

# Physicochemical, petrographic and rheologic evaluation of seams 2 and 3 coals from Mina Norte, Guajira municipality, Zulia state, Venezuela

**Marcos Escobar<sup>1, 2\*</sup>, Jesús Rubio<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Postgrado de Geología Petrolera, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia. Maracaibo 4002A, Venezuela. \*escomar24@gmail.com.

<sup>2</sup>CARBOZULIA, Av. 2, No. 55-185, Casa Mene Grande. Maracaibo 4002, Venezuela.

<sup>3</sup>Carbones de la Guajira S.A. Av. 9B entre calles 77 y 78, Edif. Banco Industrial, Piso 10. Maracaibo, Venezuela.

## Abstract

The energetic standpoint characterization of seams 2A, 2B, 3A and 3B coals from the Marcelina Formation (Palaeocene) in Mina Norte mine, states that these meet the highest standards in quality ratings using Venezuelan coal companies. Have a high calorific value, low ash and sulphur tenors. His ashes are acid type, which do not cause problems of corrosion or excoriating, and its organic matter has been able to generate liquid hydrocarbons (bitumen). In terms of their potential use in the siderurgical industry, these coals are comparatively low in oxygen, phosphorous and chlorine. This, coupled with its excellent quality, establishing its use as PCI coal (pulverized coal injection in steel manufacturing). Petrography analysis can project its excellent quality as a constituent of steel coking blends; the results of the rheological characterization, attest to its excellent plastic character against the temperature increase in non-oxidizing medias, proposing, as it reinforced its qualities with the addition of coke or anthracite fines, or mixed with low-volatile bituminous coal, coke obtained with excellent mechanical strength, suitable for steel or metallurgical purposes.

**Keywords:** Mineral coal, Marcelina Formation, proximate analysis, van Krevelen diagram, organic petrography, plastometry, dilatometry.

## Evaluación fisicoquímica, petrográfica y reológica de carbones de los mantos 2 y 3 de Mina Norte, municipio Guajira, estado Zulia, Venezuela

### Resumen

La caracterización del punto de vista energético, de carbones de los mantos 2A, 2B, 3A y 3B de la Formación Marcelina (Paleoceno) en Mina Norte, establece que estos alcanzan los más altos estándares en las clasificaciones de calidad que utilizan las empresas carboneras venezolanas. Poseen alto poder calórico, con bajos tenores de cenizas y azufre. Sus cenizas son de tipo ácido, las cuales no generan problemas de corrosión o escoriado, y su materia orgánica ha sido capaz de generar hidrocarburos líquidos (bitumen). En función de su posible uso siderúrgico, son carbones comparativamente bajos en oxígeno, fósforo y cloro. Esto, aunado con su excelente nivel de calidad, establece su uso como carbones tipo PCI (inyección de carbón pulverizado en acerías). Los análisis petrográficos permiten proyectar su excelente calidad como constituyente de mezclas para coque siderúrgico; los resultados de su caracterización reológica, dan fe del excelente carácter plástico de dichos carbones frente al incremento de la temperatura en medios

no oxidantes, proponiéndose, al ser reforzadas sus cualidades con la adición de finos de coque o de antracita, o mezclados con carbones bituminosos de bajo volátil, obtener coques con excelente resistencia mecánica, aptos para fines siderúrgicos o metalúrgicos.

**Palabras clave:** Carbón mineral, Formación Marcelina, análisis próximos, diagrama de van Krevelen, petrografía orgánica, plastometría, dilatometría.

### Introducción

La Cuenca Carbonífera del Guasare se ubica entre los Municipios Guajira, Mara y Jesús Enrique Losada, al noroeste de la ciudad de Maracaibo. Comprende las minas activas Paso Diablo y Mina Norte, ubicadas en las márgenes del río Guasare. La Formación Marcelina del Paleoceno [1] está constituida por intercalaciones de areniscas, lutitas arenosas y mantos de carbón de tipo bituminoso de alto volátil, en capas de 2 hasta 10 m de espesor (Figura 1).

Los principales mantos de carbón objeto de minería a cielo abierto en esta cuenca [2] han sido los mantos de los Grupos 4 y 5, y en menor grado el manto 6 [3, 4]. Los mantos de los Grupos 2 y 3 han sido objeto de muy poca atención, ya que debido a su profundidad, no se ha hecho rentable su extracción por este tipo de minería.

El presente informe tiene como objetivo la presentación y discusión de los resultados obtenidos de la caracterización fisicoquímica, petrográfica y reológica de muestras de carbón de los mantos 2A, 2B, 3A y 3B de la Formación Marcelina (Paleoceno) en el área correspondiente a Mina Norte, Municipio Guajira, Estado Zulia.

### Parte experimental

El muestreo fue realizado sobre núcleos de perforación de carbón mineral, recolectados (norma ASTM D 5192-99) [5] de siete pozos (9C a 15C) perforados por la empresa Carbones de la Guajira S.A. en sus áreas de concesión. Se prepararon cuatro muestras compuestas (D 2013-04), representativas sucesivamente de los mantos 2A, 2B, 3A y 3B, destinadas a ser preparadas a las di-

