

REPUBLICA DE COLOMBIA
MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA
INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES GEOLOGICO-MINERAS

**PROPUESTA DE CLASIFICACION DE LOS CARBONES
COLOMBIANOS**

Informe 1932

Por:

CARLOS URIBE B. y FABIO H. PEREZ G.
Instituto Nacional de Investigaciones
Geológico-Mineras

Derechos Reservados por:

INGEOMINAS: Instituto Nacional de Investigaciones Geológico - Mineras
Diagonal 53 No. 34 - 53, Apartado Aéreo No. 4865
Bogotá 2, D.E., Colombia, S.A.

El Boletín Geológico se publica en tres (3) números cada año.
Formato de Publicación: 17 x 24 cm

Editor:

ALBERTO VILLEGAS BETANCOURT
Geólogo

Precio de cada ejemplar:	En Ingeominas	\$ 500.00 (US \$ 2.50)
	Vía Aérea	\$ 700.00 (US \$ 3.50)

DOCTOR EDOUARD REYMOND

Hace pocos meses falleció en Bogotá el ilustre geólogo suizo, Edouard Reymond doctorado en la Universidad de Ginebra y vinculado a Colombia desde hace muchos años, durante los cuales desarrolló continuamente muy importantes actividades profesionales en los sectores oficial y privado.

En 1939 el suscrito tuvo la fortuna de seleccionar al doctor Reymond entre un grupo de profesionales altamente calificados, que se habían inscrito en la Liga de las Naciones con el propósito de emigrar del "infierno" en que por esa época se había convertido Europa por causa de la invasión Nazi.

Aunque el doctor Reymond era ciudadano de un país neutral, había tenido que abandonar el Congo Belga donde trabajaba en las minas de cobre, para refugiarse en Bélgica.

El doctor Reymond accedió a ingresar al recientemente creado Servicio Geológico Nacional del Ministerio de la Economía Nacional, el cual tenía plazas vacantes por carencia de geólogos, pues en el país era muy escaso el número de profesionales graduados en tal profesión. Así, pues sin causar ninguna erogación, ni reclamar ningún privilegio por su condición de experto extranjero, el doctor Reymond trabajó largos años en el Servicio con el interés y la camaradería propios de uno más de los nuestros.

La primera misión del doctor Reymond fue el estudio de las posibilidades económicas del Nevado del Ruiz. Luego, vinieron otras igualmente importantes como las de los carbones de Atlántico y Magdalena y el cobre de Natagaima, así como el estudio de los yacimientos de caliza de El Palacio, en La Calera, donde más tarde la Fábrica de Cementos Samper desarrolló sus principales minas de caliza.

Enseguida, el doctor Reymond se incorporó al Instituto de Fomento Industrial (IFI) donde se dedicó a explorar detalladamente los yacimientos de carbón de El Cerrejón, ejecutando un plan minucioso de perforaciones y la construcción de un abundante número de túneles de cateo. Después, entró a trabajar en Acerías Paz del Río S.A. donde colaboró en el estudio detallado de los yacimientos de hierro del sur de Paz de Río y los de carbón en Samacá, Tópaga y Matayeguas.

Durante varios años trabajó para la Compañía Shell de Colombia en la exploración de petróleo en diversos sitios de Colombia. Pero cerca de los últimos 25 años los consagró a trabajar con Cementos Samper en la prospección detallada de las calizas de Palacio y de otros yacimientos que se investigaron, para los ensanches de dicha empresa.

Trabajador infatigable, aún ya sobrepasada la cumbre de los 80 años, lo encontramos caminando solo por los páramos dedicado a los estudios de terreno. Honrado y responsable, de temperamento muy discreto y modesto con gran espíritu de colaboración, puso sus conocimientos y experiencias al servicio de este país, al que siempre consideró como su segunda patria.

Sirvan estas letras para rendir a la memoria del colega y amigo el testimonio de nuestra admiración, aprecio y gratitud.

Septiembre de 1986

BENJAMIN ALVARADO

Geólogo

CONTENIDO

	Página
RESUMEN	10
1. INTRODUCCION	10
2. PARAMETROS GENERALES DE CLASIFICACION	11
2.1. EL RANGO	11
2.1.1. LA DIAGENESIS	12
2.1.2. METAMORFISMO	12
2.1.3. PARAMETROS DE MEDIDA DEL RANGO	14
2.1.3.1. <i>Ventajas y desventajas de la utilización del poder reflector de la vitrinita como parámetro de medida de rango</i>	14
2.1.3.2. <i>Algunos aspectos de la determinación del rango por el poder reflector de la vitrinita</i>	19
2.2. EL TIPO	24
2.2.1. PARAMETROS DE MEDIA DEL TIPO	27
2.2.1.1. <i>Medición del tipo por el análisis de los grupos de macerales</i>	27
2.3. PARAMETROS TECNOLOGICOS	28
3. ALGUNAS CLASIFICACIONES	30
3.1. CLASIFICACIONES NACIONALES	30
3.2. PROPUESTAS DE CLASIFICACION	32
3.3. DESVENTAJAS DE LA CLASIFICACION INTERNACIONAL	37
4. ESTADO ACTUAL DE LA CLASIFICACION DE CARBONES EN COLOMBIA	39
5. PROPUESTAS DE CLASIFICACION	40
5.1. PRINCIPIOS DE LA CLASIFICACION PROPUESTA	40
5.2. PARAMETROS DE CLASIFICACION PROPUESTOS	40
5.2.1. CRITERIOS DE SELECCION DE LOS PARAMETROS PROPUESTOS Y ESTABLECIMIENTO DE CATEGORIAS	42
5.2.1.1. <i>Primera cifra: Rango</i>	42
5.2.1.2. <i>Segunda y tercera cifras: Tipo</i>	47
5.2.1.3. <i>Cuarta cifra: Cualificación</i>	49
5.2.2. APLICACION DE LA CLASIFICACION PROPUESTAS SEGUN EL CONTENIDO DE MATERIA MINERAL DE LOS CARBONES	51
5.2.3. EJEMPLOS DE UTILIZACION DE LA CLASIFICACION PROPUESTAS	51
5.3. POSIBILIDADES DE APLICACION DE LA CLASIFICACION PROPUESTA EN COLOMBIA	53
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	54
7. BIBLIOGRAFIA	54

FIGURAS

1. Incremento del grado de carbonificación con la profundidad. (Análisis de vitrita y reflectividad de vitrinita)	13
---	----

2. Incremento del grado de carbonificación con la profundidad. (Análisis de vitrita)	15
3. Variación de la composición química elemental de carbones húmicos y sapropélicos con la carbonificación	16
4. Relación entre la reflectancia de la vitrinita y diferentes parámetros químicos de rango	17
5. Determinación del rango	18
6. Relación entre el poder reflector de la vitrinita y el porcentaje de materias volátiles	20
7. Correlación entre reflectancia, materia volátil y contenido de carbono de vitrinita	21
8. Relación de reflectancia con poder calorífico y materia volátil	22
9. Reflectogramas de cinco mezclas de carbones coquizables	22
10. Rango metamórfico	23
11. Relación entre el poder reflector máximo y mínimo de la vitrinita y su contenido de carbono	25
12. Determinación del rango por la reflectancia de la vitrinita para un carbón y una mezcla	26
13. Clasificación internacional de carbones duros	31
14. Clasificación internacional de carbones pardos con un poder calorífico menor de 5.700 Kcal/Kgr (hlcz)	32
15. Clasificación ASTM de carbones por rango	33
16. Clasificación de combustibles fósiles sólidos	34
17. Parámetros para determinación de rango	35
18. Sistema de clasificación de carbones	36
19. Influencia de la composición maceral sobre la relación entre reflectancia y materia volátil	38
20. Clasificación de carbones	41

