

Caracterización geoquímica y madurez de carbones térmicos de Norte de Santander, Colombia

Geochemical characterization and maturity of the thermal coals from Norte de Santander, Colombia

Billy A. Rodríguez-Castellanos , Adriana Castro-Rodríguez 
brodriguez@sgc.gov.co, acaastro@sgc.gov.co
Servicio Geológico Colombiano

Manuscrito recibido: 20 de febrero de 2023;

Recibido en formato revisado: 29 de noviembre de 2023;

Aceptado: 4 de diciembre de 2023.

Resumen

Debido a la creciente preocupación mundial por los elevados índices de contaminación ambiental y por el calentamiento global producto de las actividades humanas, se han comenzado a generar restricciones para el uso de los combustibles fósiles, entre ellos el carbón. Colombia al ser un país rico en este recurso mineral necesita comenzar a evaluar su uso potencial en otros campos y conocer de manera detallada las posibles implicaciones ambientales asociadas a su composición química. Actualmente el Servicio Geológico Colombiano viene desarrollando diversos proyectos encaminados a este propósito. Este trabajo presenta la caracterización geológica, fisicoquímica y petrográfica de los carbones térmicos de Norte de Santander, haciendo énfasis en la composición de elementos de interés ambiental. Se tomaron 87 muestras de carbón de frentes de mina en los municipios de Arboledas, Salazar, San Cayetano, Sardinata, Toledo y Tibú en el departamento de Norte de Santander. Las muestras fueron preparadas y se realizaron los siguientes análisis: Humedad de equilibrio, análisis próximo, determinación de carbono hidrógeno y nitrógeno, azufre total, formas de azufre, poder calorífico, índice de hinchamiento (FSI), índice de molienda (HGI), mercurio total, composición de elementos mayores, menores y trazas y reflectancia media de la vitrinita. Los mantos de carbón teniendo en cuenta su clasificación según los valores de reflectancia media de la vitrinita corresponden a carbones de rango bajo y medio que corresponden a subbituminosos y bituminosos lo que indica que no son carbones con alta madurez térmica.

Palabras clave: petrografía; análisis próximo; análisis elemental; madurez térmica.

Abstract

Due to the growing global concern about the high rates of environmental pollution and global warming as a result of human activities, restrictions have begun to be generated for the use of fossil fuels, including coal. Colombia, being a country rich in this mineral resource, needs to evaluate its potential use in other fields and to know in detail the possible environmental implications associated with its chemical composition. Currently, the Colombian Geological Service has been developing various projects aimed at this purpose. This work presents the geological, physicochemical and petrographic characterization of the thermal coals of Norte de Santander, emphasizing the composition of elements of environmental interest. 87 coal samples were taken from mine fronts in the municipalities of Arboledas, Salazar, San Cayetano, Sardinata, Toledo and Tibú in the department of Norte de Santander. The samples were prepared and the following analyzes were carried out: equilibrium humidity, proximate analysis, determination of carbon, hydrogen and nitrogen, total sulfur, forms of sulfur, calorific value, swelling index (FSI), grinding index (HGI), mercury, major, minor and trace elements and average reflectance of vitrinite. The coal seams, taking into account their classification according to the average reflectance values of the vitrinite, correspond to low and medium range coals that correspond to subbituminous and bituminous, which indicates that they are not coals with high thermal maturity.

Keywords: petrography; proximate analysis; elemental analysis; thermal maturity.

Como citar este artículo:

Rodríguez-Castellanos, B. A. y Castro-Rodríguez, A., (2023). Caracterización geoquímica y madurez de carbones térmicos de Norte de Santander, Colombia. *BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA*, 54, pp. 72 - 85. DOI:<https://doi.org/10.15446/rbct.n54.107357>.

1. Introducción

La limitación del uso del carbón para fines energéticos ha generado un creciente interés en encontrar posibles usos alternativos para este material. En tiempos recientes, se ha evaluado su potencial como materia prima para la obtención de materiales carbonosos, nanomateriales, y como posible depósito de minerales de interés.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, este trabajo pretende mostrar la caracterización geológica, fisicoquímica y petrográfica de algunos carbones térmicos de Norte de Santander. La caracterización geológica de la zona de estudio incluye una descripción de la geología local de las zonas de muestreo, descripción macroscópica de los mantos de carbón y sus respaldos y adquisición de datos estructurales.

Para este estudio se contó con muestras frescas tomadas directamente del manto en las minas de explotación subterránea y se realizó la caracterización petrográfica para determinar la reflectancia media de la vitrinita de los carbones. Asimismo, se realizó una caracterización fisicoquímica completa de las muestras que incluye análisis próximo, análisis último, determinación de elementos mayores, menores y trazas, índice de molienda, índice de hinchamiento, humedad de equilibrio y formas de azufre.

Los resultados obtenidos de los análisis petrográficos permiten inferir cual fue la madurez térmica de los carbones en Norte de Santander, también de la mano con la caracterización geoquímica realizada, es posible establecer la concentración y el modo de ocurrencia de los elementos contenidos en los carbones térmicos de esta región del país, lo cual, sirve como insumo para evaluar el potencial de estos carbones como depósitos para la obtención de elementos de interés.

2. Marco geológico

El área de estudio se encuentra ubicada en la parte norte de la Cordillera Oriental colombiana sobre el borde Este. Se tomaron 87 muestras de carbón en 57 minas de explotación subterránea. En los municipios de Sardinata, El Zulia, Salazar, Arboledas, Bochalema, Toledo, San Cayetano y Cúcuta (Fig. 1). Las formaciones geológicas evaluadas durante el muestreo y análisis fisicoquímico y petrográfico son: Formación Carbonera y Los Cuervos.

2.1 Geología regional

Las formaciones geológicas que contienen carbón en el departamento de Norte de Santander son: Catatumbo (Colpet, 1967a y 1967b), edad Cretácico superior y se encuentra hacia la parte Norte (Rincón y Monroy, 2012) que para este proyecto no fue muestreada; Los Cuervos y Carbonera, depositadas en el periodo Paleógeno (Oviedo et al., 2016). La

región de Norte de Santander tiene una superficie total de 2.779 km² y un potencial minero de carbón de 0,8 Bn de Toneladas (Arthur D. Little, 2010; Ingeominas 2012).

3. Formación Los Cuervos (E1E2c)

Compuesta, en su mayoría, por arcillolitas grises a grises verdosas, con esporádicas intercalaciones de arenitas de cuarzo; la parte inferior está caracterizada por la presencia de mantos de carbón y las arcillolitas se tornan de color gris oscuro, intercaladas con limolitas micáceas y areniscas de grano fino. En la parte superior, las arcillolitas se tornan de color rojo, amarillo y púrpura. Su espesor varía entre 250 y 490 m. Se le considera de edad Paleoceno Medio y Superior a Eoceno Inferior (Van der Hammen, 1958), (Rincón y Monroy, 2012).

En el área de la plancha 88 - Cúcuta, la Formación Los Cuervos se dispone en un cuerpo alargado y angosto paralelo a la Falla Tasajero; va desde el sector de la mina Caña Brava, ubicada al sur del cerro Tasajero, hasta la vereda La Pedregosa al norte. La Formación Cuervos, en la zona de estudio, se caracteriza por la presencia de mantos de carbón explotables, los cuales muestran espesores variables desde 10 cm hasta 1 m.

El espesor de la Formación Los Cuervos se encuentra en un rango entre 345 a 490 m (Notestein et al., 1944; Sutton, 1946). Secciones estructurales, realizadas en el levantamiento geológico de la plancha 88 - Cúcuta, muestran que el espesor calculado es de 500 m - aproximadamente - en el sector de Cerro Tasajero (vereda El Salado).

En el área de la Plancha 111 - Toledo, la Formación Los Cuervos está constituida, en su parte inferior, por una sucesión de lodolitas grises, muy carbonosas, con delgadas intercalaciones de areniscas grises a gris claras, localmente lodosas. La parte media está compuesta por areniscas lodosas grises, amarillentas, cuarzosas, localmente feldespáticas, de grano fino, con intercalaciones de lodolitas carbonosas y capas de carbón (0,20 a 1,50 m de espesor). Los sedimentos de esta unidad se depositaron - predominantemente - en un ambiente transicional (deltaico), evidenciado por la presencia de mantos de carbón. El espesor de la Formación Los Cuervos, en el área de la Plancha 111, es de aproximadamente 340 m.

3.1 Formación Carbonera (E2E3c)

Sucesión litológica de arcillolita gris a gris verdosa y areniscas, generalmente arcillosas, con presencia de carbones en las partes inferior y superior. El espesor varía entre 400 y 720 m. Van der Hammen (1958) indica una edad Eoceno superior a Oligoceno inferior (Rincón y Monroy, 2012). La Formación Carbonera suprayace la Formación Mirador. El contacto entre estas dos unidades es inconforme según Notestein et al. (1944); hacia el tope de la unidad, el contacto con la Formación León es conforme (Notestein et al., 1944).