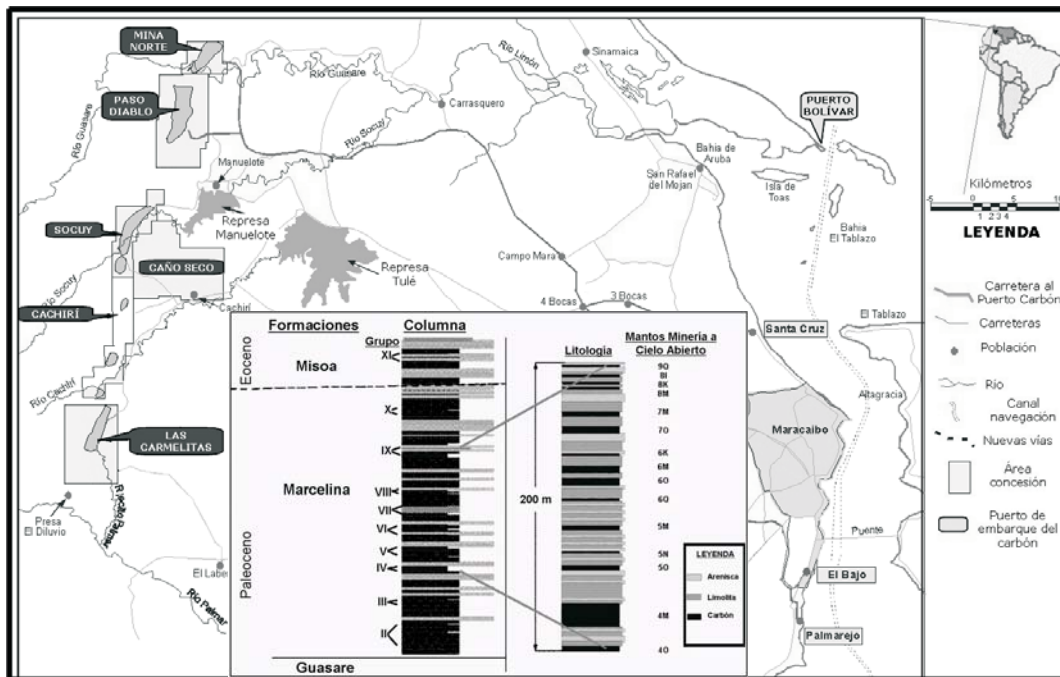


Figura 1. Minas y prospectos de carbón en el norte del Estado Zulia y principales grupos de mantos de carbón en la Formación Marcelina, con énfasis en aquellos mantos explotados por minería a cielo abierto.

ferentes granulometrías requeridas en los ensayos de caracterización.

Se realizaron las siguientes determinaciones: humedad (ASTM D-3173-03), materia volátil (D-3175-02), cenizas (D-3174-04), carbono fijo (por diferencia al 100%, de los tres anteriores), poder calórico (D-5865-04), rango del carbón (ASTM D-388-05), materia mineral (fórmula de Parr modificada [6] para incluir azufre pirítico y cloro), análisis últimos (D 3176-89), azufre y sus formas (D 2492-02), cloro elemental (D 6721-01), gravedad específica (D 167-93), dureza según la escala Hardgrove (HGI; D 409-02), análisis químico de las cenizas (D-3682-01), fusibilidad de cenizas (D 1857-04), reflectancia de la vitrinita (D-2798-05), tipos de macerales (D 2799-05), índice de hinchamiento libre (FSI, D 720-04), Plastometría Gieseler (D 2639-04) y Dilatometría Audibert-Arnú, (norma ISO 349) [7].

## Discusión de resultados

### Análisis próximos

Los carbones analizados (Tabla 1) han sido clasificados, según ASTM [5] como Bituminosos de alto volátil tipo A. Los resultados permiten verificar que estas muestras poseen valores de materia volátil (promedio 37,30% en masa), cenizas (1,80%) y poder calórico (14.960 BTU/lb, 8.310

kcal/kg), todos estos en base seca, que les confieren excelentes propiedades para su uso en la industria carboeléctrica, así como para fines térmicos en general [8, 9], ajustados a la máxima calificación de calidad que emplea la industria carbonífera nacional [10].

### Análisis elementales

Las concentraciones de los elementos carbono (85,00-85,53%) y nitrógeno (1,44-1,59%, Tabla 2), están en el intervalo de los valores promedios reportados para carbones bituminosos de alto volátil [11, 12]. El hidrógeno (5,65-6,13%) está un 15% más alto (5,1%), y los valores de oxígeno (6,40-7,11%), difieren hasta un 60% por debajo de estos promedios (10,1%). En términos de su uso tecnológico, carbones con tenores bajos de oxígeno presentan mejores propiedades coquizantes, pero son comparativamente menos reactivos frente a procesos de gasificación o licuación [13].

El significado de los análisis últimos en cuanto a la naturaleza de la materia orgánica que constituye estos carbones, puede ser revisado a través del uso del Diagrama de van Krevelen [9], el cual consiste en una gráfica de las relaciones atómicas H/C versus O/C (Figura 2).

Esta figura muestra la curva evolutiva de los tres tipos principales de kerógeno en la natu-

Tabla 1  
Análisis próximos y poder calórico para carbones de los mantos 2 y 3 de Mina Norte

Muestra Compuesta MN-9C hasta 15C	Análisis Próximos							
	Humedad % $\pm 0,01$	Materia Volátil % $\pm 0,01$	Materia Volátil % $\pm 0,01$	Carbono Fijo % $\pm 0,01$	Cenizas % $\pm 0,01$	Materia Mineral % (Parr modificado)	Poder Calórico (Btu/lb) $\pm 50$	Poder Calórico Bruto (Btu/lb) $\pm 50$
	-	b.s.	h.l.m.m.	b.s.	b.s.	h.	b.s.	h.l.m.m.
2A	7,17	36,72	34,85	61,15	2,13	2,21	14.970	14.460
2B	2,64	37,93	37,63	60,33	1,74	1,89	14.960	14.840
3A	4,19	36,35	35,55	61,78	1,87	2,04	14.850	14.520
3B	2,43	38,19	37,87	60,34	1,47	1,62	15.050	14.920

% = porcentaje en masa. b.s. = base seca (ASTM D 3180-89). h. = base húmeda (como se recibe). h.l.m.m. = base húmeda libre de materia mineral (para determinación del rango, según ASTM D-388).

