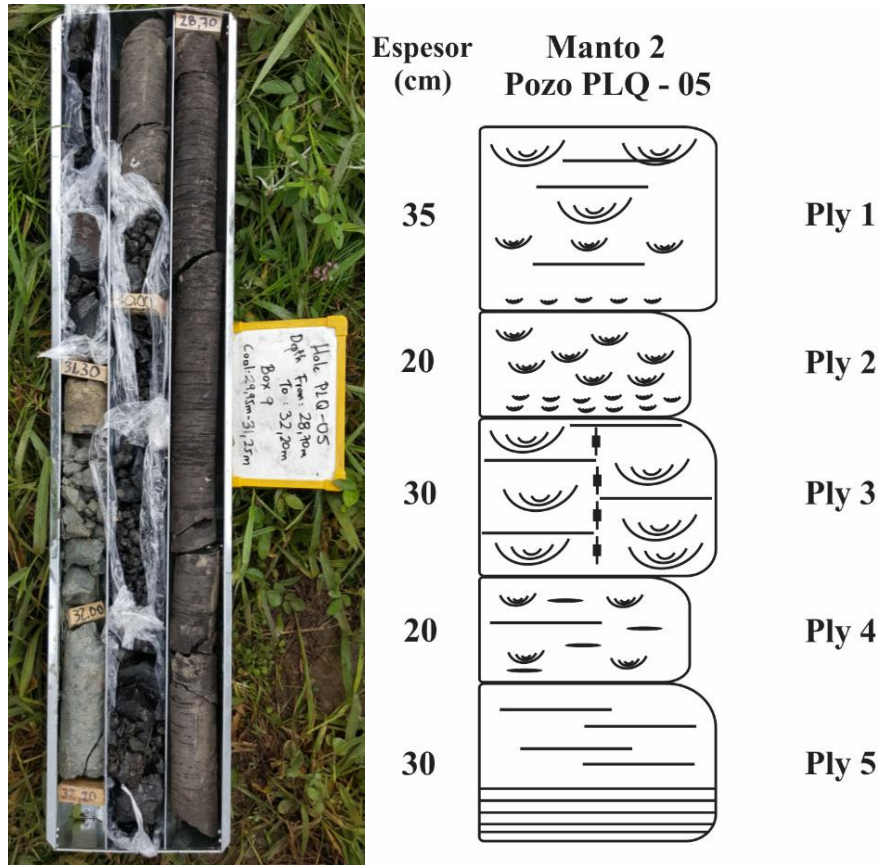
M1-7. Séptimo ply del manto 1 de carbón, va desde 18,35 m a 18,85 m. 50 cm de un ply de carbón donde se puede ver presencia de pirita, se trata de dureno con lentes de vitreno en varias direcciones, diagonales y paralelas a la dirección de la perforación.

M1-8. Octavo ply del manto 1 de carbón, va desde 18,85 m a 19,30 m. 35 cm de carbón de tamaño medio y grande, presenta dureno con una sola banda de vitreno. Figura A.

M1-9. Noveno ply del manto 1 de carbón, va desde 19,30 m a 19,50 m. Carbón que solo presenta dureno, es muy homogéneo en sus tamaños medio a grandes, cambia la fractura y la pirita se vuelve a observar en grandes cantidades.

4.1.2 Manto 2 Pozo PLQ – 05

Figura 17: Núcleo del Manto 2 en el pozo de perforación y descripción de los plies



Fuente: Autor.

Manto de carbón, va desde 29,95 m hasta 31,30 m para un total de 1,35 m de espesor aparente, que se divide en 5 plies, ver Tabla 5.

M2-1. Primer ply del manto 2 de carbón, va desde 29,95 m hasta 30,30 m. Carbón que presenta puro durenó, y unas pequeñas bandas de vitrenó, presenta tamaños grandes y medios y una pequeña parte muy fracturada.

M2-2. Segundo ply del manto 2 de carbón, va desde 30,30 m hasta 30,50 m. Carbón que solo presenta durenó, sin bandas de vitrenó, tamaños medio y una parte ripio o tamaños muy pequeños o finos.

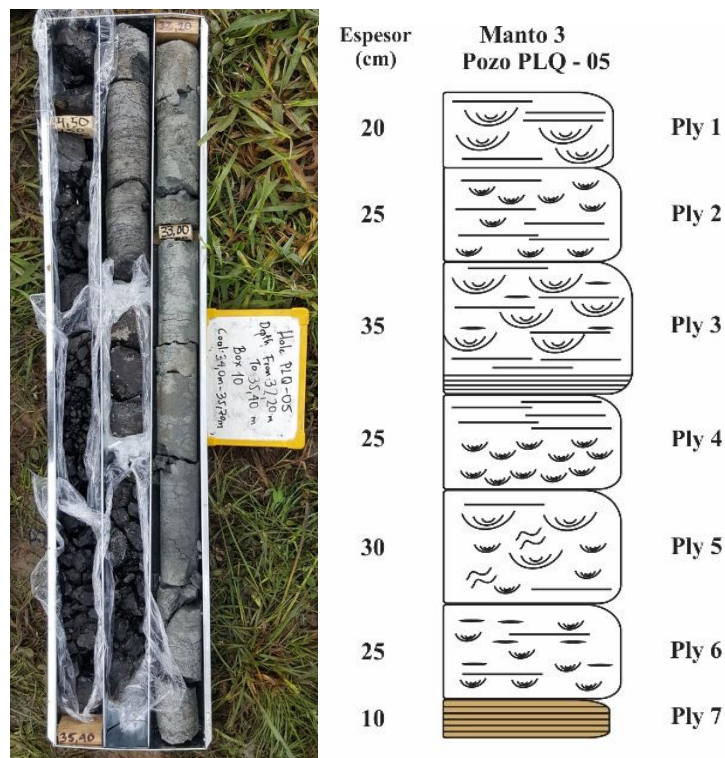
M2-3. Tercer ply del manto 2 de carbón, va desde 30,50 m hasta 30,80 m. Carbón de tamaño muy grande, presenta diaclasamiento por todo el centro del núcleo, y consiste de dureno con bandas de vitreno un poco más continuas en comparación con el ply anterior, y se logra ver pirita.

M2-4. Cuarto ply del manto 2 de carbón, va desde 30,80 m hasta 31,0 m. Carbón presenta dureno con lentes de vitreno y algunas bandas esporádicas. Tamaño medio y fractura concoidea, presenta algunos trozos de carbón con textura quemada y olor a petróleo.

M2-5. Quinto ply del manto 2 de carbón, va desde 31,0 m hasta 31,30 m. Carbón que presenta dureno con bandas de vitreno irregulares, se tomó parte del piso o lutita carbonosa, muchas bandas de vitreno discontinuas.

4.1.3 Manto 3 Pozo PLQ - 05

Figura 18: Núcleo del Manto 3 en el pozo de perforación y descripción de los plies.



Fuente: Autor.

El manto de carbón, va desde 34,0 m hasta 35,70 m para un total de 1,70 m de espesor aparente, que se divide en 6 plies de carbón y uno de lutita carbonosa (10 cm al final del manto), ver tabla 6.