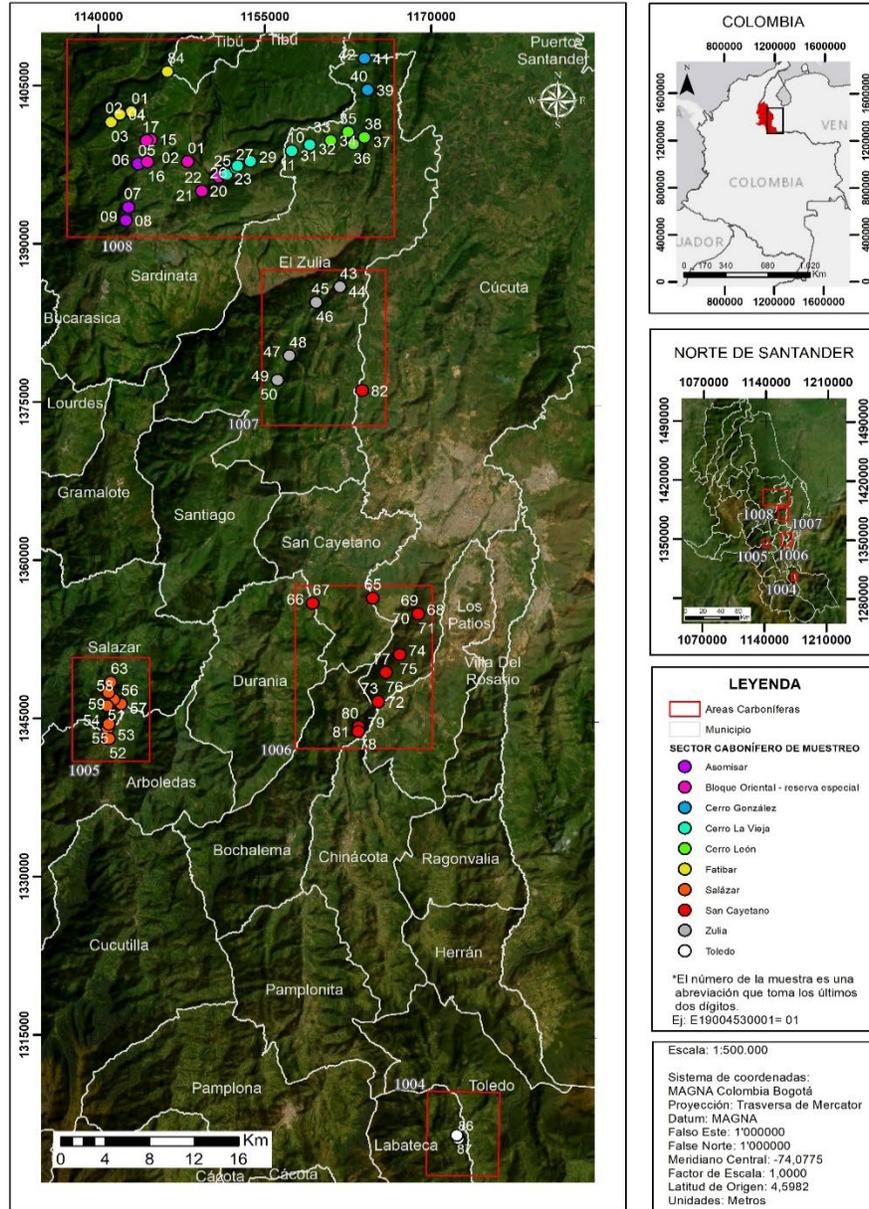


Figura 1. Localización de la zona de estudio, muestras tomadas y áreas carboníferas.
Fuente: Datos del estudio y [https:// www.ArcGIS.com](https://www.ArcGIS.com)

En el área de la plancha 88 – Cúcuta, la Formación Carbonera consiste en series espesas de arcillolitas grises verdosas, moteadas de color rojo y amarillo, intercaladas con areniscas en capas gruesas de color gris a gris verdoso de grano fino a grueso y variaciones de grano muy fino micáceas, y mantos de carbón que se presentan en la parte superior e inferior de la formación.

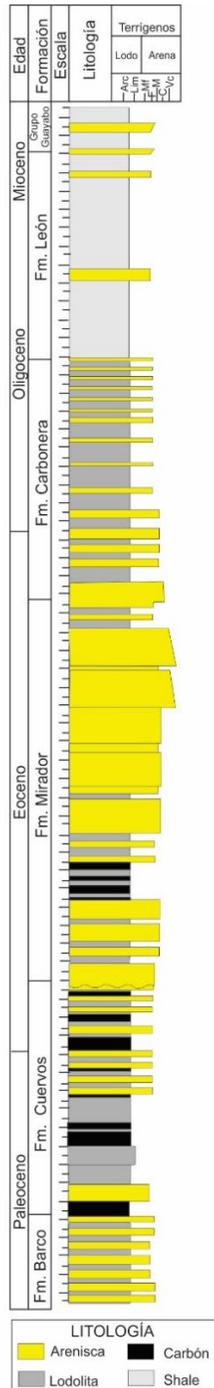
El espesor de la Formación Carbonera se encuentra en un promedio de 500 m, en algunos sectores como en Río Nuevo - al occidente de Sardinata - alcanza los 720 m (Notestein et al., 1944). En secciones estructurales, realizadas en el levantamiento geológico de la plancha 88 – Cúcuta, el

espesor calculado es de 520 m aproximadamente en el sector de Cerro Tasajero y la quebrada La Floresta.

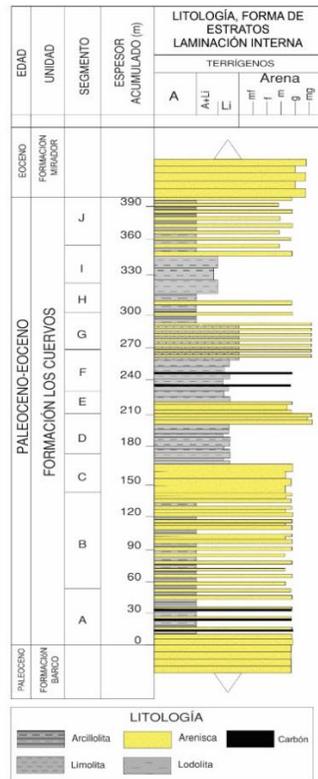
En el área de la Plancha 111 - Toledo, la Formación Carbonera está compuesta por lodolitas grises, gris amarillentas a gris rojizas, localmente ferruginosas, micáceas, con nódulos ferruginosos aplanados, paralelos con la estratificación, en capas - generalmente - gruesas. En la parte inferior, presenta capas de carbón entre 40 y 80 cm de espesor. La Formación Carbonera descansa, aparentemente, en concordancia estratigráfica sobre la Formación Mirador, mientras su contacto superior no aflora en el área de la Plancha 111.

En la Fig. 2 se resumen las características estratigráficas de las principales unidades sedimentarias que poseen mantos de carbón en las diferentes áreas

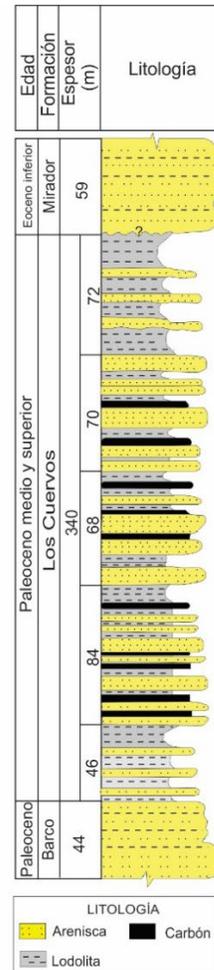
carboníferas, se detalla la formación Cuervos ya que tiene la mayor densidad de muestreo y análisis del estudio (Tabla 1).



Columna estratigráfica generalizada plancha 88 - Cúcuta escala 1:100.000 con formaciones pertenecientes al terciario. Tomado y modificado de (SGC, 2016).



Columna estratigráfica de la formación Los Cuervos levantada en 4 sectores de la plancha 77 - Campo Dos, escala 1:100.000. Tomado y modificado de SGC (2015).



Columna estratigráfica generalizada de la formación Los Cuervos, plancha 111 - Toledo escala 1:100.000. Tomado y modificado de INGEOMINAS (2001).

Figura 2. Columnas estratigráficas de las áreas carboníferas de estudio en la zona Norte de Santander. Fuente: Tomado y modificado de SGC, 2015 y 2016; INGEOMINAS 2001.

3.2 Definición de las áreas de estudio

El Departamento de Norte de Santander se define como una zona carbonífera que está dividida en ocho áreas y éstas, a su vez, en sectores y bloques carboníferos de acuerdo con

las características estratigráficas y estructurales estudiadas por Rincón y Monroy (2012). El muestreo de carbón en frente de mina fue sistemático en las áreas carboníferas de 1007 Zulia-Chinácota, 1006 Tasajero, 1005 Salazar, 1008 Catatumbo como se observa en la Fig. 3.