Página

21. Comparación entre la clasificación internacional y la ASTM	43
22. Clasificación de carbones bituminosos de alto rango y antracitas con base en diferentes parámetros	45
23. Estados de carbonificación de acuerdo a la clasificación americana	46
24. Velocidad de degasificación de los tres grupos de macerales, en función de su rango	48
25. Curva típica de lavabilidad	52

TABLAS

1. Distinción entre turba y carbón pardo	14
2. Macerales de los carbones	24
3. Macerales de los lignitos y carbones sub-bituminosos	28
4. Equivalencia aproximada de reflectancia máxima promedio, reflectancia media y materia volátil	47

RESUMEN

Se presenta aquí la idea de adoptar un sistema de clasificación de los carbones colombianos acorde con las nuevas tendencias tecnológicas de análisis, utilización y mercadeo de los carbones, en reemplazo de la "Clasificación Internacional de Carbones Duros por Tipo", actualmente en uso en Colombia. Se estima que el sistema propuesto puede aplicarse a nivel internacional.

El esquema de clasificación propuesto, está basado en varios parámetros que son fácilmente determinables en el laboratorio y que constituyen hoy en día procedimientos de rutina, así como de investigación, en la industria del carbón de los países avanzados en tecnología.

Dos de estos parámetros son determinados por técnicas microscópicas, y definen el rango (por la reflectancia de la vitrinita) y el tipo (por los contenidos de vitrinita y exinita) de los carbones. Otros tres parámetros: la materia volátil, la dilatometría, el poder calorífico, cualifican los diferentes rangos de carbones. Estos parámetros son representados con un número código de cuatro cifras, que ubica a los carbones dentro de un marco científico y tecnológico de aplicación práctica.

Se ha intentado con esta proposición responder a varias, sino a todas, las críticas que se le hacen a la Clasificación Internacional, siguiendo valiosas sugerencias dadas por prestigiosos expertos en la materia, como Alpern VanKrevelen, Teichmuller, etc.

1. INTRODUCCION

La necesidad de clasificar un material tan ampliamente usado y que varía tan marcadamente en sus propiedades como el carbón, es incuestionable. En un país como el nuestro, en el que la industria del carbón a gran escala apenas empieza, es trascendental la adopción de un sistema adecuado de clasificación de este recurso.

Hasta el presente se han empleado dos sistemas de clasificación de carbones: la clasificación por Rango de la American Standards for Testing Materials (ASTM) y la Clasificación Internacional de Carbones Duros por Tipo. Esta última fue el resultado de un trabajo conjunto de varios países europeos y los Estados Unidos que recomendó su aplicación en 1956, y fue aprobada como norma colombiana en 1981; existen ya ejemplos de su aplicación en nuestros carbones. Sin embargo, casi desde el momento mismo de su creación el sistema ha sido criticado especialmente en lo tocante a su aplicación en carbones de composición maceral variable. Se ha demostrado la enorme incidencia de un alto contenido de inertinita sobre los parámetros en la clasificación. Esta situación es particularmente crítica en carbones de países del hemisferio sur, en los cuales se han encontrado altas concentraciones de dicho maceral. Cabe entonces esperar algo similar en los carbones colombianos y algunos estudios dan evidencia de sus características particulares.

Otra crítica importante a la clasificación internacional ha sido la colocación de parámetros en situación de competencia, en lugar de establecer jerarquías entre ellos. Por otra parte, se ha puesto en duda el grado de alternatividad de algunos de los parámetros (índice de hinchamiento e índice de Roga), con base en estudios que muestran correlaciones diferentes a las expuestas en el sistema internacional.

Las técnicas microscópicas han adquirido desde hace unos años una posición clave en la evaluación de carbones. La petrología hace uso de estas técnicas y es así como hoy día se considera a la reflectancia de la vitrinita como un parámetro confiable en la definición del rango de los carbones. Esta determinación tiene grandes ventajas sobre otros parámetros usados hasta ahora, como materias volátiles y el poder calorífico, los cuales son muy dependientes de la composición maceral.

El término "tipo", que se usa en la Clasificación Internacional en forma tal que

se presta a confusiones, está relacionado con la composición maceral. El conocimiento de la cantidad y modo de ocurrencia de los constituyentes petrográficos del carbón por medio de procedimientos de microscopía ya establecidos, hace posible un mejor aprovechamiento de los resultados obtenidos con parámetros tradicionales como los antes mencionados. Ese conocimiento es también de gran importancia ante la diversificación de la utilización del carbón en nuevos procesos como la gasificación y la licuefacción. Por estas razones se ha decidido incluir el tipo de carbón como un factor determinante de la clasificación.

Considerando la necesidad de distinguir los carbones no sólo por sus características inherentes, sino también por su comportamiento durante los procesos de utilización más frecuentes, se seleccionaron algunos parámetros con técnicas ampliamente conocidas y usadas en la práctica. Estos parámetros constituyen una cualidad del rango de carbón correspondiente (de aquí el término "cualificación" usado en el sistema propuesto). Los límites de aplicación son parcialmente convencionales, como sucede en toda clasificación, pero se ha tratado de usar parámetros que reflejan el interés industrial de utilización de los carbones en determinado proceso, o que al menos establecen una escala dentro de las características inherentes a un rango específico.

Así, las materias volátiles, la dilatometría y el poder calorífico han sido seleccionados como parámetros cualificadores de los correspondientes rangos de carbones. Se han adoptado en lo posible las subdivisiones o categorías definidas por las clasificaciones internacional y ASTM, tratando de establecer con el sistema propuesto una correspondencia que permita comparaciones y estudios de los carbones examinados hasta el presente en diferentes países bajo el marco de las clasificaciones mencionadas.

Si bien, la idea básica consignada en este escrito se ha encaminado a promover la clasificación técnica y organizada de los carbones colombianos a la luz de las nuevas ten-

dencias científicas y comerciales, se estima que los principios fundamentales que soportan la clasificación propuesta son aplicables a cualquier carbón en el mundo. Algunos ejemplos prácticos ilustran y respaldan esta apreciación.

2. PARAMETROS GENERALES DE CLASIFICACION

Existen innumerables parámetros de clasificación de acuerdo con los criterios que se tomen para efectuar la diferenciación de los carbones, obedeciendo muchas veces a conveniencias locales. De este hecho se desprende el gran número de clasificaciones existentes y la adopción de un sistema particular en cada país. La mayoría de los sistemas de clasificación utilizan parámetros que miden el grado de carbonificación o rango de los carbones, el modo de descomposición y la naturaleza específica de la materia fósil (tipo), o las características tecnológicas y de utilización del recurso. A continuación se describen algunos aspectos importantes de estos tres grandes grupos de parámetros generales de clasificación, aspectos que se han tenido en cuenta para la formulación de la propuesta consignada en este escrito.