M3-1. Primer ply del manto 3 de carbón, va desde 34,0 m hasta 34,20 m. Carbón que presenta dureno con muchas bandas de vitreno, y concentración de bandas de pirita, tamaño muy grande.

M3-2. Segundo ply del manto 3 de carbón, va desde 34,20 m hasta 34,45 m. Carbón en el cual también se puede apreciar pirita, con respecto al primer ply disminuye el tamaño de muy grande a medio, presenta dureno con bandas de vitreno intercaladas o discontinuas y una fractura concoidea.

M3-3. Tercer ply del manto 3 de carbón, va desde 34,45 m hasta 34,80 m. Carbón que es más negro en comparación con el anterior ply, y aumenta su tamaño a granos o trozos muy grandes, presenta dureno con lentes de vitreno y gran cantidad de bandas de vitreno. Finalizando este ply hay una contaminación de lutita carbonosa, se espera un alto contenido de cenizas.

M3-4. Cuarto ply del manto 3 de carbón, va desde 34,80 m hasta 35,05 m. Carbón que presenta una parte de dureno con bandas discontinuas y muy delgadas de vitreno, otra parte solo dureno, y textura diferente apariencia quemada con olor a petróleo. Tamaño medio y pequeño.

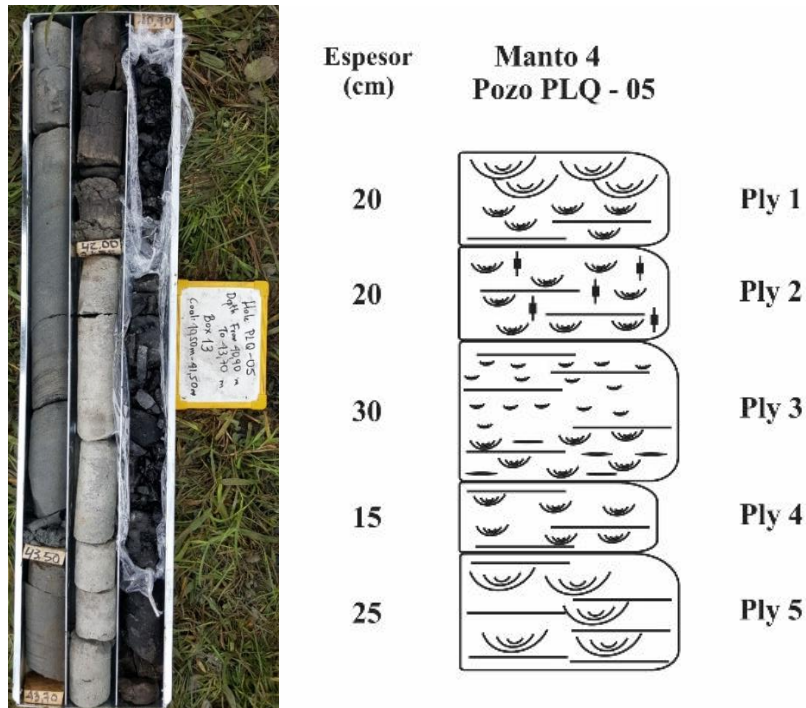
M3-5. Quinto ply del manto 3 de carbón, va desde 35,05 m hasta 35,35 m. Carbón que presenta dureno y parece afectado tectónicamente, unas bandas de vitreno muy irregulares y discontinuas, tamaño grande a medio y trozos con textura diferente o apariencia quemada con olor a petróleo.

M3-6. Sexto ply del manto 3 de carbón, va desde 35,35 m hasta 35,60 m. Carbón muy fracturado que presenta dureno con lentes de vitreno, fractura concoidea, bandas de vitreno esporádicas dentro de dureno.

M3-7. Séptimo ply del manto 3 de carbón, va desde 35,60 m hasta 35,70 m. Lutita carbonosa de 10 cm en el piso del manto.

4.1.4 Manto 4 Pozo PLQ - 05

Figura 19: Núcleo del Manto 4 en el pozo de perforación y descripción de los plies.



Fuente: Autor.

Manto de carbón, va desde 40,50 m hasta 41,60 m para un total de 1,10 m de espesor aparente, que se divide en 5 plies de carbón, ver tabla 7.

M4-1. Primer ply del manto 4 de carbón, va desde 40,50 m, hasta 40,70 m. Carbón que presenta dureno en su inicio con textura extraña y apariencia quemada con olor a petróleo, fracturado y hacia el piso hay unas pequeñas bandas de vitreno salteadas o discontinuas, color negro opaco.

M4-2. Segundo ply del manto 4 de carbón, va desde 40,70 m hasta 40,90 m. Carbón que presenta fractura concoidea, tamaño medio y diaclasado, pequeñas bandas de vitreno, presenta trozos quemados con olor a petróleo.

M4-3. Tercer ply del manto 4 de carbón, va desde 40,90 m hasta 41,20 m. Carbón de tamaño medio a pequeño, muy fracturado y muy negro, presenta humedad, dureno con

bandas de vitreno, y una fractura concoidea hacia la parte baja del ply con bandas muy delgadas de vitreno y lentes muy pequeños.

M4-4. Cuarto ply del manto 4 de carbón, va desde 41,20 m hasta 41,35 m. Carbón que presenta dureno con bandas de vitreno en desorden, discontinuas.

M4-5. Quinto ply del manto 5 de carbón, va desde 41,35 m hasta 41,60 m. Carbón que presenta dureno y mucho más vitreno que el anterior ply, también aumenta el tamaño a grande.

4.1.5 Manto 5 Pozo PLQ - 05

Figura 20: Núcleo del Manto 5 en el pozo de perforación y descripción de los plies.



Espesor (cm)	Manto 5 Pozo PLQ - 05	
25		Ply 1
20		Ply 2
30		Ply 3
45		Ply 4
30		Ply 5
40		Ply 6
30		Ply 7
40		Ply 8
20		Ply 9
10		Ply 10
25		Ply 11
15		Ply 12
25		Ply 13

Fuente: Autor.

Manto de carbón, va desde 58,60 m hasta 62,15 m para un total de 3,55 m de espesor aparente, que se divide en 12 plies de carbón y una intercalación de roca enriquecida en carbón, ver tabla 8.

M5-1. Primer ply del manto 5 de carbón, va desde 58,60 m, hasta 58,85 m. Carbón que presenta dureno principalmente con algunos puntos de vitreno irregulares y sin orientación, hay un lente de lodolita que puede aumentar el contenido de cenizas, fractura concoidea, tamaño medio y grueso y hacia la parte baja del ply se encuentra más fracturado.

M5-2. Segundo ply del manto 5 de carbón, va desde 58,85 m, hasta 59,05 m. Carbón que presenta dureno con bandas pequeñas y continuas de vitreno, una parte quemada con olor

a petróleo, muy fracturado al final del ply no muy fracturado en el techo, carbón mucho más negro y húmedo que en el anterior ply.

M5-3. Tercer ply del manto 5 de carbón, va desde 59,05 m, hasta 59,35 m. Carbón con color negro a café, seco y de tamaño medio, presenta dureno y una fractura concoidea, lentes de vitreno en direcciones horizontales e inclinadas, el techo del ply es muy duro con un medio fracturado que aporta tamaños pequeños y un final nuevamente duro con bandas de vitreno en varias direcciones.