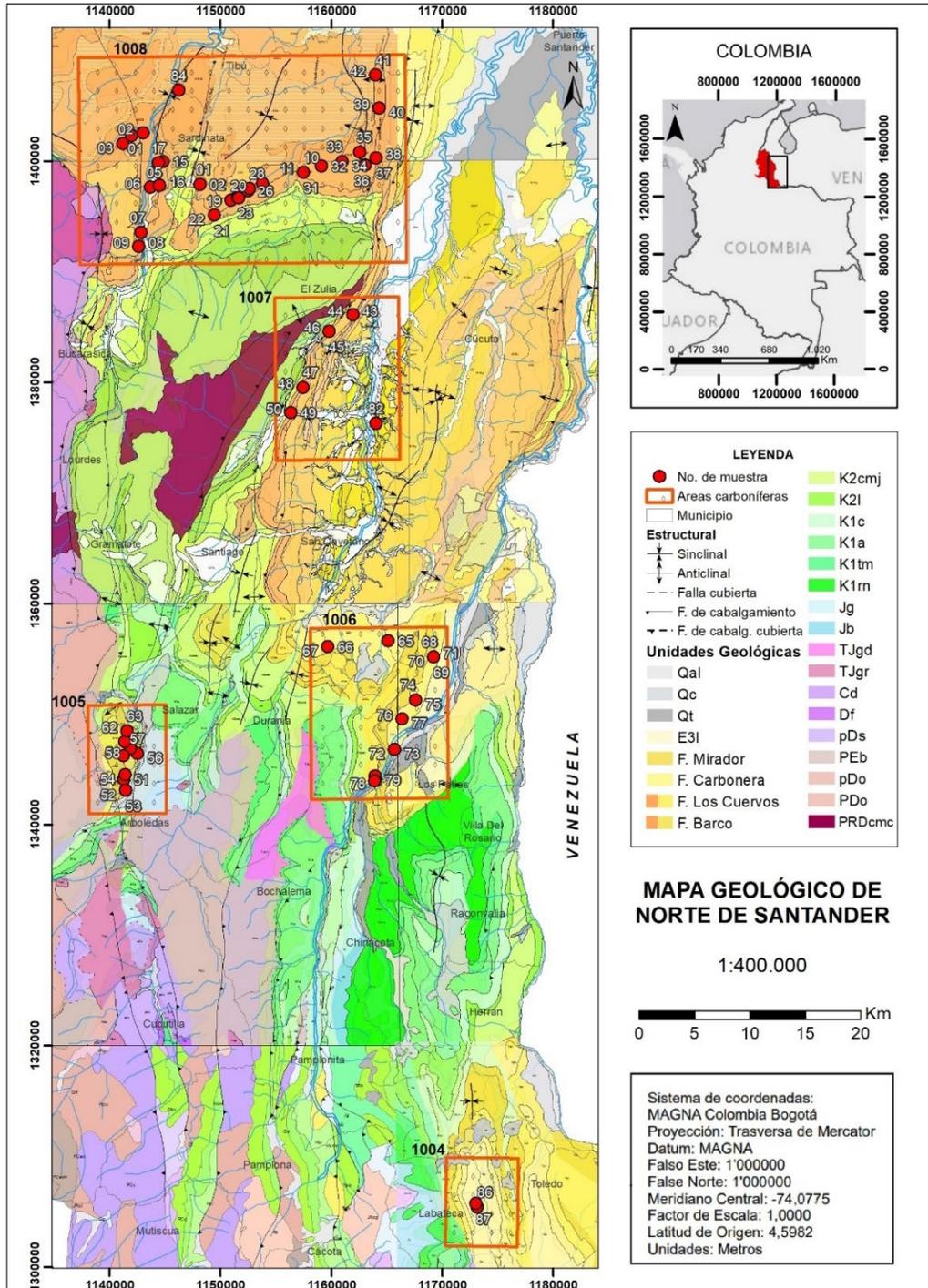


Figura 3. Mapa geológico con localización de áreas carboníferas y muestras tomadas. Fuente: Modificado de planchas geológicas SGC (77, 78, 87, 88, 98, 99 y 111) escala 1:100.000.

Tabla 1.

Muestras recolectadas para el proyecto.

Área	No. de muestras recolectadas	No. de minas muestreadas	Municipio(s)	Formación Geológica
1004 Herrán-Toledo	2	2	Toledo	Fm. Los Cuervos (2)
1005 Salazar	14	8	Salazar, Arboledas	Fm. Los Cuervos (14)
1006 Tasajero	18	10	San Cayetano	Fm. Carbonera (18)
1007 Zulia - Chinácota	18	10	Zulia	Fm. Los Cuervos (18)
1008 Catatumbo	35	27	Tibú, Sardinata	Fm. Los Cuervos (35)

Fuente: Datos del estudio.

4. Materiales y Métodos

Para este estudio se recolectaron muestras de carbón en los municipios de Arboledas, Salazar, San Cayetano, Sardinata, Tibú, Toledo y Zulia cubriendo la zona carbonífera Norte de Santander. Las muestras fueron tomadas de frentes de explotación de minas activas, se presentan en la Tabla 1.

El muestreo se realizó según lo establecido la norma ASTM D4596-09 (Reaprobada en 2015). Las muestras fueron enviadas al laboratorio de caracterización, procesamiento e investigación de carbones y materiales energéticos de la Dirección de Laboratorios del Servicio Geológico Colombiano en Bogotá. Las muestras recolectadas fueron homogeneizadas y cuarteadas con el fin de obtener fracciones para análisis petrográficos, análisis fisicoquímicos y de humedad de equilibrio. Para los análisis petrográficos se prepararon probetas pulidas según la norma ASTM D2797/2797-20a y para los análisis fisicoquímicos y de humedad de equilibrio se siguió el procedimiento de preparación consignando en la norma ASTM D2013/D2013M-20.

Se realizaron análisis petrográficos de reflectancia media de la vitrinita de acuerdo a la norma ASTM D2798-20. Las mediciones se hicieron en un microscopio petrográfico OLYMPUS BX 51TRF equipado con un espectrofotómetro J & M MICROSYSTEM TIDAS MSP-400. La caracterización fisicoquímica de las muestras incluyó: (1) determinación de humedad residual, materia volátil y cenizas por análisis próximo instrumental bajo norma ASTM D7582-15 en un equipo TGA LECO 701; (2) determinación de poder calorífico según norma ASTM D5865/5865M-19 en un calorímetro isoperibólico LECO AC600; (3) determinación de azufre total de acuerdo a la norma ASTM D4239-18e1 en un equipo LECO S832HT; (4) determinación de carbono, hidrógeno y nitrógeno bajo norma ASTM D5373-16 en un equipo LECO TruSpec CHN; (5) determinación del contenido de mercurio según norma ASTM D6722-19 en un equipo Milestone DMA-80 Tricell; (6) determinación de formas de azufre bajo la norma ASTM D2492-02 por gravimetría y absorción atómica en un equipo ANALYTIKJENA CONTRAA-300 (7) índice de molienda según norma ASTM D409/D409M-16 con la ayuda de un molino Hardgrove PREISER SCIENTIFIC, (8) índice de hinchamiento según norma ASTM D720/D720M-15e1 en un horno PREISER SCIENTIFIC.

Se realizaron (9) análisis de fluorescencia de rayos X bajo norma ASTM D4326-13 en un equipo Panalytical 000210-AXIOS y (10) análisis de ICP-MS bajo método interno en un equipo VARIAN 820-MS sobre muestras de cenizas obtenidas a 750°C para conocer la composición elemental de elementos mayores y menores de las muestras recolectadas.

5. Resultados

Para efectos de uniformidad, todos los resultados presentados en el trabajo se encuentran en base seca. Se determinaron un total de cuarenta y dos (42) parámetros fisicoquímicos y petrográficos a cada una de las ochenta y siete (87) muestras. Debido a razones de forma no es posible presentar toda la información analítica en este manuscrito, por lo tanto, los resultados se representan como promedios por área carbonífera evaluada para facilitar la visualización de los datos.

5.1 Caracterización petrográfica

La reflectancia media de la vitrinita para el total de las muestras varía entre 0.46% y 0.69% indicando rango de carbón entre subbituminoso (Bajo-rango A) y bituminoso (Rango medio D y C) según la norma ISO 11760-2005. Las muestras del área de Salazar presentan el rango más amplio entre los valores de reflectancia siendo 0.46% – 0.62%, en cuanto al promedio de reflectancia los resultados del área de Catatumbo muestran los valores más bajos respecto al conjunto de muestras teniendo un promedio de 0.54 %, indicando que para esa zona la madurez térmica en el nivel estratigráfico de la Formación Cuervos es menor. Por otro lado, para el área de Zulia - Chinácota se encuentran los valores más altos de reflectancia alcanzando un 0.69% y sugiriendo una mayor acción de factores como temperatura y presión en esta parte de la cuenca estratigráfica.

Los carbones en las diferentes áreas evaluadas corresponden a la Formación Los Cuervos y Carbonera, y por lo general el espesor de los mantos de carbón no excede más de 2 metros. Para el área de Salazar solo se tienen carbones de la formación Cuervos con espesores entre 0,7 m y 1,4 m, para el área de Tasajero los espesores ninguno supera un (1) metro, para la zona de Zulia - Chinácota los mantos tienen una mayor potencia, incluso alcanzando en ocasiones 2 metros, para los mantos evaluados en el área de Catatumbo se encuentran espesores entre 0,5 m – 1,6 m.

Tabla 2.
Resultados de análisis de reflectancia media de la vitrinita.