Tabla 2  
Análisis últimos, lb SO<sub>2</sub>/MMBTU, formas de azufre, cloro, gravedad específica y HGI para carbones de los mantos 2 y 3 de Mina Norte

Muestra Compuesta MN-9C hasta 15C	Análisis Últimos					Lb SO <sub>2</sub> / MMBTU	Formas de Azufre				Gravedad Esp. g/cc ±0,05
	Carbono % ±0,01	Hidrógeno % ±0,01	Nitrógeno % ±0,01	Oxígeno % ±0,01	Azufre % ±0,01		S orgánico% ±0,01	S pirítico % ±0,01	S sulfato % ±0,01	Cloro % ±0,01	
	bslc	bslc	bslc	bslc	bslc	-	bslc	bslc	bslc	bslc	-
2A	85,53	5,78	1,56	6,56	0,56	0,72	0,47	0,08	0,01	0,03	1,29
2B	85,04	5,65	1,56	7,11	0,64	0,83	0,59	0,04	0,01	0,04	1,27
3A	85,22	6,13	1,44	6,40	0,81	1,05	0,65	0,14	0,01	0,04	1,27
3B	85,00	5,84	1,59	6,87	0,70	0,90	0,60	0,09	0,01	0,04	1,27

% = porcentaje en masa. bslc = base seca libre de cenizas (ASTM D 3180-89). lb SO<sub>2</sub>/MMBTU = Libras de SO<sub>2</sub>/Millones de BTU.

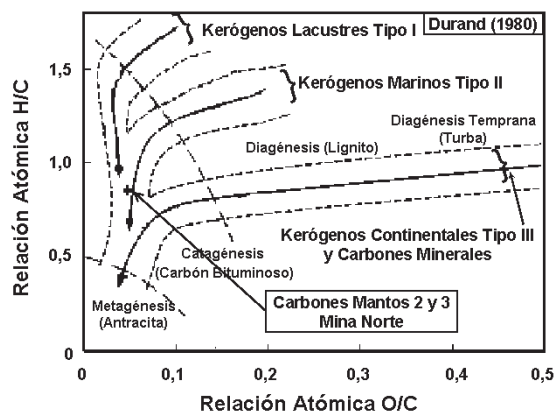


Figura 2. Ubicación de los carbones de los mantos 2 y 3 de Mina Norte en el diagrama de van Krevelen. Las flechas indican la dirección de evolución de cada tipo de kerógeno, con el incremento en la madurez térmica. Adaptado de Durand [14].

raleza [14, 15]. Los carbones objeto de estudio se ubican en el campo de los kerógenos tipo II, capaces de generar petróleo y además están colocados en el área de catagénesis [15], lo que implica que efectivamente han generado hidrocarburos. Lo interesante de este resultado, sería determinar si estos carbones de los mantos 2 y 3 de Mina Norte

bajo consideración, han sido capaces de expulsar petróleo. En las perforaciones que se realizan de modo rutinario como parte del proceso de evaluación de reservas en estas minas de carbón, siempre se reporta la presencia de testigos de areniscas con impregnaciones de crudo [16].

Una propiedad importante en cuanto al uso de los carbones nacionales para fines térmicos y de fabricación de coque es el tenor de azufre. Las concentraciones de azufre, entre 0,56 y 0,81% (base seca libre de cenizas) y los valores de libras de SO<sub>2</sub> por millones de BTU inferiores a 1,20 (entre 0,72 y 1,05) permiten clasificar estos carbones como excelentes para fines térmicos o metalúrgicos [17]. Entre los tipos de azufre (Tabla 2), el orgánico es el más importante en los carbones bajo estudio (entre 81 y 92% del total de este elemento). Los muy bajos tenores de azufre sulfato, garantizan que los carbones no han sufrido meteorización. Porcentajes de cloro por debajo de 0,2% (Tabla 2), permiten su clasificación como de bajo potencial corrosivo [13]. Los valores de gravedad específica (1,27 g/cc), inferiores a los promedios reportados [13] para carbones bituminosos (1,35 g/cc), son un reflejo de su comparativamente bajo tenor de oxígeno, y alto de hidrógeno.

### Caracterización de cenizas

El análisis químico de las cenizas del carbón es de suma importancia, en términos de su utilización en calderas [18]. La Tabla 3 permite reconocer que estas cenizas están dominadas por los óxidos de silicio (promedio 53,07%) y aluminio (21,60%), lo cual implica que los minerales más abundantes en estas muestras, son los minerales de arcilla (caolinita, ilita) y el cuarzo [19, 20]. El análisis normativo (Tabla 4), usando la metodología de Pollack [21], permite corroborar esta última conclusión.

El fósforo es generalmente considerado un elemento indeseable en la fabricación del acero, ya que lo hace frágil. La muestra compuesta de carbones del manto 2A, con la mayor concentración de cenizas (2,30% base como se recibe) y de  $P_2O_5$  (0,70%) del grupo analizado, tendrá una concentración de fósforo en carbón total de 0,003%, suponiendo que todo el fósforo originalmente presente en el carbón se transformó a  $P_2O_5$ . Esto implicaría una concentración de fósfo-

ro en el coque obtenido a partir de este carbón, de 0,004%, y de 0,001% de este elemento en el acero obtenido, como aporte exclusivamente del coque empleado en su fabricación, según estimaciones derivadas de datos en Ryan y Grieve [22]. Este resultado está bastante por debajo del valor de 0,03% de P, como máxima concentración aceptable para los tipos comunes de aceros [11] y esto, aunado con su excelente calidad como carbón térmico, posibilita la recomendación de estas muestras como carbones PCI (para su comercialización en la industria siderúrgica como carbones de inyección directa en hornos de reducción de mineral de hierro).