M5-4. Cuarto ply del manto 5 de carbón, Carbón húmedo y muy fracturado, tamaños pequeños a muy pequeños, presenta dureno con lentes irregulares de vitreno.

M5-5. Quinto ply del manto 5 de carbón, va desde 59,80 m, hasta 60,10 m. Carbón con dureno y una cantidad d bandas de vitreno en mayor cantidad que el ply anterior, fractura concoidea fácil de identificar, con un diaclasamiento, con tendencia a fracturarse cuando hay más vitreno. El inicio es una pequeña intercalación de lutita, en el medio carbón con dureno con fractura concoidea, sigue una capa muy rica en vitreno y fracturada y hacia el final del ply mucho dureno nuevamente con puntos de vitreno y un diaclasamiento por la mitad del núcleo,

M5-6. Sexto ply del manto 5 de carbón, va desde 60,10 m, hasta 60,50 m. Carbón bandeado, el techo de este ply es de tamaño grande sucio, con apariencia de lutita carbonosa, se aprecia mayor densidad y peso, se espera alto contenido de cenizas, muchas bandas muy delgadas de vitreno, continua en la mitad más bandeado y se tritura, se observa dureno y bandas de vitreno, tamaño medio, hacia el piso del ply aumenta el tamaño nuevamente dureno, también bandeado y fractura concoidea.

M5-7. Séptimo ply del manto 5 de carbón, va desde 60,50 m, hasta 60,80 m. Carbón bandeado y fracturado, parece un carbón sucio y es laminar, presenta dureno con bandas de vitreno, tamaño medio hasta muy pequeño.

M5-8. Octavo ply del manto 5 de carbón, va desde 60,80 m, hasta 61,20 m en el poso de perforación PLQ-05. Este ply en el techo presenta un carbón con alto contenido de dureno con tamaño grande, sigue una capa laminar más negra de dureno con bandas de vitreno discontinuas, fractura fina concoidea y tamaño grande.

M5-9. Noveno ply del manto 5 de carbón, va desde 61,20 m, hasta 61,40 m. Carbón bandeado y laminar, presenta dureno con fractura concoidea, tamaño medio y pequeño, se pueden apreciar lentes de vitreno, y al final se vuelve mucho más laminar y un poco contaminado.

M5-10. Decimo ply del manto 5 de carbón, va desde 61,40 m, hasta 61,50 m. Arcillolita con lentes de vitreno, en el techo se puede observar contenido de carbón, presenta solo dureno.

M5-11. Undécimo ply del manto 5 de carbón, va desde 61,50, hasta 61,75m. Carbón en el que se puede observar dureno con lentes de vitreno y bandas de vitreno de varios tamaños, gruesas y delgadas, diaclasado por la mitad y de tamaño grande, muy compacto, el núcleo de perforación solo se parte en 2 siguiendo la dirección del diaclasamiento.

M5-12. Duodécimo o ply número 12 del manto 5 de carbón, va desde 61,75 m, hasta 61,90 m. Carbón muy fracturado o ripio, con tamaños pequeños a muy pequeños, muy brillantes, dureno con bandas de vitreno intercaladas o discontinuas, se puede observar al final del ply una arenisca con lentes de dureno laminados, aproximadamente un 30% de arenisca, se espera alto contenido de cenizas.

M5-13. Decimotercero o ply número 13 del manto 5 de carbón, va desde 61,90 m, hasta 62,15 m. Carbón muy sucio, laminar con textura como una lodolita, presenta dureno con bandas de vitreno, una mayor cantidad que el anterior ply, carbón con tamaño medio a pequeño, con textura seca, también tiene trozos con textura y apariencia quemada con olor a petróleo, se espera contaminado o alto contenido de cenizas, este ply es la base del manto.

4.2 Análisis próximo

En las tablas 4 – 9 aparecen los resultados de análisis próximos de las muestras de núcleo de los Mantos 1 a 5 respectivamente en el Pozo PLQ - 05

- **Manto 1.**

Tabla 4: Resultados de análisis próximos de las muestras de núcleo del Manto 1 en el Pozo PLQ - 05

Código del laboratorio	Identificación Por Parte Del Cliente	Profundidad (m)	Espesor del manto (m)	Humedad *Superficial % ASTM D3302	Residua l % ASTM D3173	*Total % ASTM D3302	Cenizas % ASTM D3174	Materia s Volátiles % ISO 562	*Carbon o Fijo % ASTM D3172	Azufre Total % ASTM D4239	Poder Calorific o Superior cal/g ASTM D5865
150747	M1-1-PLQ05	16,95-17,40	0,45	12,15	11,39	22,16	4,20	39,14	45,27	1,21	5745,00
150748	M1-2-PLQ05	17,40-17,60	0,20	8,17	11,46	18,69	6,74	38,15	43,65	1,31	5722,00
150749	M1-3-PLQ05	17,60-17,67	0,07	15,23	11,33	24,83	4,14	38,89	45,64	1,20	5716,00
150750	M1-4-PLQ05	17,67-17,80	0,13	11,11	11,20	21,07	2,45	39,40	46,95	1,93	5856,00
150751 España	M1-5-PLQ05	17,80-18,05	0,25	7,62	12,61	19,27	7,55	36,43	43,41	2,44	5561,00
150752	M1-6-PLQ05	18,05-18,35	0,30	6,4	13,27	18,82	8,01	35,64	43,08	1,00	5566,00
150753	M1-7-PLQ05	18,35-18,85	0,50	5,24	14,76	19,23	10,02	34,89	40,33	0,36	5307,00
150754	M1-8-PLQ05	18,85-19,30	0,45	7,15	14,37	20,49	7,38	36,41	41,84	0,98	5516,00
150755	M1-9-PLQ05	19,30-19,50	0,20	5,12	14,67	19,04	7,20	36,20	41,93	0,58	5505,00
Manto total			2,55	7,96	13,17	20,12	7,02	36,85	42,96	1,09	5563,84

▪ **Manto 2.**

Tabla 5: Resultados de análisis próximos de las muestras de núcleo del Manto 2 en el Pozo PLQ - 05.

Código del laboratorio	Identificación Por Parte Del Cliente	Profundidad (m)	Espesor del manto (m)	Humedad *Superficial % ASTM D3302	Residual % ASTM D3173	*Total % ASTM D3302	Cenizas % ASTM D3174	Materias Volátiles % ISO 562	*Carbono Fijo % ASTM D3172	Azufre Total % ASTM D4239	Poder Calorífico Superior cal/g ASTM D5865
150756	M2-1-PLQ05	29,95-30,30	0,35	6,11	13,80	19,07	8,70	36,39	41,11	0,77	5404,00
150757 España	M2-2-PLQ05	30,30-30,50	0,20	6,39	13,98	19,48	6,51	36,80	42,71	2,01	5560,00
150758	M2-3-PLQ05	30,50-30,80	0,30	5,11	13,85	18,25	6,70	37,17	42,28	0,98	5629,00
150759	M2-4-PLQ05	30,80-31,00	0,20	5,45	13,43	18,15	8,80	36,12	41,65	0,77	5464,00
150760	M2-5-PLQ05	31,00-31,30	0,30	5,98	8,85	14,30	45,99	24,13	21,03	0,50	2811,00
Manto total			1,35	5,80	12,68	17,75	16,23	33,86	37,22	0,94	4909,78

▪ **Manto 3.**

Tabla 6: Resultados de análisis próximos de las muestras de núcleo del Manto 3 en el Pozo PLQ - 05.