Área carbonífera	Rango de reflectancia (%)	Valores promedio Reflectancia (%)	Clasificación Según Ro ISO 11760-2005	Clasificación ASTM D388-19a
1004 Herrán-Toledo	0,51 – 0,59	0,55	Medio rango D (bituminoso D)	Bituminoso alto volátil A
1005 Salazar	0,46 – 0,62	0,56	Bajo rango A (subbituminoso) - Medio rango C (bituminoso C)	Bituminoso alto volátil A
1006 Tasajero	0,52 – 0,65	0,59	Medio rango D (bituminoso D) - Medio rango C (bituminoso C)	Bituminoso alto volátil A
1007 Zulia - Chinácota	0,59 – 0,69	0,63	Medio rango D (bituminoso D) - Medio rango C (bituminoso C)	Bituminoso alto volátil A
1008 Catatumbo	0,47 – 0,62	0,54	Bajo rango A (subbituminoso) - Medio rango C (bituminoso C)	Bituminoso alto volátil A y B

Fuente: Datos del estudio.

Los mayores valores de reflectancia media de vitrinita dentro del conjunto de datos, se presentan en la zona de Zulia-Chinácota, mostrando la madurez térmica de la formación los Cuervos en esta parte, con menores porcentajes (0,59%) se encuentra la zona de Tasajero (formación Carbonera), a continuación el área de Salazar hacia el extremo occidental con la formación los Cuervos, seguida por las muestras de Toledo que presentan una madurez similar entre sí, y finalmente con 0,54 % de valor promedio se encuentra la zona de Catatumbo al norte del departamento, donde se tomaron la mayor cantidad de muestras (formación Cuervos) del estudio. Este análisis demuestra que hacia la parte central de la zona carbonífera Norte de Santander los mantos de carbón alcanzan la máxima madurez, mientras que hacia los extremos (norte, sur y occidente) los valores disminuyen lo cual puede estar influenciado por procesos geológicos de evolución en la cuenca sedimentaria.

La clasificación de los mantos de carbón basada en el análisis petrográfico (Tabla 2) muestra que son de medio a bajo rango (subbituminoso a Bituminoso C y D) lo que permite caracterizarlos detalladamente en función de la madurez térmica alcanzada en el proceso de carbonización. Por otro lado, también se incluye la clasificación ASTM D388-19^a de los carbones evaluados en el presente estudio, siendo Bituminosos altos en volátiles tipo A y B, lo cual es concordante con lo reportado por INGEOMINAS, (2012) en el libro del carbón colombiano, siendo un insumo para su aprovechamiento.

5.2 Caracterización fisicoquímica

5.2.1 Análisis próximo, análisis elemental y poder calorífico

Los resultados de análisis próximo análisis elemental y poder calorífico se presentan en la Tabla 3. Se aprecia que los carbones de la zona de Herrán – Toledo presentan el

contenido de cenizas más elevado con un 14,99% y los carbones de la zona de Salazar presentan los valores más bajos para este parámetro con un 4,83%. Los valores de humedad residual varían entre el 1,29% para las muestras de Tasajero y 2,66% para las del Catatumbo. Los valores de materia volátil son muy similares en todas las zonas, siendo la zona de Zulia – Chinácota la que presenta los valores de materia volátil más bajos con un 40,21%, mientras que los valores más altos se presentan en la zona de Salazar con un 42,42%. En cuanto al análisis elemental, la zona de Herrán -Toledo presenta los valores de carbono, hidrógeno, y nitrógenos más bajos con un 68,83%, 5,58% y 1,39% respectivamente.

Para el azufre total la zona de Salazar exhibe las concentraciones más bajas con un 0,85% y la zona de tasajero presenta los niveles más altos de este elemento con un 1,34%. El poder calorífico de las muestras de la zona de Salazar y la zona de Zulia – Chinácota presentan valores altos y similares con 14091 BTU/lb y 14073 BTU/lb respectivamente, mientras que la zona de Herrán – Toledo presenta el valor más bajo con 12300 BTU/lb, esto se encuentra directamente relacionado con el alto contenido de cenizas de las muestras de esta zona.

La totalidad de los resultados obtenidos para el análisis próximo y el poder calorífico se presentan en la Fig. 4. Se evidencia que, aunque las muestras provienen de diversas áreas los resultados son muy homogéneos. Se obtienen valores promedio de humedad residual (a) de 2,04%, materia volátil (b) 41,65%, cenizas (c) 6,69% y poder calorífico (d) de 13900 BTU/lb.

Los resultados de formas de azufre se presentan en la Tabla 4. El azufre piritico varía entre 0,19% para la zona de Salazar y 0,53 para Tasajero, por su parte, el azufre sulfato tiene valores mínimos para la zona del Catatumbo con un 0,02% y máximos para la zona de Herrán-Toledo con un valor de 0,17%. El azufre orgánico calculado tiene un valor máximo de 0,76% en la zona de Zulia-Chinácota y un valor mínimo de 0,59% en la zona de Salazar.

Tabla 3. Resultados de análisis próximo y poder calorífico promedio para las zonas muestreada.

Área	Hr (%)	Mv b.s (%)	Cz b.s (%)	C b.s (%)	H b.s (%)	N b.s (%)	S b.s (%)	PC b.s (BTU/lb)
Herrán - Toledo	2,18	42,24	14,99	68,83	5,58	1,39	1,08	12300
Salazar	2,00	42,42	4,83	78,40	5,77	1,68	0,85	14091
Tasajero	1,29	42,29	8,94	76,02	5,91	1,68	1,34	13991
Zulia - Chinácota	1,58	40,01	6,56	78,15	5,82	1,60	1,25	14073
Catatumbo	2,66	41,84	5,87	76,81	6,08	1,64	0,95	13780

Fuente: Datos del estudio.

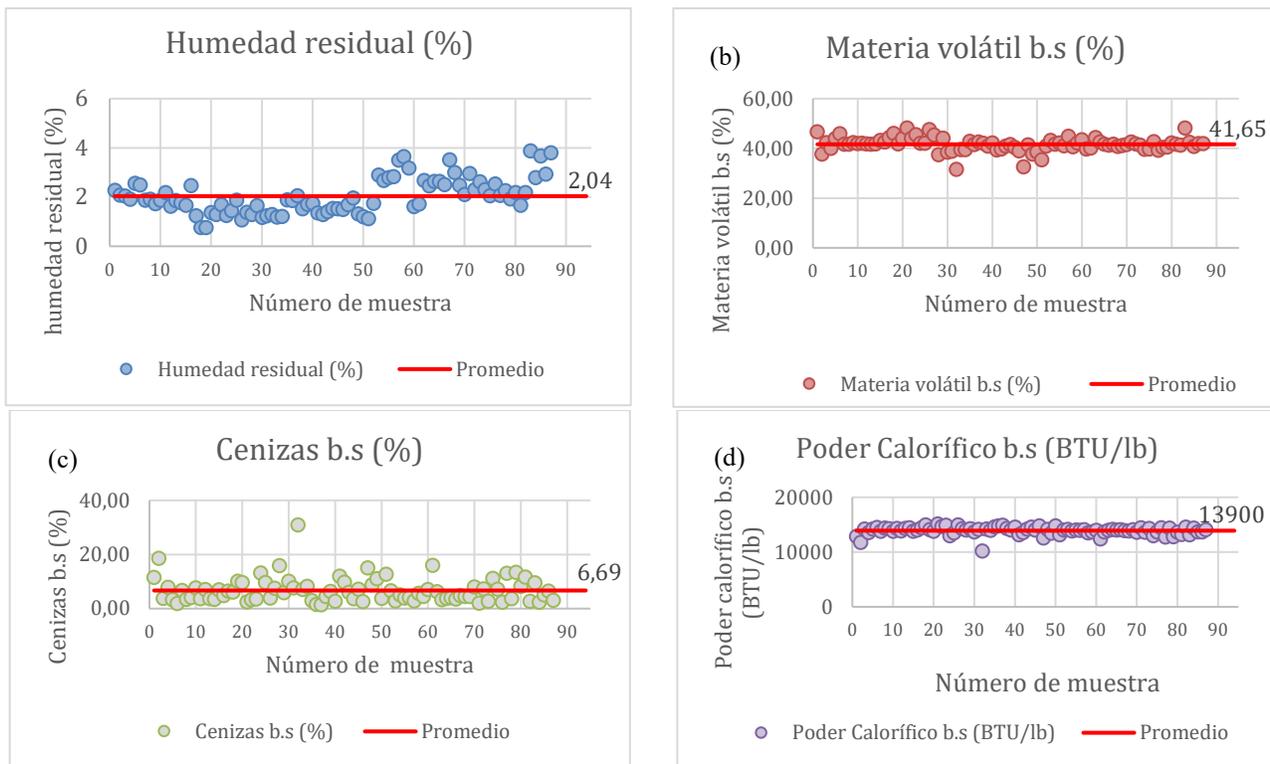


Figura 4. Distribución de los resultados de humedad residual (a), materia volátil (b), cenizas (c), y poder calorífico (d) para la totalidad de las muestras analizadas.

Fuente: Datos del estudio.

Tabla 4. Resultados de Formas de azufre en las muestras analizadas.

Área	Azufre pirítico b.s (%)	Azufre sulfato b.s (%)	Azufre orgánico calculado b.s (%)
Herrán - Toledo	0,30	0,17	0,62
Salazar	0,19	0,07	0,59
Tasajero	0,53	0,03	0,69
Zulia - Chinácota	0,45	0,04	0,76
Catatumbo	0,29	0,02	0,63

Fuente: Datos del estudio.