El análisis químico de las cenizas del carbón es un ensayo importante del punto de vista de su posible utilización para fines térmicos. La predominancia de los óxidos de silicio y aluminio en estas muestras, indica que son cenizas ácidas, con bajos índices de *fouling* (corrosión) y *slagging* (formación de escorias), y concentraciones reducidas de álcalis ( $Na_2O$ ,  $K_2O$ ; Tabla 5

Tabla 3  
Análisis químico de las cenizas, carbones de los mantos 2 y 3 de Mina Norte

Muestra Compuesta MN-9C a 15C	Análisis Químico de Cenizas										
	SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	TiO <sub>2</sub> %	CaO %	MgO %	Na <sub>2</sub> O %	K <sub>2</sub> O %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	SO <sub>3</sub> %	n.d. %
2A	56,99	18,40	11,75	0,90	2,62	1,94	0,70	0,63	0,70	2,13	3,24
2B	52,91	29,56	6,14	1,63	3,34	1,57	0,72	0,69	0,06	3,34	0,24
3A	57,02	15,41	10,37	0,64	5,24	3,42	0,42	0,59	0,07	6,62	0,20
3B	45,36	23,02	9,28	1,06	6,91	4,42	0,68	0,56	0,05	8,41	0,23

% n.d. = No determinados (diferencia al 100% de la suma de los demás óxidos). Los porcentajes son en masa.

Tabla 4  
Análisis normativo [21] de cenizas de carbones de los mantos 2 y 3 de Mina Norte

Muestra Compuesta MN-9C a 15C	Ilita (%)	Caolinita (%)	Cuarzo (%)	Calcita (%)	Pirita (%)
2A	3,6	44,2	49,8	4,7	0,6
2B	4,0	72,2	42,2	5,9	0,3
3A	3,4	36,8	50,9	9,3	1,0
3B	3,2	56,1	37,0	12,3	0,7

[11]). Un valor promedio de 0,24 para la relación base/ácido, confirma que estas cenizas son de carácter ácido; cocientes por debajo de 0,6 demuestran una muy baja propensión a formar escorias o producir corrosión. Una conclusión similar se alcanza para valores de alcalinidad inferiores a 0,17 [23]. Todos estos factores favorecen la utilización de los carbones de los mantos 2 y 3 de Mina Norte objeto de estudio, como fuente de energía.

Una de las aplicaciones tecnológicas más comunes del carbón mineral es como combustible en la industria del cemento. Temperaturas de Ablandamiento relativamente altas (Tabla 6), permiten concluir que estos carbones, al ser procesados, tenderán a formar cenizas de grano fino, más fáciles de remover de las calderas, economizadores, etc., que cenizas que se transformen en

masas fundidas, las cuales propenderán a formar escorias [13]. Esta baja tendencia a la escoriación es ratificada por los valores de  $T_{250}$  (temperatura a la cual la escoria fundida alcanza una viscosidad de 250 poises, [24]) superiores a 2.325°F, como los obtenidos para las muestras compuestas objeto de estudio.

### Petrografía orgánica

Los análisis petrográficos permiten conocer el grado de evolución del carbón mediante la reflectancia de la vitrinita (Tabla 7). En términos de una posible generación de hidrocarburos por parte de estos carbones, valores superiores a 0,8, exceden el límite inferior propuesto en la literatura, para kerógenos tipo II o III [15], lo cual ratifica que ambos grupos de mantos han alcanzado la etapa de catagénesis, o ventana de generación de

Tabla 5  
Índices de *fouling* y *slagging*, alcalinidad y relaciones base/ácido de las cenizas de los carbones de los mantos 2 y 3 de Mina Norte

Muestra Compuesta MN-9C hasta 15C	Relación base/ácido	Índice <i>Fouling</i>	Índice <i>Slagging</i>	Alcalinidad
2A	0,23	0,16	0,13	0,02
2B	0,15	0,11	0,09	0,02
3A	0,27	0,12	0,22	0,02
3B	0,31	0,21	0,22	0,02

Tabla 6  
Temperaturas de fusibilidad de las cenizas, en atmósfera reductora y oxidante, carbones de los mantos 2 y 3 de Mina Norte

Muestra Compuesta MN-9C hasta 15C	Temperatura (T) de Fusibilidad de Cenizas (°F)								Temperatura $T_{250}$ (°F)
	Atmósfera Reductora				Atmósfera Oxidante				
	T Deformación Inicial	T Ablandamiento	T Hemisférica	T Fluidización	T Deformación Inicial	T Ablandamiento	T Hemisférica	T Fluidización	
2A	2.200	2.300	2.380	2.480	2.460	2.520	2.540	2.580	2.688
2B	>2.700	>2.700	>2.700	>2.700	>2.700	>2.700	>2.700	>2.700	2.863
3A	2.240	2.300	2.420	2.540	2.320	2.400	2.460	2.520	2.602
3B	2.300	2.380	2.420	2.500	2.360	2.440	2.500	2.560	2.523