Código del laboratorio	Identificación Por Parte Del Cliente	Profundidad (m)	Espesor del manto (m)	Humedad *Superficial % ASTM D3302	Residual % ASTM D3173	*Total % ASTM D3302	Cenizas % ASTM D3174	Materias Volátiles % ISO 562	*Carbono Fijo % ASTM D3172	Azufre Total % ASTM D4239	Poder Calorífico Superior cal/g ASTM D5865
150761	M3-1-PLQ05	34,00-34,20	0,20	4,53	10,50	14,55	20,06	39,84	29,60	1,48	5136,00
150762	M3-2-PLQ05	34,20-34,45	0,25	5,83	14,21	19,21	9,76	36,14	39,89	1,13	5349,00
150763	M3-3-PLQ05	34,45-34,80	0,35	6,91	11,95	18,03	24,29	31,13	32,63	0,95	4419,00
150764	M3-4-PLQ05	34,80-35,05	0,25	7,11	13,51	19,66	12,35	34,72	39,42	0,53	5179,00
150765	M3-5-PLQ05	35,05-35,35	0,30	6,54	13,21	18,89	5,55	37,84	43,40	0,88	5652,00
150766	M3-6-PLQ05	35,35-35,60	0,25	7,62	13,39	19,99	4,01	38,09	44,51	1,73	5649,00
Manto total			1,60	6,52	12,83	18,50	12,94	35,91	38,32	1,09	5196,06

▪ **Manto 4.**

Tabla 7: Resultados de análisis próximos de las muestras de núcleo del Manto 4 en el Pozo PLQ - 05.

Código del laboratorio	Identificación Por Parte Del Cliente	Profundidad (m)	Espesor del manto (m)	Humedad *Superficial % ASTM D3302	Residual % ASTM D3173	*Total % ASTM D3302	Cenizas % ASTM D3174	Materias Volátiles % ISO 562	*Carbono Fijo % ASTM D3172	Azufre Total % ASTM D4239	Poder Calorífico Superior cal/g ASTM D5865
150767	M4-1-PLQ05	40,50-40,70	0,20	7,84	14,06	20,80	3,86	38,02	44,06	1,52	5626,00
150768 España	M4-2-PLQ05	40,70-40,90	0,20	8,34	13,39	20,61	5,00	37,83	43,78	2,04	5555,00
150769	M4-3-PLQ05	40,90-41,20	0,30	7,08	12,76	18,94	4,71	38,26	44,27	1,96	5667,00
150770	M4-4-PLQ05	41,20-41,35	0,15	5,97	13,46	18,63	6,91	39,23	40,40	1,45	5623,00
150771	M4-5-PLQ05	41,35-41,60	0,25	6,18	11,89	17,34	11,43	38,85	37,83	0,73	5505,00
Manto total			1,10	7,09	13,01	19,18	6,44	38,40	42,15	1,55	5596,36

▪ **Manto 5.**

Tabla 8: Resultados de análisis próximos de las muestras de núcleo del Manto 5 en el Pozo PLQ - 05.

Código del laboratorio	Identificación Por Parte Del Cliente	Profundidad (m)	Espesor del manto (m)	Humedad *Superficial % ASTM D3302	Residual % ASTM D3173	*Total % ASTM D3302	Cenizas % ASTM D3174	Materias Volátiles % ISO 562	*Carbono Fijo % ASTM D3172	Azufre Total % ASTM D4239	Poder Calorífico Superior cal/g ASTM D5865
150772	M5-1-PLQ05	58,60-58,85	0,25	5,12	12,56	17,04	11,43	38,91	37,10	1,51	5385,00
150773	M5-2-PLQ05	58,85-59,05	0,20	12,01	13,40	23,80	6,37	36,58	43,65	1,63	5391,00
150774	M5-3-PLQ05	59,05-59,35	0,30	6,94	14,18	20,14	5,45	37,48	42,89	1,45	5554,00
150775	M5-4-PLQ05	59,35-59,80	0,45	13,02	15,00	26,07	5,23	36,77	43,00	1,61	5284,00
150776	M5-5-PLQ05	59,80-60,10	0,30	5,55	15,15	19,86	5,89	36,80	42,16	0,82	5568,00
150777	M5-6-PLQ05	60,10-60,50	0,40	5,82	13,88	18,89	10,92	33,24	41,96	1,68	5113,00
150778	M5-7-PLQ05	60,50-60,80	0,30	7,56	14,36	20,83	4,70	35,98	44,96	0,53	5340,00
150779	M5-8-PLQ05	60,80-61,20	0,40	5,17	14,84	19,24	8,44	34,64	42,08	1,28	5370,00
150780	M5-9-PLQ05	61,20-61,40	0,20	6,85	13,64	19,56	6,83	34,95	44,58	1,21	5349,00
150781	M5-10-PLQ05	61,40-61,50	0,10	11,28	7,47	17,91	56,07	17,97	18,49	1,39	2134,00
150782	M5-11-PLQ05	61,50-61,75	0,25	4,79	14,44	18,54	8,31	34,77	42,48	1,82	5373,00
150783	M5-12-PLQ05	61,75-61,90	0,15	11,01	12,74	22,35	22,44	29,96	24,86	1,32	4402,00
150784	M5-13-PLQ05	61,90-62,15	0,25	7,06	13,00	19,14	4,57	38,26	44,17	0,66	5509,00
Manto total			3,55	7,62	13,92	20,49	9,18	35,31	41,16	1,31	4859,66

Las muestras que están resaltadas en azul claro fueron las que se seleccionaron para hacer la separación en líquidos densos en dos densidades (1.4 y 1.6). Las que aparecen en verde claro, se tomaron para separar en una densidad de 1.8.

Como se puede observar los mantos 1 y 4 son los que tienen menor contenido de cenizas y por lo tanto presentan el mayor poder calorífico; el manto 2 tiene un ply muy sucio en la base, que hace que la calidad de este manto se disminuya. De otro lado el manto 3 presenta los mayores contenidos de cenizas hacia el techo del manto haciendo que la calidad del manto se disminuya. Para el manto 5 se observa hacia la base intercalaciones de areniscas carbonosas y carbón sucio con otros muy limpios, deteriorándose la calidad del manto hacia la base.

Tabla 9: Resumen de los análisis próximos de los mantos totales.