2.1. EL RANGO

Por definición, el término "rango" designa el estado alcanzado por un carbón en el curso de la carbonificación. La carbonificación es el proceso de desarrollo y evolución gradual por el cual las sustancias vegetales de la turba fueron transformadas, en ausencia parcial de aire y bajo influencia de temperatura y presión a través del tiempo geológico, en lignito y subsecuentemente en carbón. El proceso se caracteriza esencialmente por el enriquecimiento en el contenido de carbono (Léxico del Comité Internacional para Petrografía del Carbón, CIPC, 1963).

El proceso de formación de la turba, fenómeno al que se da el nombre de "turbi-ficación", se ha excluido por conveniencia para los términos de la clasificación propues-

ta. Sin embargo, la descripción misma del proceso de carbonificación puede iniciarse con las características de la formación de la turba. Se distinguirían entonces dos mecanismos principales:

1. La diagénesis, que incluye procesos bioquímicos;
2. El metamorfismo, o sea la carbonificación geoquímica.

2.1.1. LA DIAGENESIS

La diagénesis incluye las primeras etapas de evolución, cuando el material vegetal en descomposición se convierte en turba y llega hasta la formación de lignito tierno, bajo condiciones normales de temperatura y presión. Estas etapas están caracterizadas por una actividad bioquímica.

La alteración más severa ocurre con acceso restringido de oxígeno en la superficie de la turba ya formada, e inmediatamente debajo hasta una profundidad de aproximadamente 0,5 m donde son activas las bacterias aeróbicas, actinomicetos y hongos. A medida que la profundidad aumenta, la actividad microbiana disminuye, y entonces actúan los micro-organismos anaerobios. A una profundidad cercana a los 10 m, la actividad bioquímica usualmente desaparece (STACH et al., 1982). Los agentes de transformación diagenética son entonces oxidación, acidez del medio, temperatura, azufre, enzimas, hongos y bacterias aeróbicas y anaeróbicas.

La formación de sustancias húmicas es el proceso más importante en la turbificación; sucede simultáneamente con la descomposición de los diferentes ingredientes de las plantas. El enriquecimiento de los materiales de más dificultad de descomposición produce un aumento en el contenido de carbono, elemento que sirve como guía inicial de medida de la diagénesis. El incremento de la compresión produce un decrecimiento en el contenido de humedad, parámetro que, junto con la cantidad de celulosa libre, es un buen indicador del grado de turbificación (Tab. 1).

2.1.2. METAMORFISMO

Esta segunda fase de transformación es definida como una fase dinamoquímica o de carbonificación geoquímica, y se produce después del enterramiento inicial del material vegetal descompuesto bajo la acción de una presión y una temperatura más elevadas que las de condiciones normales. Esta transformación conduce a la formación de lignitos duros hasta antracitas. El aumento de presión modifica en especial las propiedades físicas mientras que la elevación de la temperatura influye en la composición química del carbón.

Propiedades como la dureza, la resistencia, la porosidad y la anisotropía óptica están relacionadas con el aumento de la presión de carga hacia la profundidad. La porosidad desciende rápidamente en las primeras etapas de la carbonificación, y lo mismo sucede con el contenido de humedad, lo cual también está relacionado con la descomposición de grupos hidrofílicos, especialmente grupos OH⁻. Al mismo tiempo, el poder calorífico se incrementa.

Teniendo en cuenta que la temperatura aumenta con la profundidad, y que la velocidad de una reacción química se duplica por cada 5 a 10°C de elevación de temperatura, los carbones de las capas más profundas son por lo general de más alto rango que los más superficiales. Este hecho se conoce como la "Ley de Hilt (Figs. 1 y 2).

En el paso de lignito a carbón sub-bituminoso, los últimos residuos de celulosa y lignina son transformados en materiales húmicos, y los ácidos húmicos se condensan en moléculas más grandes (huminas). Inicialmente hay desprendimiento de gas carbónico, agua y metano. En la etapa de formación de carbón sub-bituminoso también ocurren cambios más marcados desde el punto de vista petrográfico: la gelificación de las sustancias húmicas, es decir, la transformación del material por reacciones de naturaleza físico-coloidal que conduce a la formación de vitrinita (denominada "huminita" en esta etapa).

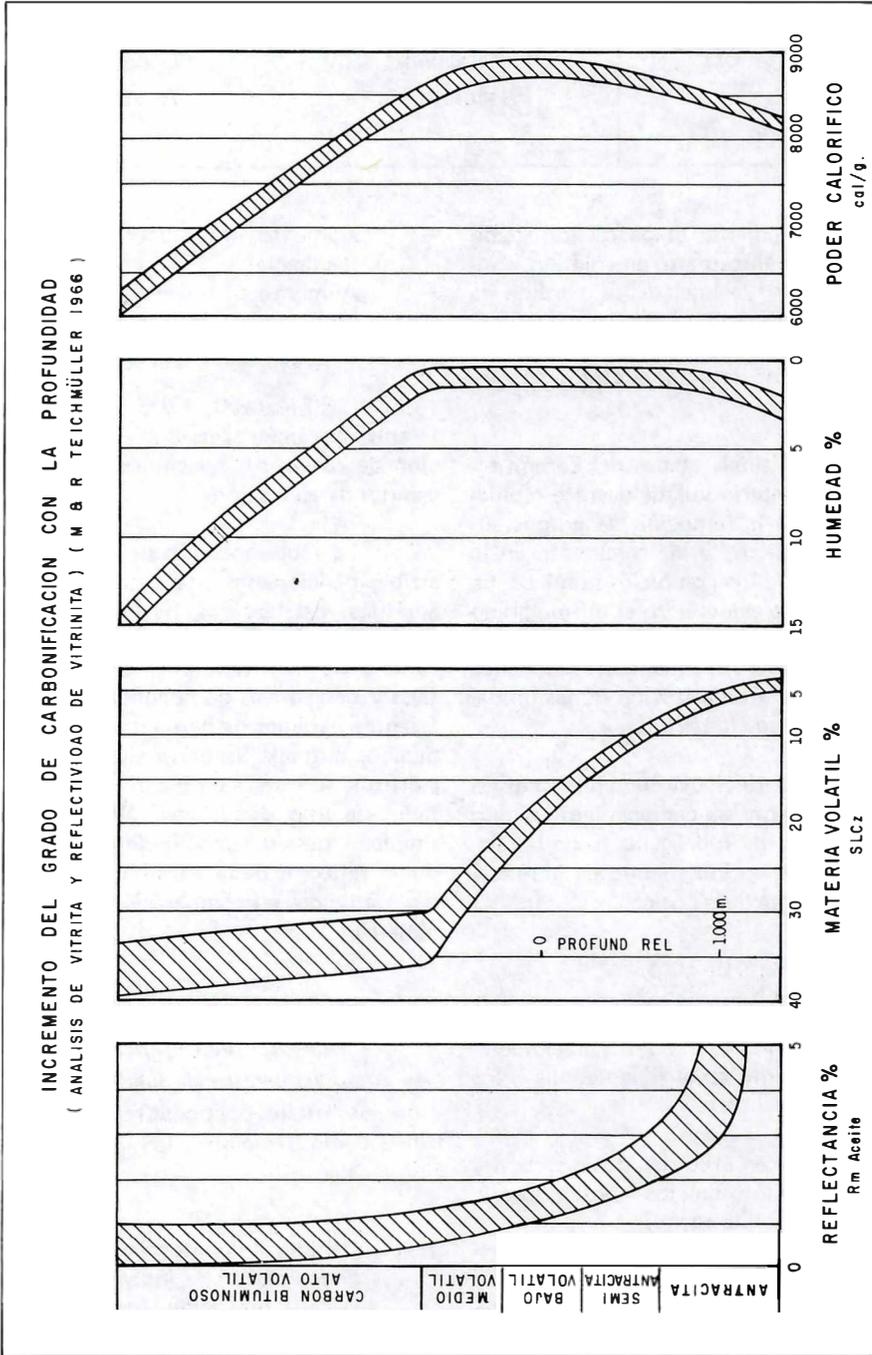


FIG. 1: Incremento del grado de carbonificación con la profundidad (Análisis de vitrinita y reflectividad de vitrinita) (M. & R. TEICHMÜLLER, 1966).