Tabla 7  
Distribución de macerales en los carbones de los mantos 2 y 3 de Mina Norte (valores en porcentaje en volumen), organizados según los modelos de Schapiro y Gray [25] y Moses [26]. Se incluye los valores de %Rm, CBI e Índice de Resistencia

Muestra Com- puesta MN-9C hasta 15C	Análisis Petrográfico (% volumen)															%Rm Vitrinita	CBI
	Tipos de Vitrinita					Macerales Reactivos					Macerales Inertes						
	Vitrinoide tipo 6	Vitrinoide tipo 7	Vitrinoide tipo 8	Vitrinoide tipo 9	Vitrinoide tipo 10	Vitrinita	Liptinita	Resinita	Semifusinita	Total	Semifusinita	Micrinita	Fusinita	Materia Mineral	Total		
2A	-	7,6	41,6	19,4	0,7	69,3	2,8	2,4	2,2	76,7	4,3	11,9	5,8	1,3	23,3	0,87	0,83
2B	0,7	7,5	39,7	20,5	-	68,4	2,9	1,8	2,7	75,8	5,5	13,0	4,6	1,1	24,2	0,87	0,88
3A	0,7	17,6	44,3	7,7	-	70,3	2,5	3,2	2,7	78,7	5,4	10,0	4,7	1,2	21,3	0,83	0,78
3B	-	14,3	50,2	7,2	-	71,7	3,2	2,9	1,9	79,7	3,8	11,8	3,7	1,0	20,3	0,84	0,72

%Rm = Reflectancia media de la vitrinita, en porcentaje. CBI = Índice de Balance de Composición.

petróleo líquido, coincidiendo con los resultados del diagrama de van Krevelen (Figura 2).

En cuanto a la distribución de los principales grupos macerales (Tabla 7), los carbones de los mantos 2 y 3 de Mina Norte presentan concentraciones de vitrinitas (70% en volumen), liptinitas (5%) e inertinitas (25%), similares a las reportadas para carbones de mantos estratigráficamente superiores dentro de la Formación Marcelina (Paleoceno), en la Cuenca Carbonífera del Guasare [27-32]. La razón de que hasta los momentos haya muy poca información de los mantos 2 y 3, es porque hay muy pocos afloramientos en la Cuenca Carbonífera del Guasare que permitan su apropiada recolección, y porque los mismos no han sido objeto de explotación por parte de las compañías que operan en esta cuenca [3, 4].

Los bajos valores de oxígeno, y relativamente altos de hidrógeno reportados, no se compaginan con las bajas concentraciones de liptinitas medidas, razón por la cual se propone la presencia en estos carbones, de vitrinitas ricas en hidrógeno (prehidratadas) [33, 34], lo cual ha sido reconocido recientemente en carbones del manto 4 de la Formación Marcelina en la mina Paso Diablo [35]. Un caso similar, en carbones bitumino-

sos de alto volátil tipo A del Mar del Norte (Dinamarca), con bajas concentraciones de liptinitas, ha sido reportado por Petersen y Rosemberg [36]. La presencia de hidrocarburos adsorbidos en forma de bitumen en la matriz orgánica de estos carbones, junto con la alta posibilidad que tengan vitrinitas perhidratadas, justifica los comparativamente altos valores del poder calórico de estos carbones, respecto a otros en Venezuela [28, 29].

### Habilidad coquizante

La Tabla 7 incluye los resultados del análisis petrográfico realizado sobre las muestras bajo estudio, con los datos organizados con la finalidad de utilizarlos para aplicar los modelos de Schapiro y Gray [25] y Moses [26], los cuales permiten predecir la resistencia mecánica del coque producto del procesamiento de estos carbones. En tal sentido, se deben reportar las proporciones de cada vitrinita alfa (denominada vitrinoide o V-Tipo) según su nivel de reflectancia, en intervalos de 0,1%. La base de estos modelos estriba en la analogía entre la producción de coque y la fabricación de concreto. Se requiere una proporción óptima de cemento (macerales Reactivos) en relación con la grava y arena (macerales Inertes) para obtener un concreto de alta resistencia.

El valor óptimo de CBI (Índice de Balance de Composición [25, 37], para carbones coquizables es de 1,00, implicando un balance perfecto entre macerales reactivos e inertes [37]. Los valores de CBI calculados para las muestras de los mantos 2 y 3 de Mina Norte bajo estudio (Tabla 7), permiten concluir la presencia en los mismos de un déficit de materiales inertes para lograr un coque con características mecánicas óptimas, a partir del procesamiento de estos carbones. Este resultado implica que, de plantearse la posibilidad de coquizar dichas muestras directamente, es decir, sin formar parte de mezclas de carbones, seguramente habrá que considerar el pretratamiento de la carga de carbones, en términos del precalentamiento de la misma, briquetización parcial con o sin adición de alquitrán o brea, y adición de reactivos inertes antifisurantes, como por ejemplo finos de antracita o finos de coque de carbón o petróleo, para mejorar la resistencia del coque a obtener [38].

Para carbones coquizables, el valor de la reflectancia de la vitrinita puede ser útil para estimar el valor del parámetro CSR (resistencia del coque bajo reacción con CO<sub>2</sub>) [39]. Valores de CSR entre 35 y 52, determinados a partir del uso de la gráfica de CSR vs. %Rm [40], no son apropiados para un coque que va a ser empleado para fines siderúrgicos. Los valores de CSR empleados comúnmente para tales fines, son: a.- >60, siderúrgicas europeas [41]; b.- 74, siderúrgicas australianas [42]; c.- 61, siderúrgicas norteamericanas [43]; d.- 50-65, siderúrgicas japonesas [44]. De todos modos, no se puede descartar a priori la

posible utilización de estos carbones para fines siderúrgicos, como será discutido al evaluar sus propiedades reológicas.