Identificación Por Parte Del Cliente	Profundidad (m)	Espesor del manto (m)	Humedad *Superficial % ASTM D3302	Residual % ASTM D3173	*Total % ASTM D3302	Cenizas % ASTM D3174	Materias Volátiles % ISO 562	*Carbono Fijo % ASTM D3172	Azufre Total % ASTM D4239	Poder Calorífico Superior cal/g ASTM D5865
Manto 1	19,50	2,55	7,96	13,17	20,12	7,02	36,85	42,96	1,09	5563,84
Manto 2	31,30	1,35	5,80	12,68	17,75	16,23	33,86	37,22	0,94	4909,78
Manto 3	35,60	1,60	6,52	12,83	18,50	12,94	35,91	38,32	1,09	5196,06
Manto 4	41,60	1,10	7,09	13,01	19,18	6,44	38,40	42,15	1,55	5596,36
Manto 5	62,15	3,55	7,62	13,92	20,49	9,18	35,31	41,16	1,31	4859,66

4.3 Análisis petrográfico

En la tabla 10 aparecen los resultados del conteo petrográfico de las muestras seleccionadas.

Tabla 10: Conteo petrográfico.

Vitrinita	150747	150750	150751	150754	150757	150758	150762	150766	150767	150768	150769	150772	150773	150775	150777
Subgrupo	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje
Colotelinita	61,2	37,6	23,7	29,9	26,0	26,1	24,1	12,5	27,7	24,9	28,2	17,8	29,6	17,4	23,1
colodetrinita	12,8	42,4	36,5	32,1	40,5	48,3	39,6	57,5	44,5	48,8	46,1	54,3	34,5	45,0	45,4
Corpogelinita	0	0	0,4	0,6	1,0	0,2	0,2	0,0	0,2	0,5	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0
Total Vitrinita	74,0	80,0	60,5	62,7	67,5	74,6	63,9	70,0	72,5	74,2	74,5	72,1	64,2	62,4	68,5
Liptinita															
Subgrupo	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje
Esporinita	0,6	0,0	5,7	8,0	6,3	9,1	6,4	7,2	6,8	5,2	8,3	4,2	10,0	5,4	10,6
Cutinita	1,2	2,1	1,7	3,0	1,4	2,2	1,2	0,0	1,7	0,7	1,1	0,2	0,9	0,7	0,7
Resinita	2,2	2,8	4,6	3,2	2,9	2,9	2,5	3,9	2,2	1,7	1,6	5,4	2,7	3,4	2,2
Alginita	0,0	0,0	1,0	0,8	1,0	1,0	1,0	0,3	0,4	0,9	1,2	1,9	1,3	1,3	0,7
Liptodetrinita	8,9	8,7	5,5	4,2	3,4	2,6	5,9	5,6	2,8	3,6	5	7	3,5	5,7	4,0
Fluorinita	0	0	0	0,2	0	0	0	0	0	0	0	1,2	0	0	0
Bituminita	1,2	0,9	6,1	4,2	3,6	0,2	3,7	1,7	1,1	1,2	0,5	3,1	4,9	3,4	3,7
Exsudanita	2,2	0,6	1,1	1,0	1,0	0,2	0,5	0,3	0,7	0,9	0,5	0,0	3,5	6,7	0,7
Suberinita	0,9	0,9	1,9	1,0	1,2	0,5	0,5	0,3	2,0	0,5	0,5	0,0	1,5	2,0	0,7
Total liptinita	17,6	16,0	27,7	25,5	20,7	18,7	21,6	19,2	17,7	14,7	15,7	23	28,3	28,5	23,4
Inertinita															
Subgrupo	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje
Funginitas	0,9	1,0	4,2	3,0	2,9	1,2	3,4	2,2	2,8	2,1	2,9	1,4	3,1	0,7	1,5
Fusinitas	1,6	0,0	0,2	0,4	0,2	0,0	0,2	0,3	0,0	0,0	0,1	0,0	0,4	0,0	0,0
Semifusinitas	0,9	0	0,4	0	0	0	0,7371	0	0	0	0	0	0	0	0
Secretinita	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Macrinita	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Micrinita	0,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inertodetrinita	0	0,0	1,0	0,2	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Total Inertinita	4,2	1,0	5,7	3,6	3,1	1,4	4,7	2,5	2,8	2,1	3,0	1,4	3,5	0,7	1,5
Minerales															
Subgrupo	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje
Carbonatos	0,3	0,0	0,0	1,2	0,7	1,0	1,0	2,8	2,0	4,7	2,8	0	0,0	4,7	2,2
Cuarzos	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,5	0,3	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0
Arcillas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Pirita	3,9	3	6	7	7	4	8	5	5	4	4	3,5	4	3	4
Total Minerales	4,2	3,0	6,1	8,2	8,7	5,3	9,8	8,3	7,0	9,0	6,8	3,5	4,0	8,4	6,6

A nivel general, el contenido de vitrinitas predomina en las diferentes muestras de carbón analizadas, con porcentajes que varían entre 60,5% y 80%.

El porcentaje de liptinitas sigue en orden de cantidades, estando entre 16% y 27%, siendo las lipodetrinitas el grupo que más aparece, y porcentajes considerables de resinitas y bituminitas.

El contenido de intertrodetrinitas de las muestras de Puerto Libertador es muy bajo en comparación con los otros 2 grupos de macerales, estando entre 1% y 5%, los subgrupos más encontrados fueron funginitas y fusinitas.

La materia mineral encontrada en las diferentes muestras, va en casos desde 3% hasta 9,8%, siendo un contenido de mineral considerable, estos en su mayoría son pirita, seguido de carbonatos.

4.4 Contenido de azufre por manto

Tabla 11: Diferentes formas de azufre.

Código	Diferentes formas de azufre			Azufre total	
	Azufre Sulfato (%)	Azufre Pirítico (%)	Azufre Orgánico (%)	(%)	Base Seca (%)
150747	0,08	0,61	0,67	1,21	1,37
150750	0,09	1,00	1,09	1,93	2,17
150751	0,09	0,93	1,77	2,44	2,79
150754	0,05	1,07	0,02	0,98	1,14
150757	0,03	1,16	1,15	2,01	2,34
150758	0,06	0,83	0,24	0,98	1,14
150762	0,01	1,26	0,05	1,13	1,32
150766	0,04	0,91	1,05	1,73	2,00
150767	0,04	0,95	0,78	1,52	1,77
150768	0,05	0,81	1,49	2,04	2,36
150769	0,04	0,84	1,37	1,96	2,25
150772	0,05	0,74	0,94	1,51	1,73
150773	0,01	0,75	1,13	1,63	1,88
150775	0,03	0,65	1,21	1,61	1,89
150777	0,05	0,63	1,27	1,68	1,95
150782	0,02	1,31	0,79	1,82	2,13

Manto 1, la distribución del contenido de azufre se encuentra en mayor cantidad en los plies que se ubican en la mitad del manto, y se observa que estos plies no tienen grandes

cantidades de contaminantes, sin embargo se puede observar que la cantidad de azufre de tipo orgánico aumenta, siendo considerable también la cantidad de azufre piritico.

Manto 2, según las muestras analizadas, el comportamiento es muy parecido pues en los plies ubicados en el centro del manto es que se concentra la mayor cantidad de azufre, en este caso el azufre piritico se encuentra en mayores cantidades.