5.2.2 Índice de molienda Hardgrove (HGI), Índice de hinchamiento (FSI), y humedad de equilibrio (Heq)

Los resultados de las determinaciones de índice de molienda Hardgrove (HGI), de índice hinchamiento (FSI) y de humedad de equilibrio son reportados en la Tabla 5. Respecto al índice de molienda Hardgrove las muestras de Zulia – Chinácota presentan los valores más altos con un valor promedio de 60 mientras que las de la zona de Tasajero presental el menor valor con un HGI de 49, siendo todas las muestras muy homogéneas en sus resultados. El índice de hinchamiento presenta valores entre 2 y 4 evidenciando el bajo poder aglomerante de los carbones térmicos de Norte de Santander. Por otra parte, la humedad de equilibrio que es una medida de la humedad presente en los mantos de carbón presenta valores bajos que se encuentran entre el 1,70% y 4,84%.

Tabla 5.
Resultados de índice de molienda, índice de hinchamiento y humedad de equilibrio.

Área	HGI	FSI	Heq (%)
Herrán - Toledo	55	2	3,24
Salazar	51	4	2,46
Tasajero	49	3 1/2	1,70
Zulia - Chinácota	60	4	2,18
Catatumbo	51	3 1/2	4,84

Fuente: Datos del estudio.

5.3 Elementos mayores y menores

5.3.1 Elementos mayores

Los resultados de elementos mayores (Si, Al, Fe, Ca, Mg, Na, K, Ti, P, y S) expresados como óxidos en las cenizas de carbón se presentan en la Tabla 6. Los tres elementos más abundantes en todas las muestras son silicio, aluminio y hierro seguidos de calcio, azufre y titanio. Las muestras del área de Herrán-Toledo presentan las concentraciones más altas de silicio con un 62,53%. Los valores más bajos de este elemento se encuentran en las muestras del área de Salazar cuya concentración es del 47,13%. Los valores de aluminio son relativamente constantes en las áreas de Salazar, Tasajero, Zulia-Chinácota y Catatumbo con concentraciones que rondan el 30%. La zona de Herrán-Toledo exhibe las

menores concentraciones con un porcentaje del 23,65%. Esta tendencia también se aprecia con el hierro, donde para las áreas de de Salazar, Tasajero, Zulia-Chinácota y Catatumbo se encuentran concentraciones entre el 11% y el 14% mientras que para el área de Herrán-Toledo la concentración es de 7,43%.

Las concentraciones de azufre se correlacionan con las concentraciones de calcio y magnesio en cada área. Para el calcio se encontraron concentraciones que varían entre el 1,39% para el área de Tasajero y el 5,59% para el área de Salazar. Las áreas de Herrán-Toledo, Zulia-Chinácota y Catatumbo tiene concentraciones similares y cercanas al 2%. Lo mismo ocurre con el azufre donde la tendencia en cada área es similar y las concentraciones varían entre el 1,40% y 5,33%. Por otra parte las concentraciones de titanio se encuentran alrededor del 1,2% en todas las áreas de estudio.

Los elementos magnesio, sodio, potasio y fósforo tienen en general concentraciones menores al 1%, en el caso del área de Herrán Toledo el valor de concentración de este elemento es del 1,11% siendo el más alto entre las áreas de estudio, por otra parte, la concentración de magnesio en las muestras de Salazar es del 1,03% siendo el área con los valores más altos. El fósforo es el elemento mayor menos abundante, sus concentraciones varían entre el 0,06% para el área de Herrán Toledo y el 0,32% para Tasajero.

Tabla 6.
Elementos mayores en las cenizas de carbón.

Óxido (%)	Herrán-Toledo	Salazar	Tasajero	Zulia-Chinácota	Catatumbo
SiO ₂	62,53	47,13	52,72	51,76	54,34
Al ₂ O ₃	23,65	30,50	29,39	29,15	29,43
Fe ₂ O ₃	7,43	11,28	12,79	13,89	10,66
CaO	2,19	5,59	1,39	2,08	2,68
MgO	0,90	1,03	0,71	0,60	0,85
Na ₂ O	0,30	0,23	0,26	0,19	0,28
K ₂ O	1,11	0,24	0,75	0,59	0,58
TiO ₂	1,08	1,30	1,23	1,54	1,52
P ₂ O ₅	0,06	0,13	0,32	0,16	0,07
SO ₃	2,95	5,33	1,40	1,61	2,44

Fuente: Datos del estudio.

Tabla 7.
Elementos menores en las cenizas de carbón.

Elemento (mg/kg)	Herrán-Toledo	Salazar	Tasajero	Zulia-Chinácota	Catatumbo
Sr	343	454	400	189	226
Mn	141	111	124	292	323
V	718	513	1888	858	807
Cr	175	112	279	174	175
Co	34	56	83	100	65
Ni	130	179	280	311	203
Cu	150	143	305	215	183
Zn	196	91	291	408	128
Be	13	24	22	34	29
Cd	1	0,5	2	2	1
Ba	924	894	1183	599	674
As	26	57	39	75	40
Pb	43	65	66	72	75
Hg (□g/kg)	138	100	164	131	88

Fuente: Datos del estudio.

5.3.2 Elementos menores

Los resultados de elementos menores sobre las cenizas del carbón (Sr, Mn, V, Cr, Co Ni, Cu, Zn, Be, Cd, Ba, As, Pb y Hg) se exponen en la Tabla 7. Los resultados son expresados en mg/kg (ppm) excepto para el mercurio cuyos valores se expresan en µg/kg (ppb). Los elementos mas abundantes en todas las áreas de estudio son vanadio y bario con concentraciones superiores a los 500 mg/kg, y los menos abundantes, cobalto, plomo, arsénico berilio, cadmio y mercurio que tiene concentraciones promedio inferiores a 100 mg/kg. Los elementos restantes (Cr, Mn, Ni, Cu y Zn) presentan concentraciones intermedias.

6. Discusión

Con la información de las concentraciones determinadas en el laboratorio y con los datos de concentración media mundial de éstos elementos en las cenizas de carbón bituminoso (WAC) reportados por Ketris y Yudovich (2009), se realiza el cálculo de los coeficientes de concentración (CC). Estos coeficientes permiten mirar si un elemento está enriquecido o agotado respecto de la concentración media mundial. El CC se calcula dividiendo el valor de concentración obtenido entre el valor de la media mundial de dicho elemento. Dei et al. (2016) clasifican el enriquecimiento o agotamiento en la siguiente escala: $CC > 100$ inusualmente enriquecido; $CC > 10$ significativamente enriquecido; $5 < CC < 10$ enriquecido; $2 < CC < 5$ ligeramente enriquecido; $0,5 < CC < 2$ dentro de la media mundial y $CC < 0,5$ agotado. En la Tabla 8 se presentan los valores de las concentraciones medias mundiales (WAC) y los valores calculados de CC para los elementos menores analizados. En verde oscuro se resalta el vanadio para el área de Tasajero que presenta un valor de CC superior a 10 lo cual indica que este elemento en esta zona en particular se encuentra significativamente enriquecido. Este mismo

elemento presenta un valor de CC de 5,05 en el área de Zulia – Chinácota indicando que está enriquecido.

En el área de Tasajero vanadio, cromo, cobalto, níquel y cobre presentan valores de CC entre 2 y 5 mostrando que se encuentran ligeramente enriquecidos. En Zulia -Chinácota vanadio, cobalto, níquel, cinc y Berilio también presentan esta misma clasificación. Por el lado de Catatumbo ligeramente enriquecidos están el vanadio el berilio y el níquel. Por su parte en el área de Herrán – Toledo el único elemento ligeramente enriquecido es el Vanadio con un valor de CC de 4,22.

Se observa que en la zona de Herrán – Toledo estroncio, manganeso y cadmio arrojan valores de CC menores a 0,5 por tanto se encuentran agotados. En el área de Salazar los elementos agotados corresponden al manganeso y al cadmio. Para la zona de Tasajero el único elemento con valores de CC inferiores a 0,5 es el manganeso. Por último, en las zonas de Zulia-Chinácota y Catatumbo el único elemento agotado es el estroncio.

En la Tabla 9, se presentan los valores de los coeficientes de correlación de Pearson para los elementos mayores, menores, azufre total y cenizas. El coeficiente de correlación de Pearson, que es un valor entre -1 y 1 permite evaluar la relación lineal que puede existir entre dos variables independientes. Según el trabajo de Gürdal (2007) el coeficiente de correlación de Pearson también permite obtener información sobre la afinidad orgánica o inorgánica de un elemento cuando se calcula el coeficiente de Pearson con relación a el contenido de cenizas. Es decir, si el coeficiente de Pearson es mayor a 0,5 el elemento está asociado a la matriz inorgánica del carbón, mientras que, si el valor del coeficiente es inferior a -0,5 el elemento estará asociado a la matriz orgánica. Todos aquellos elementos cuyos coeficientes de correlación se encuentran entre -0,5 y 0,5 estarán relacionados tanto con la matriz inorgánica como con la orgánica.

Tabla 8. Valores de los coeficientes de concentración CC y valor medio mundial de los elementos analizados.