La carbonización es el proceso bajo atmósfera inerte a través del cual, la temperatura hace que un carbón pase por un estado plástico y se transforme en coque. El comportamiento presentado por el carbón durante la citada carbonización, es referido generalmente en términos de las propiedades reológicas del carbón, también llamadas propiedades plásticas, coquizantes, o coquizabilidad. Estas propiedades, incluidas en las Tablas 8 y 9, son evaluadas sobre la base del resultado de los ensayos de FSI, Plastometría y Dilatometría.

Valores de F.S.I. de 8,0-8,5, obtenidos para los carbones objeto de estudio, se corresponden con carbones altamente coquizantes [13]. No obstante, según Ward [45], el valor ideal de FSI para carbones coquizantes debería ser entre 4 y 6. Este intervalo se corresponde con carbones que se expanden lo suficiente frente al proceso de coquización, para generar un coque poroso, pero cuya expansión no es tan elevada como para rendir coques con un exceso de porosidad, lo cual se traducirá en una resistencia mecánica baja. Tal conclusión ratifica la necesidad de mezclar estos carbones con materiales carbonosos inertes, como finos de coque o de antracita, para lograr un coque de resistencia mecánica apta para fines siderúrgicos.

La gráfica de Índice de Resistencia vs. CBI, específica para carbones bituminosos [46], incluyendo sobre ella los valores obtenidos para los

Tabla 8  
Resultados de las determinaciones de índice de hinchamiento libre (F.S.I.) y plastometría Gieseler, carbones de los mantos 2 y 3 de Mina Norte

Muestra Compuesta MN-9C hasta 15C	F.S.I.	Índice de Resistencia	Plastometría Gieseler				
			Máxima Fluidez (ddpm)	Temp. Ablandamiento (°C)	Temp. Max. Fluidez (°C)	Temp. Solidificación (°C)	Intervalo Plástico de Temp. (°C)
2A	8,5	3,25	1.485	411	450	481	70
2B	8,0	3,29	4.383	408	445	482	74
3A	8,0	3,12	630	405	441	475	70
3B	8,0	3,06	1.694	405	445	477	72

ddpm = divisiones del dial por minuto.



Tabla 9  
Resultados de las determinaciones de Dilatometría Audibert-Arnú, y Dureza HGI, carbones de los mantos 2 y 3 de Mina Norte bajo estudio.

Muestra	Dilatometría Audibert-Arnú							HGI
	% Máxima Contracción	% Máxima Dilatación	Intervalo Plástico %	Temp. Inicial Ablandamiento (°C)	Temp. Inicial Dilatación (°C)	Temp. Solidificación (°C)	Intervalo Plástico de Temp. °C	
Compuesta MN-9C hasta 15C								
2A	-24	67	91	372	429	456	84	56
2B	-28	88	116	369	426	447	78	53
3A	-28	48	76	369	429	450	91	55
3B	-30	67	97	366	423	450	84	52

% = HGI = Índice de dureza Hardgrove.

carbones bajo consideración (Tabla 8), permite determinar un factor de estabilidad cercano a 40, para el coque a obtener. Este factor de estabilidad, también denominado estabilidad ASTM [37], mide la resistencia a la ruptura, tanto durante su manejo, como en el horno de reducción. Debería alcanzar valores mínimos de 57 para coques de buena calidad para fines siderúrgicos [47]; la norma para América del Norte, exige valores por encima de 60 [43]. Esto ratifica la necesidad de un procesamiento previo de estos carbones, si van a ser coquizados sin formar parte de mezclas de carbones.

La Plastometría Gieseler proporciona una medida de la variación de la fluidez del carbón cuando se somete a calentamiento (3°C/min), hasta temperaturas que alcanzan los 550°C. Valores del Intervalo plástico entre 70 y 74, obtenidos para los carbones de los mantos 2 y 3 de Mina Norte bajo consideración, están por encima del límite inferior que define los carbones con buen poder coquizante [48]. Las Temperaturas de reblandecimiento, o puntos de ablandamiento, alcanzan valores en el orden de 408°C que comúnmente son alcanzadas por carbones con un 20% de materia volátil [13]. Considerando los valores de materia volátil de 36% para los carbones (Tabla 1), estos resultados se corresponden con propiedades plásticas excelentes para carbones coquizables, lo cual se ratifica con los resultados de la Máxima Fluidez (Tabla 8) generalmente por en-

cima de 1.000 ddpm [48]. De la inspección de los resultados, se reconoce que los carbones del manto 2, y especialmente la muestra compuesta del manto 2B, es el que presenta las mejores propiedades plásticas como para obtener coques de buena calidad de su procesamiento.

La Tabla 9 incluye los resultados de las determinaciones de Dilatometría Audibert-Arnú, realizadas acorde con la normativa ISO 349 [7]. Miyazu [49] presenta una gráfica de Dilatación total (% Intervalo Plástico) respecto al porcentaje de materia volátil (base seca libre de cenizas), para carbones coquizables de Estados Unidos, Australia, Japón y la antigua Unión Soviética. De acuerdo con los resultados obtenidos por este autor, la mezcla ideal para obtener coques metalúrgicos adecuados, corresponde a valores de dilatación entre 70 y 140%, y tenor de materia volátil entre 30 y 33%. Los carbones objeto de estudio, poseen valores de estas variables que se aproximan bastante a los intervalos óptimos definidos por Miyazu [49]. Similar a lo obtenido de los ensayos de plastometría, los valores del Intervalo Plástico entre 78 y 91, obtenidos para los carbones de los mantos 2 y 3 de Mina Norte bajo consideración, definen la presencia de carbones con buen poder coquizante, los cuales presentan un buen balance entre materiales reactivos e inertes [48].