TABLA 1: DISTINCION ENTRE TURBA Y CARBON PARDO

	TURBA	CARBON PARDO
% De Humedad	> 75	< 75
% De Carbono (SL Cz)	Generalmente < 60	Generalmente > 60
Celulosa Libre	Presente	Ausente
Puede ser Cortado	Si	No

En la siguiente etapa de formación del carbón bituminoso alto en volátiles, continúa el proceso ya iniciado de pérdida de humedad y aumento en el poder calorífico, este último comúnmente empleado como parámetro indicador de rango a este nivel evolutivo.

En las últimas etapas del carbón bituminoso, la materia volátil decrece rápidamente debido a la remoción de grupos alifáticos y alicíclicos, y al incremento en la aromatización de los complejos húmicos. La reflectividad se eleva casi en el mismo grado en que disminuye la materia volátil, puesto que ambos parámetros están correlacionados con el grado de aromatización de las unidades estructurales de la vitrinita.

La etapa final del metamorfismo está caracterizada por un decrecimiento rápido en el contenido de hidrógeno (o de la relación H/C) y por un incremento de la reflectividad y la anisotropía óptica.

2.1.3. PARAMETROS DE MEDIDA DEL RANGO

Resumiendo lo expuesto en el numeral 2.1., el aumento en el rango conlleva los siguientes fenómenos:

- Aumento en el contenido de carbono;
- Disminución en los contenidos de oxígeno e hidrógeno;
- Disminución del contenido de materias volátiles;
- Disminución de la capacidad de retención de humedad;
- Aumento del poder calorífico (hasta carbones de alrededor del 20% de materias volátiles);

- Aumento en el poder reflector (o reflectancia);
- Aumento en la anisotropía (distintas propiedades ópticas según la dirección de observación).

Las Figuras 3, 4 y 5 muestran los diferentes parámetros usados en la determinación de rango, sus relaciones entre sí, y sus campos de aplicación.

La representación de los fenómenos arriba mencionados por medio de técnicas analíticas establecidas, ha sido utilizada en distintas clasificaciones, según sea el propósito de éstas científico o comercial, y las ventajas y desventajas de la aplicación de los diferentes parámetros han sido discutidas por muchos autores. Se haría muy extenso este escrito si se tratara de incluir aquí los resultados de esas discusiones. Nos limitaremos simplemente a destacar la determinación del poder reflector de la vitrinita como parámetro de rango, en comparación con otros parámetros.

2.1.3.1. Ventajas y desventajas de la utilización del poder reflector de la vitrinita como parámetro de medida del rango.- Entre las ventajas del poder reflector de la vitrinita como parámetro de rango, se pueden citar las siguientes:

1. Debido al comportamiento diferente de los macerales individuales durante la carbonificación, los estudios comparativos de rango no se deben efectuar en el carbón global sino en concentrados de macerales, como huminitas o vitrinitas. Los materiales hú-

micos responden de manera relativamente uniforme al proceso evolutivo, independiente de que sean o no los más abundantes constituyentes. El hecho de poder efectuar medias de reflectancia en muestras medias sin necesidad de recurrir a la separación grano por grano o a métodos densimétricos para aislar determinado maceral representa una enorme ventaja de esta determinación sobre otros parámetros.

2. El poder reflector de la vitrinita es un parámetro que puede ser utilizado en un amplio intervalo de rango,

desde lignito hasta antracita, mientras que otros parámetros se utilizan en forma más restringida para ciertas etapas de la carbonificación. La humedad de equilibrio y el poder calorífico son utilizables principalmente en los primeros estados de carbonificación. El porcentaje de carbono, aunque puede ser un buen parámetro para las etapas de carbón bituminoso alto en volátil, es un indicador de rango relativamente pobre para carbones con menos de 30% de materia volátil. Las materias volátiles, si se toman como parámetro de rango, deberían ser determinadas sobre el

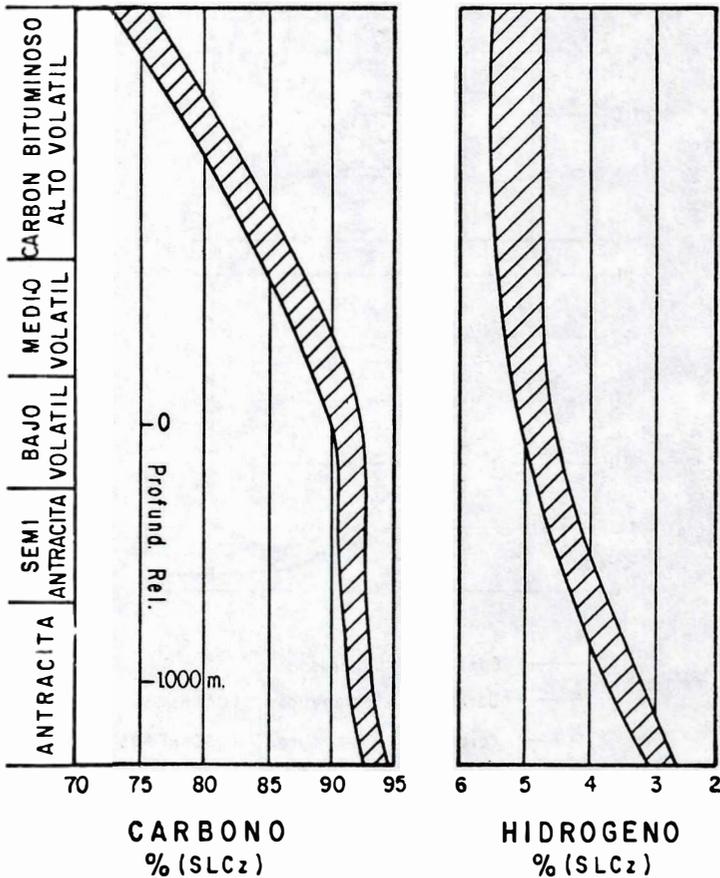


FIG. 2.: Incremento del grado de carbonificación con la profundidad (Análisis de vitrinita) (M. & R. TEICHMÜLLER, 1966).