Elemento	Herrán-Toledo	Salazar	Tasajero	Zulia-Chinácota	Catatumbo	WAC
Sr	0,46	0,61	0,54	0,26	0,31	740
Mn	0,33	0,26	0,29	0,68	0,75	430
V	4,22	3,02	11,11	5,05	4,75	170
Cr	1,46	0,93	2,33	1,45	1,46	120
Co	0,93	1,50	2,24	2,69	1,75	37
Ni	1,30	1,79	2,80	3,11	2,03	100
Cu	1,36	1,30	2,78	1,96	1,67	110
Zn	1,15	0,53	1,71	2,40	0,75	170
Be	1,09	1,99	1,80	2,81	2,41	12
Cd	0,48	0,38	1,88	1,26	0,54	1,2
Ba	0,94	0,91	1,21	0,61	0,69	980
As	0,57	1,25	0,84	1,63	0,87	46
Pb	0,78	1,19	1,20	1,31	1,36	55
Hg (mg/kg)	1,38	1,00	1,64	1,31	0,88	100

Fuente: Datos del estudio.

Tabla 9.
Coeficientes de Pearson para los elementos mayores, menores, azufre total y cenizas

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Sr	Mn	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Be	Cd	Ba	As	Pb	Hg	S Total	Cenizas
SiO ₂	1,00	0,10	-0,74	-0,34	-0,23	-0,31	0,52	0,40	-0,21	-0,40	-0,39	-0,01	-0,05	0,06	-0,18	-0,34	-0,10	-0,11	0,06	-0,32	0,14	-0,54	0,08	-0,38	-0,45	0,15
Al ₂ O ₃	0,10	1,00	-0,50	-0,23	-0,09	0,09	-0,36	0,35	0,23	-0,26	0,12	-0,23	0,21	0,07	-0,08	-0,16	0,25	-0,19	-0,02	-0,10	-0,01	-0,48	0,56	-0,46	-0,43	-0,22
Fe ₂ O ₃	-0,74	-0,50	1,00	-0,14	-0,13	0,09	-0,12	-0,48	0,10	-0,04	-0,02	0,03	0,07	0,11	0,32	0,54	0,16	0,30	0,02	0,38	-0,09	0,86	-0,12	0,72	0,79	0,08
CaO	-0,34	-0,23	-0,14	1,00	0,61	0,25	-0,27	-0,12	-0,12	0,90	0,42	0,17	-0,29	-0,41	-0,25	-0,27	-0,42	-0,24	-0,13	-0,14	-0,10	-0,18	-0,44	-0,22	-0,28	-0,16
MgO	-0,23	-0,09	-0,13	0,61	1,00	0,18	-0,25	0,06	-0,26	0,72	0,35	0,14	-0,31	-0,42	-0,27	-0,34	-0,42	-0,30	-0,09	-0,21	0,01	-0,35	-0,29	-0,36	-0,42	-0,38
Na ₂ O	-0,31	0,09	0,09	0,25	0,18	1,00	-0,34	-0,03	0,10	0,18	0,27	0,17	0,08	-0,03	-0,05	0,05	-0,06	-0,16	-0,04	-0,07	0,01	-0,05	-0,04	-0,15	-0,15	-0,27
K ₂ O	0,52	-0,36	-0,12	-0,27	-0,25	-0,34	1,00	-0,17	-0,09	-0,30	-0,27	0,05	0,17	0,30	0,08	0,08	0,08	0,23	0,02	0,10	0,17	0,01	-0,16	0,21	0,18	0,59
TiO ₂	0,40	0,35	-0,48	-0,12	0,06	-0,03	-0,17	1,00	-0,12	-0,16	-0,22	0,03	-0,20	-0,14	-0,04	-0,21	-0,06	-0,08	0,28	-0,34	-0,17	-0,50	0,43	-0,55	-0,52	-0,40
P ₂ O ₅	-0,21	0,23	0,10	-0,12	-0,26	0,10	-0,09	-0,12	1,00	-0,15	0,70	-0,10	0,53	0,39	0,13	0,07	0,33	0,24	-0,23	0,26	0,12	0,15	0,09	0,10	0,16	0,26
SO ₃	-0,40	-0,26	-0,04	0,90	0,72	0,18	-0,30	-0,16	-0,15	1,00	0,50	0,22	-0,31	-0,42	-0,23	-0,25	-0,42	-0,24	-0,10	-0,12	-0,10	-0,14	-0,44	-0,20	-0,25	-0,23
Sr	-0,39	0,12	-0,02	0,42	0,35	0,27	-0,27	-0,22	0,70	0,50	1,00	0,05	0,28	0,11	-0,05	-0,13	0,05	0,00	-0,25	0,13	0,14	-0,06	-0,16	-0,12	-0,12	0,02
Mn	-0,01	-0,23	0,03	0,17	0,14	0,17	0,05	0,03	-0,10	0,22	0,05	1,00	-0,19	-0,14	0,23	-0,04	-0,30	0,18	0,19	-0,15	0,07	-0,04	-0,20	-0,15	-0,14	-0,17
V	-0,05	0,21	0,07	-0,29	-0,31	0,08	0,17	-0,20	0,53	-0,31	0,28	-0,19	1,00	0,64	0,16	0,16	0,58	0,15	-0,21	0,31	0,07	0,10	0,22	0,16	0,20	0,42
Cr	0,06	0,07	0,11	-0,41	-0,42	-0,03	0,30	-0,14	0,39	-0,42	0,11	-0,14	0,64	1,00	0,36	0,42	0,75	0,19	0,01	0,41	0,08	0,15	0,17	0,17	0,21	0,22
Co	-0,18	-0,08	0,32	-0,25	-0,27	-0,05	0,08	-0,04	0,13	-0,23	-0,05	0,23	0,16	0,36	1,00	0,79	0,37	0,64	0,50	0,43	-0,02	0,21	0,10	0,14	0,26	-0,08
Ni	-0,34	-0,16	0,54	-0,27	-0,34	0,05	0,08	-0,21	0,07	-0,25	-0,13	-0,04	0,16	0,42	0,79	1,00	0,46	0,52	0,40	0,47	0,02	0,39	0,10	0,38	0,48	0,00
Cu	-0,10	0,25	0,16	-0,42	-0,42	-0,06	0,08	-0,06	0,33	-0,42	0,05	-0,30	0,58	0,75	0,37	0,46	1,00	0,22	0,01	0,54	0,08	0,15	0,48	0,25	0,29	0,17
Zn	-0,11	-0,19	0,30	-0,24	-0,30	-0,16	0,23	-0,08	0,24	-0,24	0,00	0,18	0,15	0,19	0,64	0,52	0,22	1,00	0,13	0,59	0,02	0,22	-0,04	0,28	0,38	0,20
Be	0,06	-0,02	0,02	-0,13	-0,09	-0,04	0,02	0,28	-0,23	-0,10	-0,25	0,19	-0,21	0,01	0,50	0,40	0,01	0,13	1,00	0,00	0,15	-0,01	0,15	-0,14	-0,12	-0,35
Cd	-0,32	-0,10	0,38	-0,14	-0,21	-0,07	0,10	-0,34	0,26	-0,12	0,13	-0,15	0,31	0,41	0,43	0,47	0,54	0,59	0,00	1,00	0,11	0,30	-0,02	0,38	0,46	0,22
Ba	0,14	-0,01	-0,09	-0,10	0,01	0,01	0,17	-0,17	0,12	-0,10	0,14	0,07	0,07	0,08	-0,02	0,02	0,08	0,02	0,15	0,11	1,00	-0,12	-0,07	0,04	-0,03	0,13
As	-0,54	-0,48	0,86	-0,18	-0,35	-0,05	0,01	-0,50	0,15	-0,14	-0,06	-0,04	0,10	0,15	0,21	0,39	0,15	0,22	-0,01	0,30	-0,12	1,00	-0,10	0,77	0,80	0,25
Pb	0,08	0,56	-0,12	-0,44	-0,29	-0,04	-0,16	0,43	0,09	-0,44	-0,16	-0,20	0,22	0,17	0,10	0,10	0,48	-0,04	0,15	-0,02	-0,07	-0,10	1,00	-0,09	-0,02	-0,11
Hg	-0,38	-0,46	0,72	-0,22	-0,36	-0,15	0,21	-0,55	0,10	-0,20	-0,12	-0,15	0,16	0,17	0,14	0,38	0,25	0,28	-0,14	0,38	0,04	0,77	-0,09	1,00	0,90	0,57
S Total	-0,45	-0,43	0,79	-0,28	-0,42	-0,15	0,18	-0,52	0,16	-0,25	-0,12	-0,14	0,20	0,21	0,26	0,48	0,29	0,38	-0,12	0,46	-0,03	0,80	-0,02	0,90	1,00	0,52
Cenizas	0,15	-0,22	0,08	-0,16	-0,38	-0,27	0,59	-0,40	0,26	-0,23	0,02	-0,17	0,42	0,22	-0,08	0,00	0,17	0,20	-0,35	0,22	0,13	0,25	-0,11	0,57	0,52	1,00

Fuente: Datos del estudio.

Tabla 10.