Los resultados del ensayo de dilatometría, ratifican a los carbones del manto 2B de Mina

Norte, objeto de estudio, como la muestra analizada que arroja las mejores propiedades plásticas para su posible uso como materia prima de coque metalúrgico o siderúrgico.

Finalmente, los datos de HGI (promedio 54), parámetro que mide la dureza o friabilidad, se ajustan a carbones fáciles de fracturar y pulverizar [8, 9], lo cual es muy favorable del punto de vista de su uso tecnológico.

### Conclusiones

Los carbones de los grupos de mantos 2 y 3 objeto de consideración en el presente trabajo, son excelentes materiales, tanto del punto de vista de su aplicación como carbones térmicos, en plantas de generación de electricidad o fabricación de cemento, como del punto de vista de su uso en la industria del acero, bien sea como carbones PCI o como materia prima para coque siderúrgico o metalúrgico. Estos resultados deberían impulsar el análisis más sistemático de los carbones de estos grupos de mantos, con miras a plantear una futura minería subterránea en las minas activas de carbón de Paso Diablo y Mina Norte, con miras al aprovechamiento a nivel nacional de este notable recurso natural.

### Agradecimientos

Se agradece a la empresa Carbones de la Guajira, por permitir la publicación de los resultados de los análisis de estos carbones de Mina Norte.

### Referencias bibliográficas

1. Sutton F.A.: "Geology of Maracaibo Basin, Venezuela". Bull. Am. Assoc. Petr. Geol., Vol. 30, No. 10, (1946) 1621-1741.
2. Ruiz O.: "La Formación Marcelina: Sectores Este y Sur, Zona Paso Diablo". Mem. I Jornadas Geológicas, CARBOZULIA: Maracaibo, Vol. 1, (1983) 99-137.
3. Añez G., Rodríguez S. y García, R.: "Evaluación Geoeconómica de los Depósitos de Carbón de Venezuela". Ministerio de Energía y Minas, Dirección Sectorial de Minas y Geología, Informe interno, Caracas, (1983).
4. SENERVEN.: "Compendio Estadístico Sector Carbón". Ministerio de Energía y Minas, Informe interno, Caracas, (1990).
5. ASTM: "Annual Book of ASTM Standards, Vol. 05.06". American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, (2004).
6. Rees O.W.: "Determining ash in high-carbonate coals". Ind. Eng. Chem., Anal. Ed., Vol. 9, No. 7, (1937) 307-309.
7. ISO 349: "Hard coal. Audibert-Arnud dilatometer test": International Organization for Standardization, ISO Standards, Geneva, Switzerland, 1975.
8. Francis W.: "Coal, Its Formation and Composition". Edward Arnold Publishers Ltd., London, (1961).
9. Krevelen D.W. van: "Coal: Typology, Chemistry, Physics, and Constitution". Elsevier, Amsterdam, (1961).
10. Carbones de la Guajira, S.A.: "Calidad de carbones". Datos confidenciales.
11. Gluskoter H.J., Shimp N.F. and Ruch R.R.: "Coal analyses, trace elements, and mineral matter". In: Elliot M.A. (ed.), Chemistry of Coal Utilization. Second Supplementary Volume: John Wiley & Sons, New York, (1981) 369-424.
12. Given P.H.: "An essay on the organic geochemistry of coal". In: Gorbaty M.L., Larsen J.W. and Wender I. (eds.), Coal Science, Vol. III: Academic Press, New York, (1984) 63-252.
13. Speigh J.G.: "Handbook of Coal Analysis". Wiley-Interscience, New Jersey, (2005).
14. Durand B. (ed.): "Kerogen: Insoluble Organic Matter from Sedimentary Rocks". Editions Technip, Paris, (1980).
15. Tissot B.P. and Welte D.H.: "Petroleum Formation and Occurrence (2nd edition)". Springer-Verlag, New York, (1984).
16. Carbones del Guasare, S.A. y Carbones de la Guajira, S.A.: Descripción litoestratigráfica de sondeos en áreas bajo exploración. Informes internos.
17. Padmanabha A. and Olen H.: "The New Clean Air Act". Water, Environment and Technology, Vol. 3, No. 5, (1991) 40-46.