Manto 3, sucede algo completamente diferente, este es un manto en el que se encuentran cantidades de azufre altos en los respaldos, es decir, en el piso y en el techo, y en la mitad o centro del manto, se encuentra limpio, con porcentajes menores al 1% de azufre. Después de analizar el contenido de azufre de los plies altos, se pudo inferir que estos tienen influencia piritica, es decir, tienen alto contenido de azufre piritico.

Manto 4, se observa gran cantidad de azufre en todos los plies, es un manto muy contaminado por azufre, y después de analizar las 3 muestras con mayor contenido de azufre, se puede ver, que a medida que el azufre aumenta en su contenido, el azufre orgánico también aumenta.

Manto 5, es el de mayor espesor números de plies (13), de los cuales 10 tienen un alto contenido de azufre, y solo 3 con un porcentaje mayor a 1%. De las muestras analizadas, se ve un mayor contenido de azufre de tipo orgánico, siendo alto también el contenido de azufre de tipo piritico.

La mayor cantidad de azufre en los diferentes plies en general, son de tipo orgánico, sin embargo, el contenido de tipo piritico, es considerable.

Los mantos 1 y 2, presentan alto contenido de azufre en la zona media y los respaldos se encuentran limpios. La mayor influencia es azufre de tipo orgánico.

El manto 3 tiene un comportamiento diferente y los respaldos es que se encuentra el mayor contenido de azufre, siendo el piritico el más influyente.

En los mantos 4 y 5, se encuentra una distribución uniforme del contenido de azufre, tanto en los respaldos, como en la zona media del manto. La mayor influencia es el azufre de tipo orgánico, o singenético.

4.5 Análisis de lavado de carbones en medios densos

En la tabla 12, se presentan los resultados del lavado de carbones en medios densos

Tabla 12: Resultados del lavado de carbones en medios denso 1,4 y 1,6.

Código de la Muestra	Identificación De La Muestra Por Parte Del Cliente	Humedad			Cenizas % ASTM D3174	Materias Volátiles % ISO 562	*Carbono Fijo % ASTM D3172	Azufre Total % ASTM D4239	Lavado en 1,4	Lavado en 1,6
		*Superficial % ASTM D3302	Residual % ASTM D3173	*Total % ASTM D3302						
150747	M1-1 PLQ-05	12,15	11,39	22,16	4,2	39,14	45,27	1,21	2,09	2,79
150750	M1-4 PLQ-05	11,11	11,2	21,07	2,45	39,4	46,95	1,93	1,69	2,03
150754	M1-8 PLQ-05	7,15	14,37	20,49	7,38	36,41	41,84	0,98	2,33	1,01
150757	M2-2 PLQ-05	6,39	13,98	19,48	6,51	36,8	42,71	2,01	1,72	0,88
150762	M3-2 PLQ-05	5,83	14,21	19,21	9,76	36,14	39,89	1,13	2,47	0,83
150766	M3-6 PLQ-05	7,62	13,39	19,99	4,01	38,09	44,51	1,73	1,58	1,07
150767	M4-1 PLQ-05	7,84	14,06	20,8	3,86	38,02	44,06	1,52	1,34	0,4
150768	M4-2 PLQ-05	8,34	13,39	20,61	5	37,83	43,78	2,04	1,77	0,63
150769	M4-3 PLQ-05	7,08	12,76	18,94	4,71	38,26	44,27	1,96	1,61	0,57
150772	M5-1 PLQ-05	5,12	12,56	17,04	11,43	38,91	37,1	1,51	1,28	
150773	M5-2 PLQ-05	12,01	13,4	23,8	6,37	36,58	43,65	1,63	0,98	0,72
150775	M5-4 PLQ-05	13,02	15	26,07	5,23	36,77	43	1,61	1,4	1,17
150777	M5-6 PLQ-05	5,82	13,88	18,89	10,92	33,24	41,96	1,68	0,89	1,72
150782	M5-11 PLQ05	4,79	14,44	18,54	8,31	34,77	42,48	1,82	1,73	1,74

Después de realizar lavabilidad de carbones en densidades de 1,4 y 1,6. Se determinó que:

En el manto 1, después de lavar las muestras escogidas, se aumentó la concentración de azufre total, con respecto a la concentración de azufre total inicial, tanto en densidad 1,4 y 1,6.

En dos de los ejemplos tomados, se observa que a mayor contenido de azufre pirítico, la concentración de azufre total en densidad 1,6 aumenta.

En el manto 2, solo se hizo una separación de carbones o lavado por densidades en una muestra, y está en las dos densidades realizadas, disminuye su concentración de azufre total, pero siendo mucho más importante a densidad 1,6 ya que queda en 0.88%.

En el manto 3, también se reduce la concentración de cantidad de azufre total en densidad de 1,6 quedando en concentraciones de 0,83 para la muestra 2 del manto 3 y 1.07 para la muestra 6 de este manto, en densidad 1,4 se concentra una gran cantidad de azufre, es decir, a una densidad de 1,4 quedan altamente enriquecidas las muestras de azufre.

El manto 4, tiene un comportamiento parecido al manto 3, es decir, después de lavar las muestras escogidas, se determina que en densidad 1,6 se disminuye considerablemente el contenido de azufre total, pasando en casos de 1,77% al 0,63%. En densidad de 1,4 se sigue concentrando la mayoría de azufre.

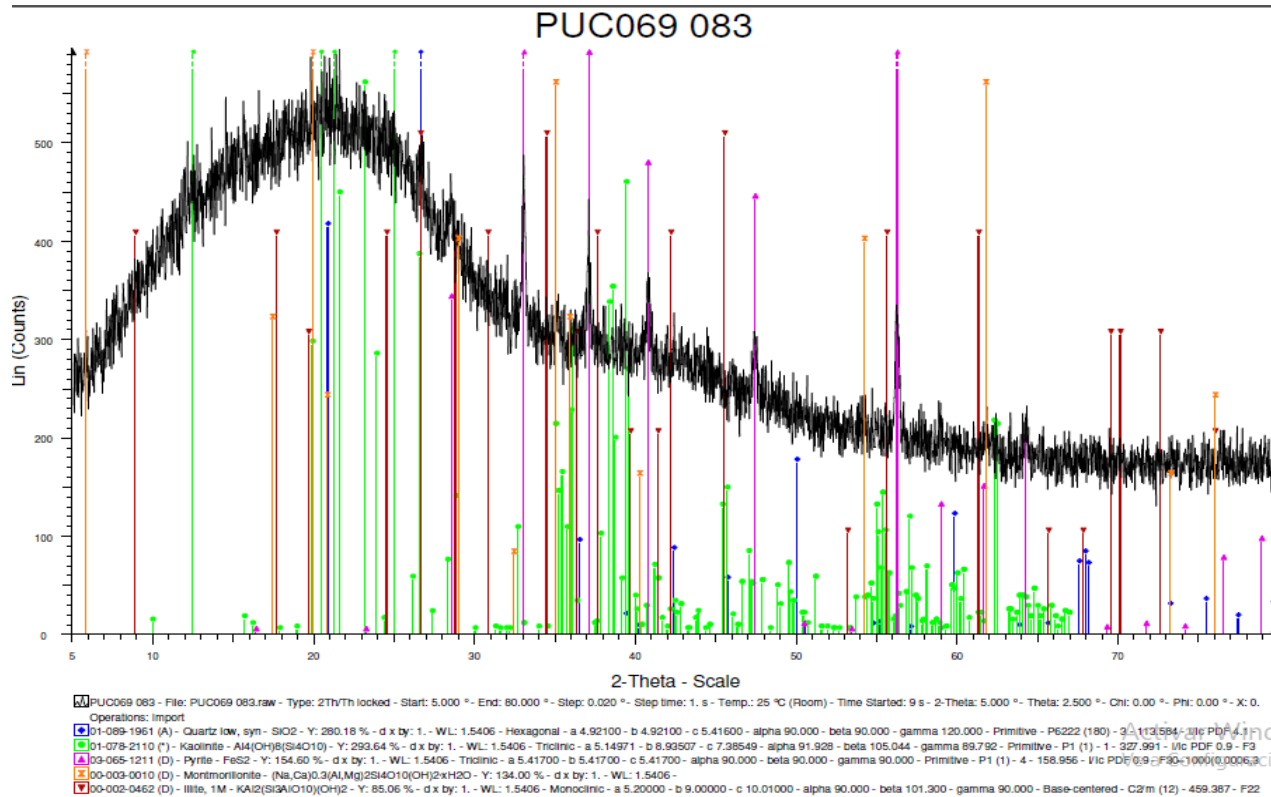
En el manto 5, las concentraciones de azufre total, bajan en densidad de 1,4 y 1,6, con respecto al azufre total inicial, pero generalmente no son tan considerables esas bajas. En este manto la mayoría de azufre pertenece a azufre orgánico.