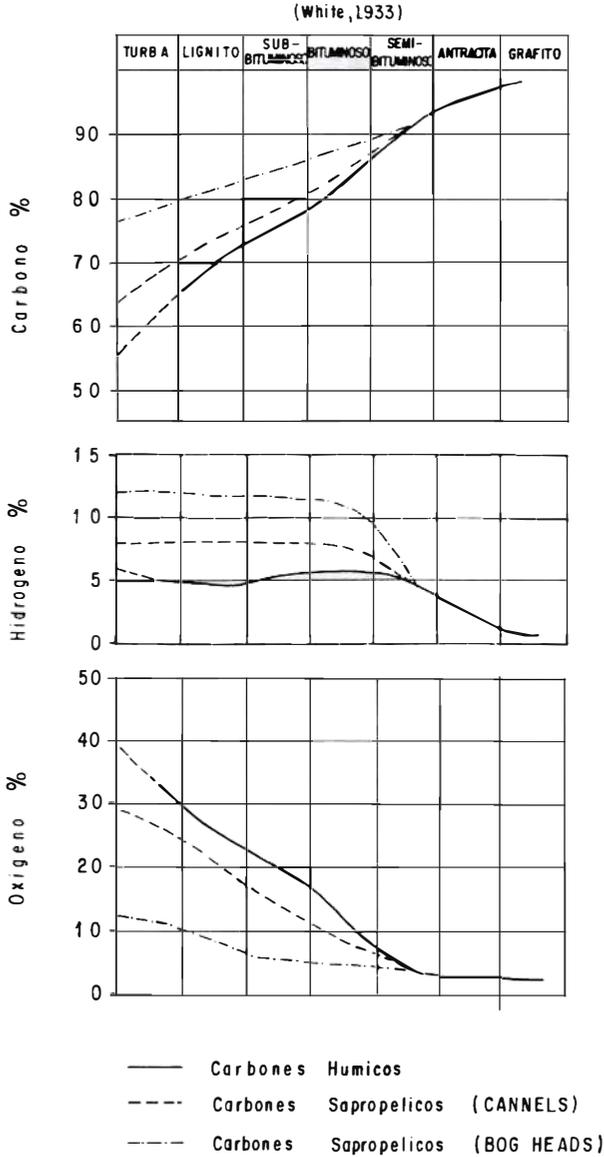


FIG. 3: Variación de la composición química elemental de carbones húmicos y sapropélicos con la carbonificación.

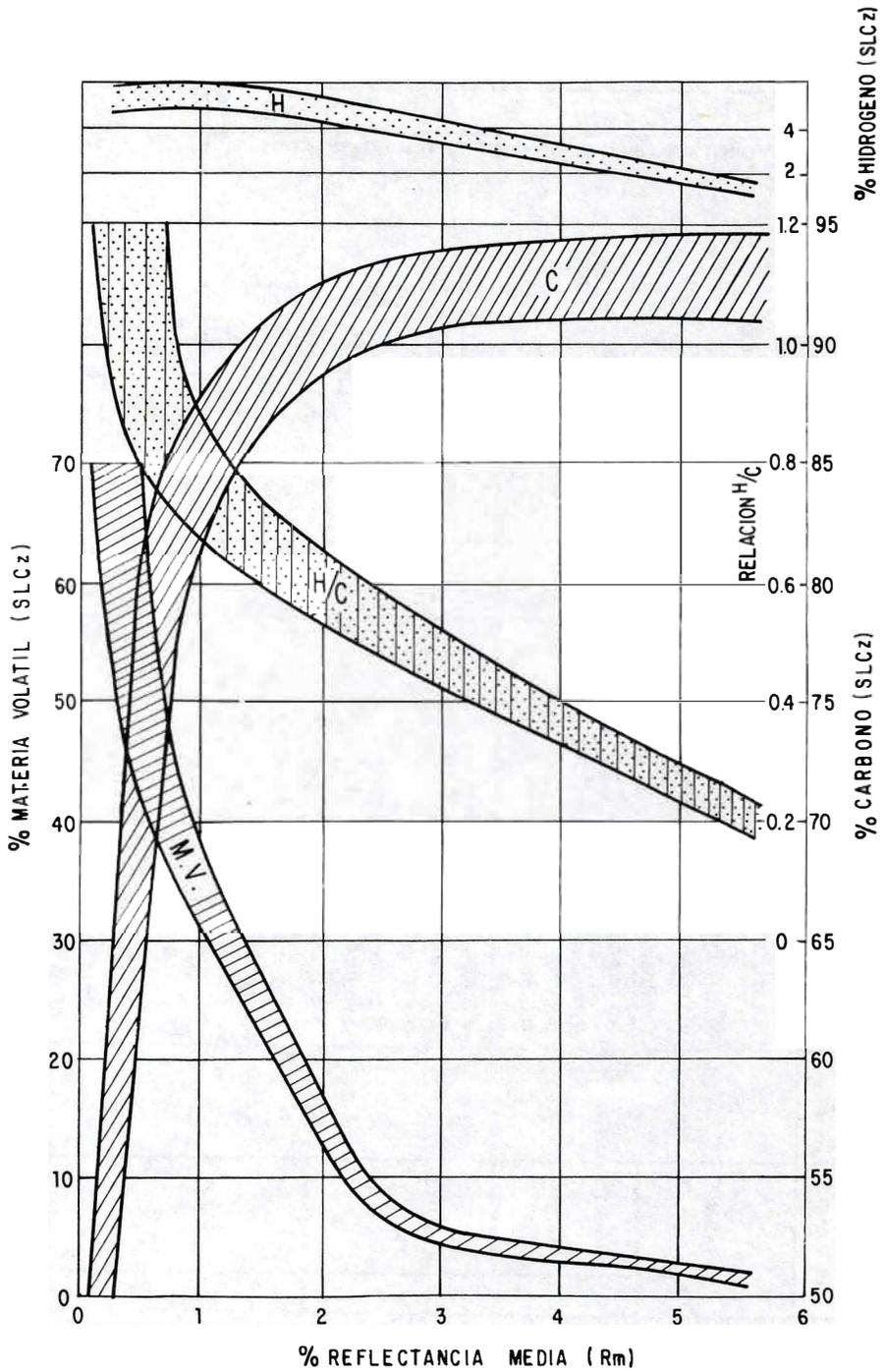


FIG. 4: Relación entre la reflectancia de la vitrinita y diferentes parámetros químicos de rango. (TEICHMULLER, M., 1971).