18. Mitchell D.R. and Charmbury H.B.: "Cleaning and preparation of coal". In: Lowry H.H. (ed.), *Chemistry of Coal Utilization: Supplementary Volume*: John Wiley y Sons, New York, (1963) 312-339.
19. Ode W.H.: "Coal analysis and mineral matter". In: Lowry H.H., ed., *Chemistry of Coal Utilization - Supplementary Volume*: John Wiley & Sons, New York, (1963) 202-231.
20. Rao C.P. and Gluskoter H.J.: "Occurrence and Distribution of Minerals in Illinois Coals". Illinois State Geological Survey Circular 476, (1973).
21. Pollack S.S.: "Estimating mineral matter in coal from its major inorganic elements". *Fuel*, Vol. 58, (1979) 76-78.
22. Ryan B.D. and Grieve D.A.: "Source and distribution of phosphorus in British Columbia coal seams: Geological Fieldwork". B.C. Ministry of Energy, Mines and Petroleum Resources, Paper 1996-1, (1995) 277-294.
23. Winegartner E.C. (ed.): "Coal Fouling and Slagging Parameter". ASME Research Comm. on Corrosion and Deposit from Combustion Gases, Book no. H-86 (1974).
24. Sage W.L. and McIlroy J.B.: "Relationship of coal ash viscosity to chemical composition". *Combustion*, Vol. 31, (1959) 41-48.
25. Schapiro N. and Gray R.J.: "Petrographic classification applicable to coals of all ranks". U.S. Steel Corporation, Illinois Mining Institute Proc., (1960) 83-90.
26. Moses R.G.: "The Use of Petrographic Analysis for the Prediction of Coke Stability". Bituminous Coal Research, Inc., Monroeville, Pennsylvania, (1976).
27. Mazeaud N. y Monpart L.E.: "Estudios petrográficos de algunos carbones del Guasare, Estado Zulia". V Congreso Geológico Venezolano, Tomo IV, Caracas, (1977) 1641-1654.
28. Escobar M. y Martínez M.: "Características geoquímicas y petrográficas de los principales yacimientos carboníferos venezolanos". *Interciencia*, Vol. 18, No. 2, (1993) 62-70.
29. Escobar, M., Martínez, M. y Alciaturi, C.: "Investigaciones sobre el carbón mineral en Venezuela: Calidad, Uso y Proyección Futura". *Interciencia*, Vol. 22, No. 1, (1997) 10-23.
30. Canónico U., Tocco R., Ruggiero A. and Suárez H.: "Organic geochemistry and petrology of coals and carbonaceous shales from western Venezuela". *Int. J. Coal Geol.*, Vol. 57, (2004) 151-165.
31. Hackley P.C., Warwick P.D. and González E.: "Petrology, mineralogy and geochemistry of mined coals, western Venezuela". *Int. J. Coal Geol.*, Vol. 63, (2005) 68-97.
32. Hackley P.C. and Martínez M.: "Organic petrology of Paleocene Marcelina Formation coals, Paso Diablo mine, western Venezuela: Tectonic controls on coal type". *Int. J. Coal Geol.*, Vol. 71, (2007) 505-526.
33. Stach E., Mackowsky M.T., Teichmüller M., Taylor G., Chandra D. and R. Teichmüller.: "Textbook of Coal Petrology, 3rd ed.". Gebrüder Borntraeger, Berlin, (1982).
34. Price L.C. and Barker C.E.: "Suppression of vitrinite reflectance in amorphous rich kerogen—a major unrecognized problem". *J. Pet. Geol.*, Vol. 8 (1985) 59-84.
35. Juliao T.: "Geoquímica y prospección de gas metano asociado a carbón en una sección al sur-oeste de la Mina Paso Diablo, Cuenca Guasare, Estado Zulia". La Universidad del Zulia, Postgrado en Geología Petrolera, Tesis de Maestría, Maracaibo, (2010).
36. Petersen H.I. and Rosemberg P.: "Reflectance retardation (suppression) and source rock properties related to hydrogen-enriched vitrinite in Middle Jurassic coals, Danish North Sea". *J. Petrol. Geol.*, Vol. 21, No. 3, (1998) 247-263.
37. Schapiro N., Gray R.J. and Eusner G.R.: "Recent developments in coal petrography". Blast Furnace, Coke Oven and Raw Materials Committee, Proceedings, ISS-AIME, Vol. 20, (1961) 89-112.
38. Elliot M.: "Chemistry of Coal Utilization. Second Supplementary Volume". John Wiley and Sons, New York, (1981).
39. Schapiro N. and Gray R.J.: "Relation of coke structure to reactivity". *Blast Furnace and Steel Plant*, Vol. 51, (1963) 273-280.

40. Nakamura N., Togino Y. and Tateoka T.: "Behaviour of coke in large blast furnace". Coal, Coke and Blast Furnace. London, The Metals Society, (1977) 1-18.
41. Leonard D.C., Bonte L., Dufour A., Ferstl A., Raipala K., Scmole P., Schoone P., Verduras J.L. and Willmers R.R.: "Coke quality requirements of European blast furnace engineers". Proc. 3rd European Cokemaking Cong., Gent, Belgium, (1996) 1-10.
42. Horrocks K.R.S., Cunningham R.B., Ellison J.F. and Nightingale R.J.: "Coke quality at BHP Steel Port Kembla". Proc. 4th European Coke and Ironmaking Cong., Paris, Vol. 1, (2000) 167-173.
43. Poveromo J.J.: "Operational considerations for high-level blast furnace fuel injection". Proc. 55th Ironmaking Conf., (1996) 79-92.
44. O'Donnell E.M. and Poveromo J.J.: "Coke quality requirements from a North American perspective". Proc. 4th Europ. Coke and Ironmaking Cong., Vol. 1, Paris, (2000) 12-19.
45. Ward C.R.: "Coal Geology and Coal Technology". Blackwell Scientific Publications, Melbourne, (1984).
46. Zimmerman R.E.: "Evaluating and Testing the Coking Properties of Coal". Miller Freeman Publications Inc., San Francisco, 1979.
47. Benedict L.G., Thompson R.R. and Wenger R.O.: "Relationship between coal petrographic composition and coke stability". Blast Furn. Steel Plant, Vol. 56, No. 3, (1968) 217-224.
48. Waterhouse G.W. (ed.): "GWC Coal Handbook": George Waterhouse Consultants Ltd., Tallington, U.K., (1990).
49. Miyazu T.: "The evaluation and design of blends using many kinds of coal for coke making": Intern. Iron Steel Cong., Dusseldorf, Vol. I, pap. 1.2.2.1., (1974).

Recibido el 2 de Noviembre de 2010

En forma revisada el 21 de Marzo de 2011