Coefficientes de Pearson para los elementos mayores, menores, azufre total y cenizas (zona carbonífera de Boyacá)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Sr	Mn	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Be	Cd	Ba	As	Pb	Zr	Hg	S Total	Cenizas
SiO ₂	1,00	-0,39	-0,54	-0,46	-0,05	-0,39	0,28	0,16	-0,50	-0,15	-0,57	-0,14	-0,14	0,12	-0,38	-0,09	0,06	-0,13	-0,08	-0,31	-0,28	-0,25	-0,33	-0,21	-0,19	-0,22	0,45
Al ₂ O ₃	-0,39	1,00	-0,37	-0,02	-0,21	0,30	0,06	0,16	0,23	-0,23	0,33	-0,17	0,35	0,01	0,30	-0,02	-0,26	0,19	-0,16	0,18	0,16	-0,25	0,44	0,42	-0,37	-0,46	-0,29
Fe ₂ O ₃	-0,54	-0,37	1,00	-0,08	-0,10	-0,05	-0,15	-0,26	-0,11	0,11	-0,08	0,08	-0,06	0,09	0,24	0,19	0,19	0,06	0,30	0,23	-0,12	0,61	0,04	-0,52	0,58	0,78	-0,14
CaO	-0,46	-0,02	-0,08	1,00	0,44	0,31	-0,42	-0,08	0,79	0,39	0,66	0,36	-0,09	-0,38	-0,07	-0,12	-0,10	-0,14	-0,08	-0,07	0,42	-0,18	-0,01	0,59	-0,11	-0,22	-0,24
MgO	-0,05	-0,21	-0,10	0,44	1,00	0,04	0,18	-0,51	-0,05	0,41	-0,04	0,44	-0,15	-0,20	-0,08	-0,07	-0,12	-0,10	0,15	0,09	-0,12	-0,16	-0,32	-0,06	-0,08	-0,05	0,10
Na ₂ O	-0,39	0,30	-0,05	0,31	0,04	1,00	-0,18	0,28	0,40	-0,06	0,47	0,14	0,01	-0,16	0,20	0,21	0,05	-0,13	0,08	0,28	0,32	0,14	0,21	0,45	0,05	-0,19	-0,28
K ₂ O	0,28	0,06	-0,15	-0,42	0,18	-0,18	1,00	-0,51	-0,29	-0,25	-0,35	-0,21	0,32	0,20	0,00	-0,05	-0,06	0,01	-0,05	0,11	-0,21	0,01	-0,27	-0,40	0,19	0,08	0,57
TiO ₂	0,16	0,16	-0,26	-0,08	-0,51	0,28	-0,51	1,00	0,07	-0,03	0,19	-0,06	-0,14	0,01	-0,09	-0,07	-0,02	-0,06	-0,27	-0,32	0,21	-0,12	0,21	0,46	-0,23	-0,26	-0,17
P ₂ O ₅	-0,50	0,23	-0,11	0,79	-0,05	0,40	-0,29	0,07	1,00	-0,01	0,88	0,06	0,09	-0,26	-0,01	-0,07	-0,09	-0,01	-0,17	-0,06	0,63	-0,09	0,15	0,75	-0,04	-0,27	-0,24
SO ₃	-0,15	-0,23	0,11	0,39	0,41	-0,06	-0,25	-0,03	-0,01	1,00	0,02	0,33	-0,29	-0,35	0,01	-0,06	-0,05	-0,06	-0,10	-0,02	-0,01	-0,14	-0,14	0,02	0,14	0,02	-0,04
Sr	-0,57	0,33	-0,08	0,66	-0,04	0,47	-0,35	0,19	0,88	0,02	1,00	0,08	-0,01	-0,25	0,06	-0,03	-0,04	0,04	-0,21	-0,01	0,69	-0,10	0,18	0,86	-0,12	-0,28	-0,36
Mn	-0,14	-0,17	0,08	0,36	0,44	0,14	-0,21	-0,06	0,06	0,33	0,08	1,00	-0,23	-0,33	0,13	-0,02	-0,03	-0,03	0,02	-0,17	0,02	-0,08	-0,18	0,09	-0,08	0,06	-0,01
V	-0,14	0,35	-0,06	-0,09	-0,15	0,01	0,32	-0,14	0,09	-0,29	-0,01	-0,23	1,00	0,28	0,23	0,00	-0,13	0,01	-0,06	0,32	0,16	0,07	0,45	-0,08	0,09	0,03	0,09
Cr	0,12	0,01	0,09	-0,38	-0,20	-0,16	0,20	0,01	-0,26	-0,35	-0,25	-0,33	0,28	1,00	-0,02	0,01	0,05	0,08	0,06	0,11	-0,08	0,22	0,00	-0,29	0,15	0,10	0,05
Co	-0,38	0,30	0,24	-0,07	-0,08	0,20	0,00	-0,09	-0,01	0,01	0,06	0,13	0,23	-0,02	1,00	0,40	0,03	0,13	0,38	0,38	0,06	0,15	0,44	-0,04	0,12	0,06	-0,33
Ni	-0,09	-0,02	0,19	-0,12	-0,07	0,21	-0,05	-0,07	-0,07	-0,06	-0,03	-0,02	0,00	0,01	0,40	1,00	-0,03	0,19	0,41	0,28	0,03	0,33	0,14	-0,07	0,30	0,14	-0,14
Cu	0,06	-0,26	0,19	-0,10	-0,12	0,05	-0,06	-0,02	-0,09	-0,05	-0,04	-0,03	-0,13	0,05	0,03	-0,03	1,00	0,05	-0,07	0,00	-0,09	-0,03	-0,13	-0,18	0,07	0,31	0,11
Zn	-0,13	0,19	0,06	-0,14	-0,10	-0,13	0,01	-0,06	-0,01	-0,06	0,04	-0,03	0,01	0,08	0,13	0,19	0,05	1,00	0,04	0,23	0,14	0,03	0,00	-0,01	-0,03	0,11	-0,07
Be	-0,08	-0,16	0,30	-0,08	0,15	0,08	-0,05	-0,27	-0,17	-0,10	-0,21	0,02	-0,06	0,06	0,38	0,41	-0,07	0,04	1,00	0,26	-0,22	0,28	0,12	-0,29	0,14	0,08	-0,26
Cd	-0,31	0,18	0,23	-0,07	0,09	0,28	0,11	-0,32	-0,06	-0,02	-0,01	-0,17	0,32	0,11	0,38	0,28	0,00	0,23	0,26	1,00	-0,02	0,20	0,39	-0,15	0,12	0,16	-0,22
Ba	-0,28	0,16	-0,12	0,42	-0,12	0,32	-0,21	0,21	0,63	-0,01	0,69	0,02	0,16	-0,08	0,06	0,03	-0,09	0,14	-0,22	-0,02	1,00	-0,08	0,24	0,58	-0,06	-0,17	-0,15
As	-0,25	-0,25	0,61	-0,18	-0,16	0,14	0,01	-0,12	-0,09	-0,14	-0,10	-0,08	0,07	0,22	0,15	0,33	-0,03	0,03	0,28	0,20	-0,08	1,00	0,04	-0,33	0,57	0,58	-0,04
Pb	-0,33	0,44	0,04	-0,01	-0,32	0,21	-0,27	0,21	0,15	-0,14	0,18	-0,18	0,45	0,00	0,44	0,14	-0,13	0,00	0,12	0,39	0,24	0,04	1,00	0,17	-0,14	-0,15	-0,53
Zr	-0,21	0,42	-0,52	0,59	-0,06	0,45	-0,40	0,46	0,75	0,02	0,86	0,09	-0,08	-0,29	-0,04	-0,07	-0,18	-0,01	-0,29	-0,15	0,58	-0,33	0,17	1,00	-0,38	-0,60	-0,32
Hg	-0,19	-0,37	0,58	-0,11	-0,08	0,05	0,19	-0,23	-0,04	0,14	-0,12	-0,08	0,09	0,15	0,12	0,30	0,07	-0,03	0,14	0,12	-0,06	0,57	-0,14	-0,38	1,00	0,58	0,25
S Total	-0,22	-0,46	0,78	-0,22	-0,05	-0,19	0,08	-0,26	-0,27	0,02	-0,28	0,06	0,03	0,10	0,06	0,14	0,31	0,11	0,08	0,16	-0,17	0,58	-0,15	-0,60	0,58	1,00	0,25
Cenizas	0,45	-0,29	-0,14	-0,24	0,10	-0,28	0,57	-0,17	-0,24	-0,04	-0,36	-0,01	0,09	0,05	-0,33	-0,14	0,11	-0,07	-0,26	-0,22	-0,15	-0,04	-0,53	-0,32	0,25	0,25	1,00

Fuente: Datos del estudio.

Tabla 11.

Coeficientes de Pearson para los elementos mayores, menores, azufre total y cenizas (zona carbonífera de Boyacá).