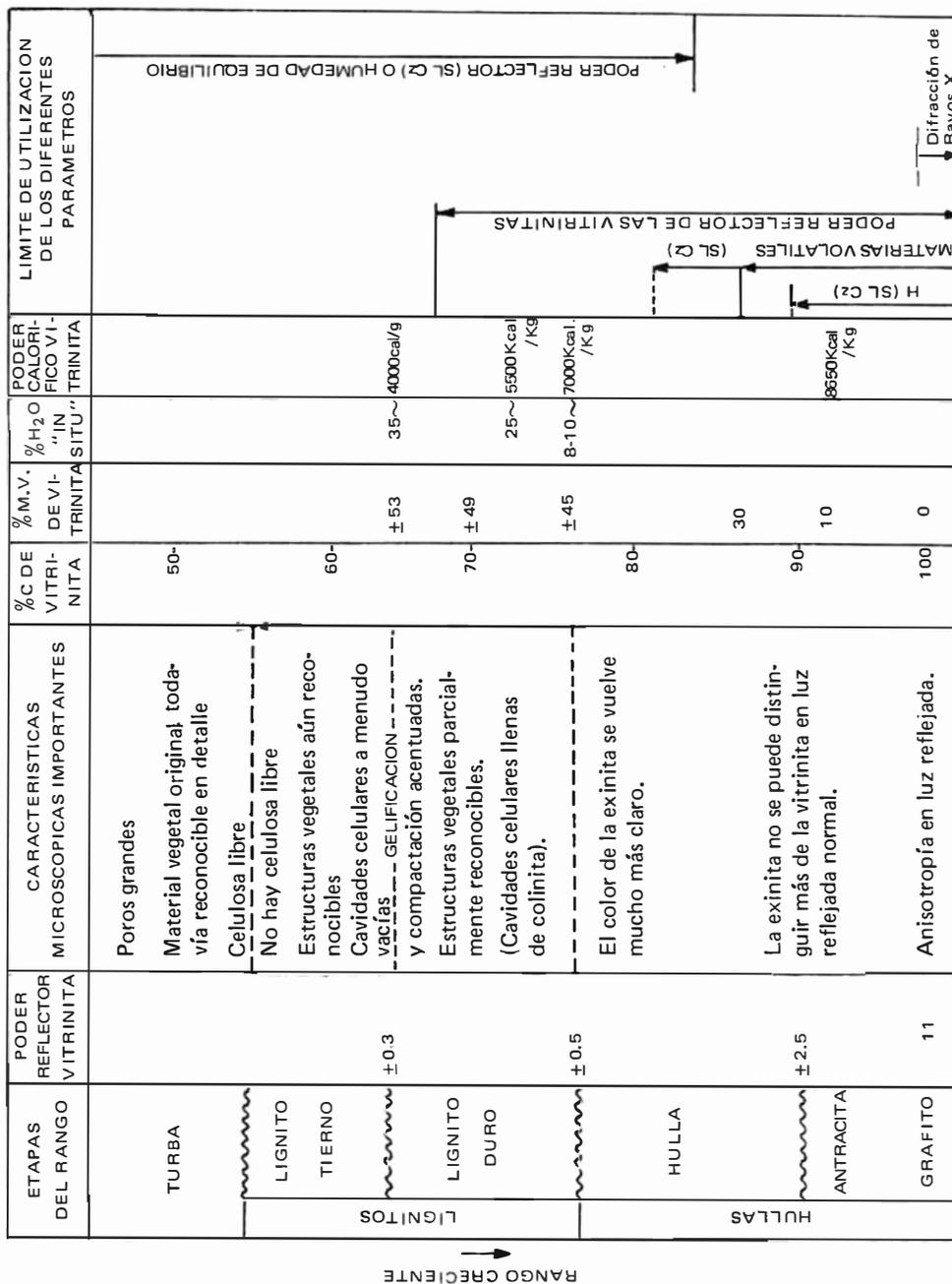


FIG. 5: Determinación del rango, (Léxico CIPC, 1963).

mismo maceral (vitrinita), pues si se hace en el carbón global el resultado estará influenciado no sólo por el rango, sino por el tipo de carbón. Por otra parte, la determinación de materias volátiles en carbones de bajo rango es bastante imprecisa, debido a la relativamente enorme cantidad de gases que se desprenden durante la prueba en un tiempo muy corto.

3. El poder reflector de la vitrinita mide el rango independientemente de la composición maceral del carbón (ver Fig. 19).
4. Las curvas evolutivas establecidas separadamente por petrógrafos de diferentes países comparando el poder reflector de la vitrinita de carbones nacionales con otros parámetros de rango han resultado superponibles (Fig. 6). Este hecho coloca dicho parámetro, una vez normalizado, como un valor universal. Por otra parte, se pueden establecer diagramas que relacionan el poder reflector con otros parámetros habituales (ver Figs. 4, 6, 7 y 8).
5. La medida del poder reflector es un ensayo no destructivo, es decir, el material examinado no se somete a procesos que pueden cambiar su naturaleza, y además se determina con muy pequeñas cantidades del material.
6. La determinación del rango de los diferentes carbones que constituyen una mezcla no puede ser obtenida, sino por la medida del poder reflector (con el correspondiente histograma de reflectancia), puesto que los ensayos químicos, físico-químicos y tecnológicos dan solamente valores promedios para la mezcla global (Fig. 9).

Entre las desventajas del método de determinación del poder reflector de la vitrinita como medida del rango de los carbones se pueden mencionar el costo relativa-

mente alto del equipo (microscopio de luz reflejada con fotómetro y registrador de señales, y aparatos y accesorios para la preparación de muestras para petrografía), y la alta capacitación de los operadores.

2.1.3.2. *Algunos aspectos de la determinación del rango por el poder reflector de la vitrinita.*- El exámen visual de una serie de muestras de carbón de grado de evolución creciente, muestra ya marcadas diferencias en color (de pardo a negro) y en brillo, propiedades que se van acrecentando a medida que el carbón avanza en su metamorfismo. El material presenta entonces una tendencia a reflejar la luz cada vez más, esta propiedad puede ser medida con gran precisión con ayuda de un fotómetro que recibe la luz reflejada por la superficie de la muestra y convierte la señal en forma adecuada para su registro u observación. La reflectancia de la muestra se compara con aquella de un estándar de valor conocido, trabajando siempre en condiciones normalizadas y sobre el mismo constituyente de referencia (vitrinita - huminita).

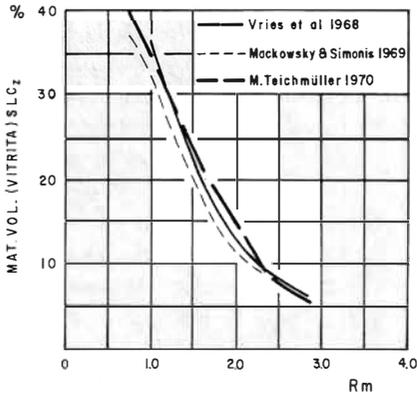
La vitrinita (llamada huminita en carbones de bajo rango) se ha escogido como grupo de macerales para la medición del rango, por las siguientes razones:

La vitrinita es el maceral generalmente más abundante en los carbones, y por consiguiente más representativo del carbón examinado;

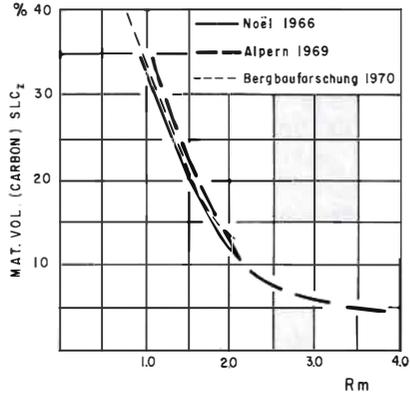
Sus propiedades varían de manera continua en el curso de su carbonificación; en ciertos estados de este proceso la exinita varía aún más fuertemente que la vitrinita, y puede ser también usada para la determinación del rango (ver Fig. 10);

La vitrinita es relativamente fácil de aislar.

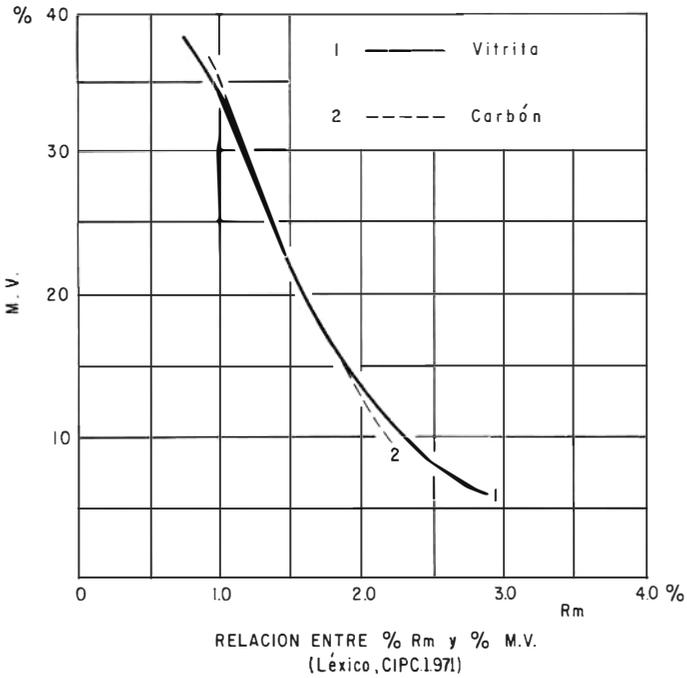
La determinación del rango por el poder reflector se puede efectuar sobre



RELACION ENTRE % Rm (VITRINITA) Y % M.V. EN CONCENTRADO DE VITRINITA.