4.6 Ensayos de Difracción de Rayos X (DRX) en muestras de carbón de Puerto Libertador

Se escogieron 3 muestras con alto contenido de azufre para analizar en difracción de rayos X, con el fin de determinar los compuestos y elementos mayores o traza presentes. Las muestras seleccionadas fueron, 157051 (PUC069083), 157057 (PUC069084), y 157068 (PUC069085), ver figuras 21 a 23.

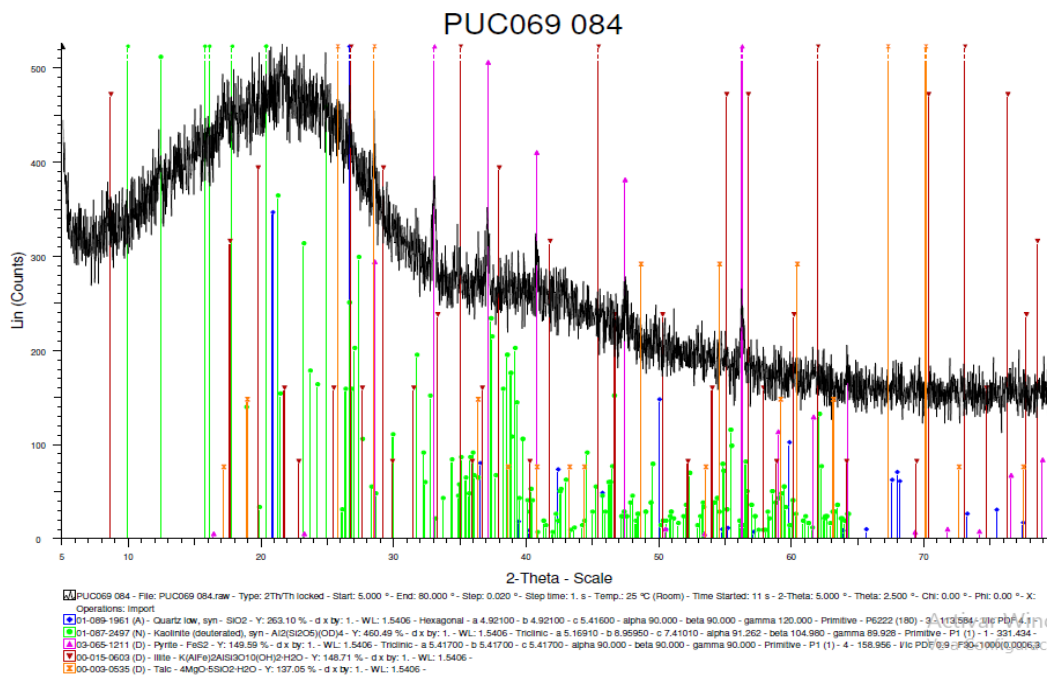
En la figura 21 y 22 se puede observar: Cuarzo, Caolinita, Pirita, illita y Montmorillonita; mientras que en la figura 23 no aparece la Montmorillonita.

Figura 21: DRX muestra PUC069083 (157051)



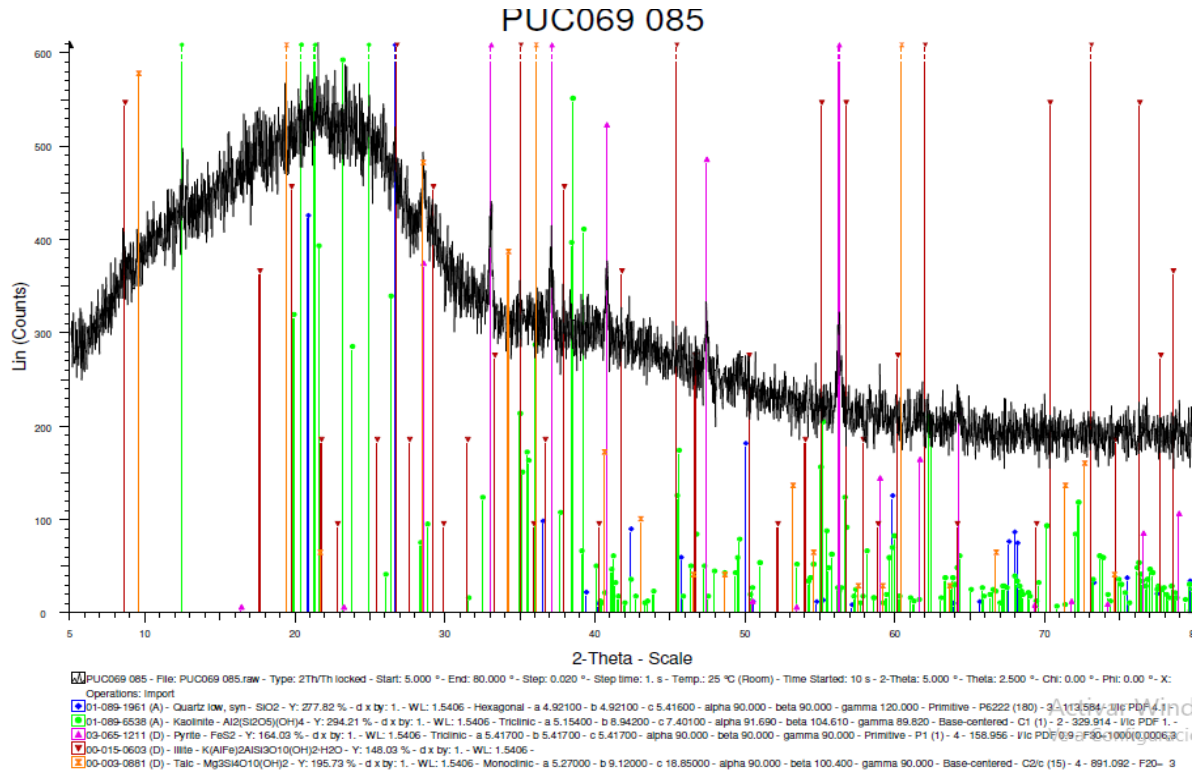
Fuente: Autor.