Elemento	Suesca - Albarracín	Tunja - Paipa - Duitama	Sogamoso - Jericó	Chita - La Uvita - El Espino	WAC
Sr	1,26	1,45	2,90	2,93	740
Mn	0,10	0,57	0,22	0,12	430
V	1,37	1,32	1,42	2,07	170
Cr	1,19	0,98	1,15	1,03	120
Co	0,94	0,94	0,84	0,64	37
Ni	2,63	1,52	1,34	0,50	100
Cu	2,09	1,06	2,66	1,28	110
Zn	0,73	0,81	0,68	0,29	170
Be	1,50	1,65	1,44	0,60	12
Cd	0,25	0,21	0,19	0,15	1,2
Ba	1,15	1,14	1,34	1,91	980
As	0,56	0,65	0,45	0,26	46
Pb	1,08	0,99	1,08	1,20	55
Zr	1,85	1,78	2,63	2,39	230
Hg (mg/kg)	2,74	1,34	1,00	1,85	100

Fuente: Datos del estudio.

Con la finalidad de realizar una comparación de los datos obtenidos en este estudio con datos de proyectos institucionales realizados para caracterizar los carbones de diferentes zonas del país, se presentan resultados de los coeficientes de correlación de Pearson y los resultados de los coeficientes de concentración para la zona carbonífera de Boyacá en 83 muestras tomadas en minas subterráneas y niveles carboníferos de la formación Guaduas para las áreas: 802 Suesca – Albarracín, 803 Tunja – Paipa – Duitama, 804 Sogamoso – Jericó y 808 Chita – La Uvita – El Espino.

En la Tabla 10, se presentan los resultados de coeficientes de correlación de Pearson para las muestras de la zona carbonífera de Boyacá. Al comparar con los datos de Norte de Santander se evidencian algunas correlaciones similares, por ejemplo, para el caso de la correlación hierro - azufre total para Boyacá se obtienen coeficientes de 0,78 y para Norte de Santander de 0,79 debido a la presencia de piritita en las dos zonas carboníferas. También se observa para las dos zonas el carácter inorgánico del potasio, presentando coeficientes de correlación de Pearson superiores a 0,5 con respecto a las cenizas. En el caso de Norte de Santander se obtuvo un valor de 0,59 y para Boyaca un valor de 0,57.

En cuanto a diferencias significativas entre una zona y otra, se puede inferir analizando los coeficientes de correlación que en Boyacá la afinidad del mercurio con el hierro y el azufre es menor que en Norte de Santander, eso también se corrobora analizando los coeficientes de correlación entre mercurio y cenizas, dichos coeficientes tienen mayores valores en Norte de Santander indicando que el mercurio se encuentra asociado a la materia mineral, en este caso al azufre y al hierro, mientras que los valores en Boyacá son menores, indicando una afinidad mayor a la matriz orgánica y por ende una disminución de las correlaciones con el hierro y el azufre.

Los datos de los coeficientes de concentración (CC) de mercurio para Norte de Santander presentan valores que oscilan entre 0,88 y 1,64 que se encuentran dentro de la media mundial, mientras que para Boyacá, en la Tabla 11 se

presentan valores entre 1 y 2,74 que representan un ligero enriquecimiento, indicando que los carbones de Norte de Santander tienen una menor cantidad de este elemento potencialmente peligroso.

También es posible ver diferencias en las concentraciones de elementos como vanadio y estroncio. En la zona de Norte de Santander se encuentran contenidos altos de vanadio con factores de concentración que varían entre 3,02 y 11,8 mientras que en Boyacá sus valores se encuentran entre 1,32 y 2,07.

El caso del estroncio resulta interesante, en el departamento de Boyacá se encuentran contenidos superiores a los encontrados en las muestras de Norte de Santander, esto se evidencia con los coeficientes de concentración que varían entre 1,26 y 2,93. Además en la Tabla 10 donde se encuentran los coeficientes de correlación de Pearson para Boyacá, se observa un coeficiente de correlación de 0,88 entre el estroncio y el fósforo, esto debido probablemente a la similitud en los radios iónicos del calcio y el estroncio, indicando que los iones de estroncio sustituyen al calcio en las redes iónicas que forman el fosfato de calcio. También se puede relacionar con el aporte de material durante la deposición de la cuenca y su afinidad con minerales asociados.

7. Conclusiones

Evaluando los valores de los coeficientes de correlación de Pearson entre las concentraciones elementales se evidencia una fuerte correlación entre el hierro y el arsénico con un coeficiente de 0,8, de igual manera hay una correlación importante entre arsénico y azufre con un valor de 0,8.

Se aprecia una fuerte correlación azufre-calcio y azufre-magnesio con valores de 0,9 y 0,72 respectivamente. Así mismo destacan las correlaciones hierro-mercurio y mercurio-azufre total con valores de coeficiente de correlación de Pearson de 0,72 y 0,9. Para el azufre piritítico y

el mercurio se obtuvo un coeficiente de correlación de 0,9, este coeficiente abarca la totalidad de las muestras tomadas (87) indicando que esta afinidad se mantiene en las formaciones geológicas Cuervos y Carbonera para las 5 áreas del estudio. La evaluación de los coeficientes con respecto a el contenido de cenizas para ver la afinidad orgánica o inorgánica de los elementos muestra que solamente mercurio, azufre total y potasio presentan una afinidad inorgánica con valores de coeficiente de correlación superiores a 0,5, para el resto de elementos los valores se encuentran entre -0,5 y 0,5 indicando una afinidad tanto a la parte orgánica como a la inorgánica.

Los mantos de carbón teniendo en cuenta su clasificación según los valores de reflectancia media de la vitrinita corresponden a carbones de rango bajo y medio que corresponden a subbituminosos y bituminosos lo que indica que no son carbones con alta madurez térmica.

Declaración de conflictos de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés asociados al presente trabajo.

Reconocimientos

Agradecimientos al Servicio Geológico Colombiano por el aporte para el proyecto de investigación 1001408 - Investigación en carbones y materiales energéticos, A la comunidad de mineros de Norte de Santander quienes permitieron recolectar las muestras utilizadas en este proyecto, a Termotasajero por realizar los contactos con los mineros de las zonas de estudio, al personal técnico y profesional del laboratorio de caracterización, procesamiento e investigación de carbones y materiales energéticos por su trabajo en la caracterización y análisis de la información recopilada.

Referencias

Colombian Petroleum Company (Colpet), (1967a). Geología del cuadrángulo F-13 Tibú. Bogotá: Servicio Geológico Nacional.

Colombian Petroleum Company (Colpet), (1967b). Geología del cuadrángulo G-13 Cúcuta. Bogotá: Servicio Geológico Nacional.

Dai, S., Graham, I.T., and Ward, C.R., (2016, April). A review of anomalous rare earth elements and yttrium in coal. In *International Journal of Coal Geology*, volume (159), pp. 82–95. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2016.04.005>

Gürdal, G., (2007). Geochemistry of trace elements in Çan coal (Miocene), Çanakkale, Turkey. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2007.09.004>

Ketris, M.P., and Yudovich, Y.E., (2009). Estimations of Clarkes for Carbonaceous biolithes: World averages for trace element contents in black shales and coals, *International Journal of Coal Geology*, 78(2), pp. 135–148. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.COAL.2009.01.002>

Little, A.D., (2010). Análisis de tecnología y estrategia de promoción para desarrollos de Gas Metano Asociado al Carbón (CBM) en Colombia. Fase I: Caracterización de Cuencas de CBM en Colombia.

Notestein, F., Hubman, C., and Bowler, J., (1944). Geology of the Barco Concession, Republic of Colombia, South America. *Bulletin of the Geological Society of America*, volumen 55, issue 10, pp. 1165-1216.

Oviedo-Reyes, J., (2015). Geomorfología tectónica del Sistema de Fallas del Zulia en el flanco occidental del Sinclinal del Zulia, Norte de Santander – Colombia. Tesis de grado, Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá Facultad de Ciencias Departamento de Geociencias.

Rincón Mesa, M.A., y Monroy-V., W.O. [Eds.]. (2012). El carbón colombiano. Recursos, reservas y calidad. Libros del Servicio Geológico Colombiano (INGEOMINAS).

Shi, Y., Jiang, K.-X., Zhang, T.-A., and Zhu, X.-F., (2022). Simultaneous and clean separation of titanium, iron, and alumina from coal fly ash in one spot: electrolysis-hydrolysis method. *Separation and Purification Technology*, 294, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121247>

Sutton, F.A., (1946). Geology of Maracaibo basin, Venezuela. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 30(10), pp. 1621-1739.

Van der Hammen, T., (1958). Estratigrafía del Terciario y Maastrichtiano continentales y tectogénesis de los Andes colombianos, *Boletín Geológico*, 6(1-3), pp. 60–116. DOI: <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol6.1-3.1958.309>

B. Rodríguez, es Ingeniero Químico, MSc. Es miembro del laboratorio de caracterización, procesamiento e investigación de carbones y materiales energéticos del Servicio Geológico Colombiano. Sus intereses incluyen el estudio del impacto ambiental producido por el uso del carbón y la minería del oro, el desarrollo de nuevos materiales obtenidos de carbón mineral, y la caracterización fisicoquímica y elemental de materiales geológicos.

ORCID: 0000-0002-6617-3313

A. Castro, es Ingeniera Geóloga, MSc. Investigadora enfocada en la realización de análisis estratigráficos y sedimentológicos para recursos minero-energéticos. Con experiencia en muestreo, ensayos de geoquímica y petrografía orgánica, así como en la ejecución de proyectos con enfoque hidrogeológico e hidrogeoquímico y el análisis e interpretación de resultados orientados al desarrollo sostenible.

ORCID: 0000-0002-4195-8210