RELACION ENTRE % Rm (VITRINITA) Y % M.V. EN CARBON GLOBAL.



RELACION ENTRE % Rm y % M.V. (Léxico, CIPC.1971)

FIG. 6: Relación entre el poder reflector de la vitrinita y el porcentaje de materias volátiles.

muestras en granos o en bloques. En el primer caso, de uso más frecuente, es necesario partir de una muestra lo más representativa posible, la cual se pulveriza a tamaño menor de malla 20 (850 micrones) en forma gradual para evitar la excesiva producción de finos (granos inferiores a 50 micrones). Después de un cuidadoso cuarteo, la muestra pulverizada se mezcla con el material de recubrimiento (generalmente resina epóxica) en proporción aproximada 3:2. Después del endurecimiento de la mezcla, se procede a pulir la superficie hasta que quede exenta de rayaduras o relieves inconvenientes.

Las lecturas del poder reflector se efectúan sobre playas (áreas) de colinita, un maceral del grupo de la vitrinita libre de tejido celular (ver Tab. 2). Estas playas deben tener un diámetro mayor de 10 micrones y estar libres de fisuras, rayaduras o inclusiones minerales. Se efectúan al menos 100 lecturas tratando de cubrir toda la superficie examinada.

Para determinar la máxima reflectancia se usa en el microscopio una fuente de luz polarizada, la cual pasa a través de un filtro verde (546 nm) y llega a un tubo fotomultiplicador después de ser reflejada por la superficie del espécimen.

Una vez centrado y enfocado el grano del maceral particular, se gira lentamente la platina circular del microscopio hasta completar 360° y se anota la máxima lectura en el registrador del fotómetro. Esta lectura es la máxima reflectancia, R_{max} . El promedio de por lo menos 100 lecturas es llamado reflectancia máxima media (o promedio), \bar{R}_{max} .

Un valor mínimo es también registrado cuando el espécimen es rotado 360°. Si la superficie pulida es perpendicular al plano de sedimentación del manto de carbón, este valor mínimo es un verdadero mínimo y es llamado reflectancia mínima, R_{min} . Si la superficie pulida no es perpendi-

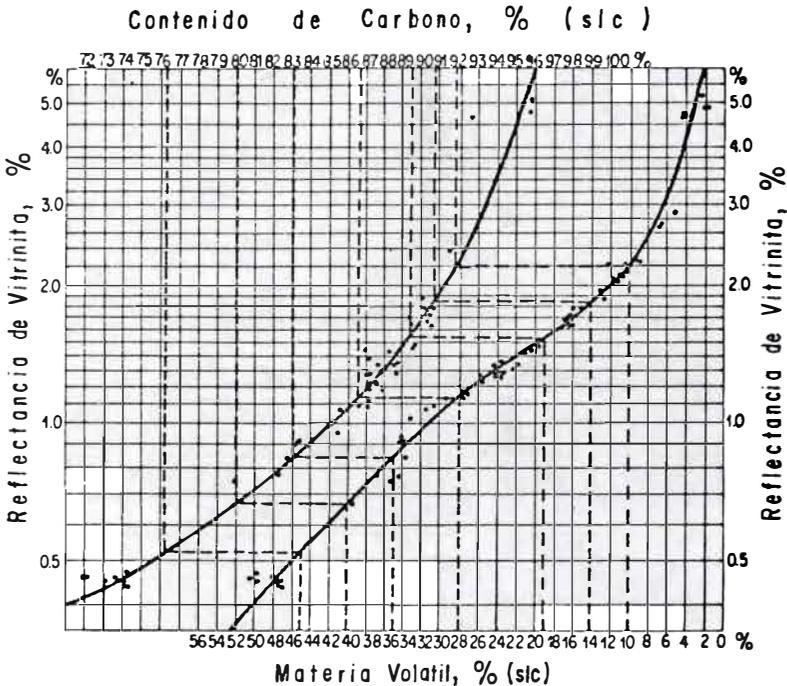


FIG. 7: Correlación entre reflectancia, materia volátil y contenido de carbono de vitrinita (KOTTER, 1960).