Figura 22: DRX muestra PUC069084 (157057)



Fuente: Autor.

Figura 23: DRX muestra PUC069085 (157068)



Fuente: Autor.

5. Conclusiones

En los diferentes mantos estudiados en el municipio de Puerto Libertador - Córdoba, se encontró que el azufre se encuentra distribuido aleatoriamente y cada manto se comporta diferente.

Existe una tendencia en los mantos de encontrarse el mayor contenido de azufre en los plies superiores, o cercanos al techo, mas evidente en los mantos 1, 2 y 4. El manto 5, tiene un comportamiento variable en sus diferentes plies.

Hay una relación directamente proporcional entre el azufre sulfático y el porcentaje de vitrinitas; exceptuando el manto 1.

Se encuentra una relación directa entre el porcentaje de azufre pirítico y el porcentaje de liptinitas en los mantos 2, 3 y 4.

Existe una relación inversamente proporcional entre el azufre orgánico y el porcentaje de inertinitas en los mantos 3, 4 y 5.

El contenido de azufre pirítico tiende a disminuir hacia la base de la columna estratigráfica, es decir que el manto 1 tiene mayor contenido de azufre pirítico que el manto 5. Por el contrario, el azufre orgánico tiende a aumentar hacia la base, pero el manto 1 tiene un contenido anómalo en uno de los plies en donde a mayor contenido de inertinitas, mayor contenido de azufre orgánico.

Es claro que el manto 1 tiene un comportamiento diferente al resto de la columna en lo que respecta a la composición maceral y el contenido de las diferentes formas de azufre.

Debido a que el contenido de azufre sulfático es normalmente muy bajo, menor al 0,1% no se ve reflejado en el lavado de carbones, por el contrario el azufre pirítico presenta una relación directa en los tres primeros mantos con el resultado del lavado en una densidad de 1,4 g/cm³ e inversa en los dos restantes mantos.

Los resultados de difracción de rayos x, indican la presencia de Cuarzo, Caolinita, Pirita, illita y Montmorillonita.

Bibliografía

- Amburú, V., et al. (2007). Disminución del contenido de azufre en carbón mineral, mediante procesos metalúrgicos para uso industrial. Revista del instituto de investigación FIGMMG. Vol. 10, No. 20 7-12 (2007) UNMSM. ISSN: 1561-0888 (impreso) / 1628-8097 (electrónico).
- ASTM D2013. Standard Practice for Preparing Coal Samples for Analysis.
- ASTM D2234. Standard Practice for Collection of a Gross Sample of Coal.
- ASTM D2492. Standard Test Method for Forms of Sulfur in Coal.
- ASTM D2797. Standard Practice for Preparing Coal Samples for Microscopical Analysis by Reflected Light.
- ASTM D2799. Standard Test Method for Microscopical Determination of the Maceral Composition of Coal.
- ASTM D3172. Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke.
- ASTM D3173. Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke.
- ASTM D3174. Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal.
- ASTM D3302. Standard Test Method for Total Moisture in Coal.
- ASTM D4239. Standard Test Method for Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke Using High- Temperature Tube Furnace Combustion.
- ASTM D4371. Standard Test Method for Determining the Washability Characteristics of Coal.
- ASTM D5865. Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke.
- Blandon. A., y Rey, I. (2004). Petrografía del Carbones.
- Blandon. A. (2007). Caracterización de Carbones.

- Bhupendra, S., y Barun, K., (2018). Desulfurization of high sulfur Indian coal by oil agglomeration using Linseed oil. DOI. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.10.045>.
- Chou, C., (2012). Sulfur in coals: A review of Geochemistry and Origins. *International Journal of Coal Geology*, 100 (2012) 1 – 13.
- C.I. Carbones del Caribe S.A. (2008). Prospección arqueológica. Área de explotación minera, Municipio de Puerto Libertador – Bijao, Córdoba. Informe final.
- Cortés, V. Carbón. [Consultado 14/08/2019]. Disponible en: <http://www.factoria3.com/documentos/CARBON.pdf>.
- Holguín, S., y Estrada, D., (2009). El Oxígeno, el Azufre y teorías ácido-base. (versión corregida y aumentada). ISBN: 970-3 t -0773-7.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC (2015). Diccionario geográfico de Colombia. DIGEO.
- Kiani, M., Ahmadi, A., y Zilouei, H., (2014). Biological removal of sulphur and ash from fine-grained high pyritic Sulphur coals using a mixed culture of mesophilic microorganisms.
- Kumar, D., y Kumar, D., (2018). Sustainable Management of Coal Preparation. ISBN. 978-0-12-812632-5. DOI. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-01854-5>.
- Longfei, T., et al, (2018). Feasibility study of reduction removal of thiophene sulfur in coal. DOI. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.08.016>.
- Meffer, S., Perkson, A., y Trass, O., (1995). Coal beneficiation and organic sulfur removal.
- Meyer, B., (1977). Sulfur, Energy, and Environment. Chemistry Department, University of Washington, Seattle, WA, U.S.A.
- Oyarzún, M., (2010). Contaminación aérea y sus efectos en la salud. *Revista Chilena enfermedades respiratorias*. 2010; 26: 16 – 25.
- Querol, X., Chinchón, J., y López, A., (1989). Distribución del azufre en Iso carbones albineses de la cuenca del Maestrazgo. *Acta Geológica Hispánica*, Vol. 24 (1989), No. 1, págs. 21 – 32.
- Querol, X., et al. (1993). Distribución, contenido y origen del azufre en los carbones albineses del distrito minero Teruel. *Cuaderno de geología ibérica*, No. 17, 137 – 151.

- Sánchez, J., et al. (1999). Efectos agudos de las partículas respirables y del dióxido de azufre sobre la salud respiratoria en niños del área industrial de Puchuncaví, Chile. *Revista Panam Salud Pública*. 1999; 6: 384 – 91.
- The International Organization for Standardization (ISO 562). *Hard Coal and Coke – Determination of Volatile Matter*.
- Tyler, N., et al. (2013). *Caracterización de la contaminación atmosférica en Colombia*. University College London – Universidad de los Andes.
- WHO, (2005). *Guía de calidad del aire de la OMS relativa al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*.
- Willians, E., y Keith M., (1963). Relationship between sulfur in coals and the occurrence of marine roof beds. *Economic Geology*, 58: 720-729.
- Xiaodong, Y., Zhenfu, L., y Deqing, G., (2019). Desulfurization of high sulfur fine coal using a novel combined beneficiation process. DOI. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.06.011>.
- Yanfeng, S., et al, (2019). Transformation and regulation of sulfur during pyrolysis of coal blend with high organic-sulfur fat coal. DOI. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.03.066>.