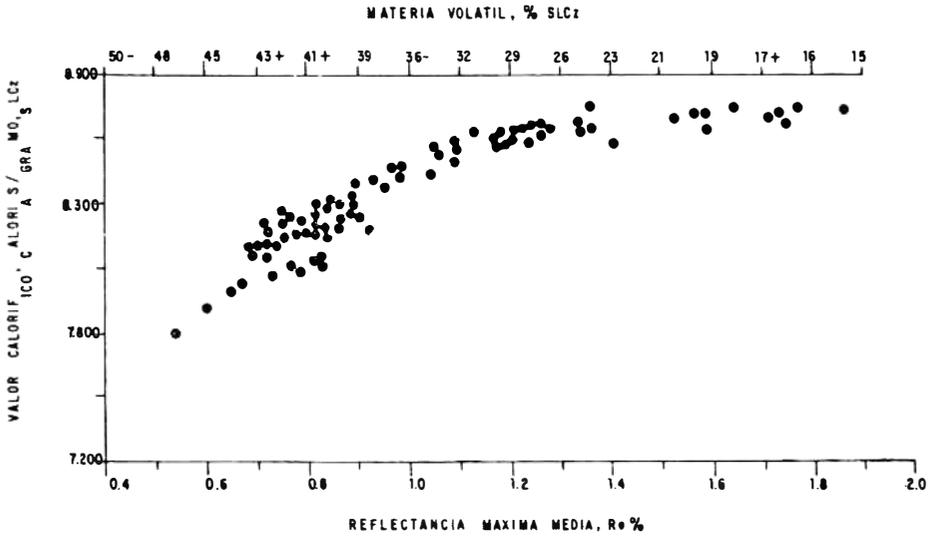
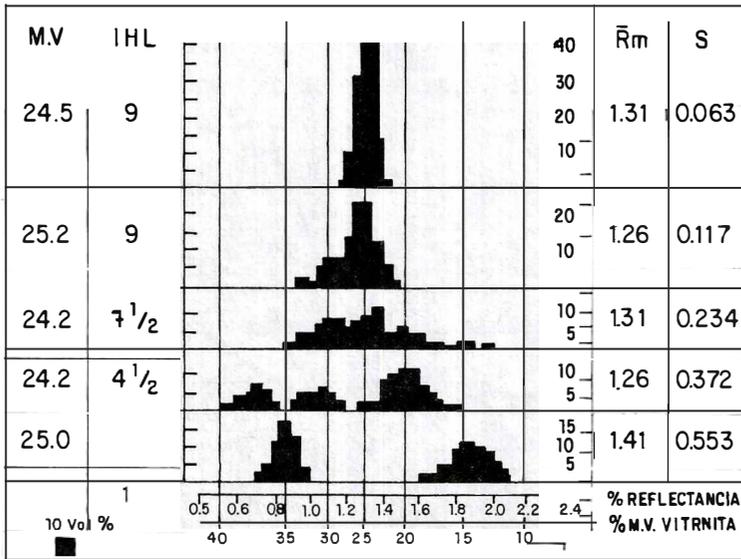
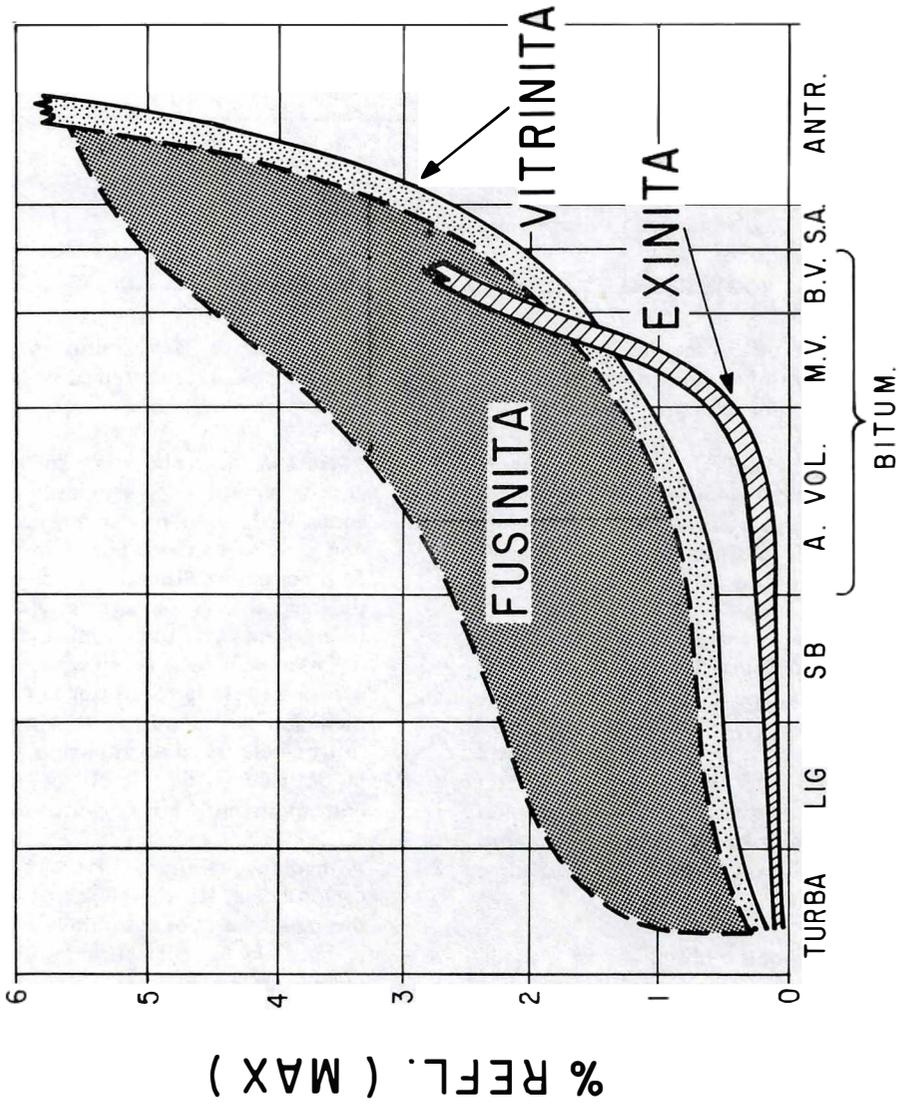


FIG. 8: Relación de reflectancia con poder calorífico y materia volátil. (BENEDICT y BERRY, 1966).



M.V = Materia volátil (SLCz)
 IHL = Índice de hinchamiento libre
 Rm = % Promedio de Reflectancia
 S = Dispersión

FIG. 9: Reflectogramas de cinco mezclas de carbones coquizables. (MACKWSKY y SIMONIS, 1969).



F. G. 0 Rango metamórfico.

TABLA 2: MACERALES DE LOS CARBONES (Léxico CIPC, 1971)

GRUPO DE MACERALES	MACERALES	TIPO DE MACERALES	VARIEDAD DE MACERALES	CRIPTO MACERALES
VITRINITA	Telinita	Telinita 1 Telinita 2	Cordaitotelinita Fungotelinita Xylotelinita Lepidofitotelinita Sigilariotelinita	Criptotelinita Criptocorpolinita
	Colinita	Telocolinita Gelocolinita Desmocolinita Corpocolinita		
	Vitrodetrinita			
EXINITA	Esporinita		Tenuiesporinita Crasiesporinita Microesporinita Macroesporinita	Criptoexoesporinita Criptoıntoesporinita
	Cutininita			
	Resininita			
	Algininita Liptodetrinita			
INERTINITA	Micrininita Macrininita Semifusinita Fusinita	Pirofusinita Degradofusinita Fungoesclerotinita	Plectenchimininita Corpoesclerotinita Seudocorpoesclerotinita	
	Esclerotinita			
	Inertodetrinita			

cular al plano de sedimentación, el valor mínimo es un mínimo aparente y es llamado reflectancia mínima aparente, R'_{\min} .

La diferencia entre reflectancia máxima y reflectancia mínima es llamada birreflectancia, cuyo valor se incrementa a medida que aumenta el rango. La birreflectancia mide el grado de anisotropía del carbón.

En algunos casos, y especialmente en carbones de rango inferior a los bituminosos medios en volátiles, la birreflectancia tiene valores menores de aproximadamente 0,2% (Fig. 11). Entonces se acostumbra determinar la denominada reflectancia media R_m (STACH, 1982), la cual no necesita rotación de la platina del microscopio y por lo tanto su determinación constituye un gran ahorro de tiempo.

Con los datos obtenidos en la medición de reflectancia es usual construir un histograma para determinar el valor promedio de las lecturas. En el caso de mezclas de carbones es necesario efectuar más de 500 lecturas, y el histograma construido dará la reflectancia máxima o media de los carbones constituyentes de la mezcla (Fig. 12).

Es necesario hacer dos aclaraciones sobre la determinación del rango con base en

el poder reflector de la vitrinita, especialmente en referencia a los extremos de la diagenesis o del metamorfismo:

1. Las etapas de turba y lignito tierno, contrariamente a los estados más elevados de la carbonificación, no pueden ser considerados como un todo. El proceso de gelificación es demasiado incipiente, y se hace muy difícil la escogencia de un mismo material de referencia suficientemente homogéneo. Es ésta la razón por la cual la medición del rango por medio de la reflectancia no se efectúa sino a partir de valores del orden de 0,3%, correspondiente a los lignitos duros.
2. A medida que el grado de carbonificación crece, las diferencias entre los diversos macerales disminuyen y, en el caso de las antracitas, esas diferencias ya no existen. La medición del rango se efectúa entonces sobre el carbón global y no sobre el grupo de los macerales de la vitrinita.

2.2. EL TIPO

El tipo de un carbón depende de la naturaleza, las condiciones de deposición y

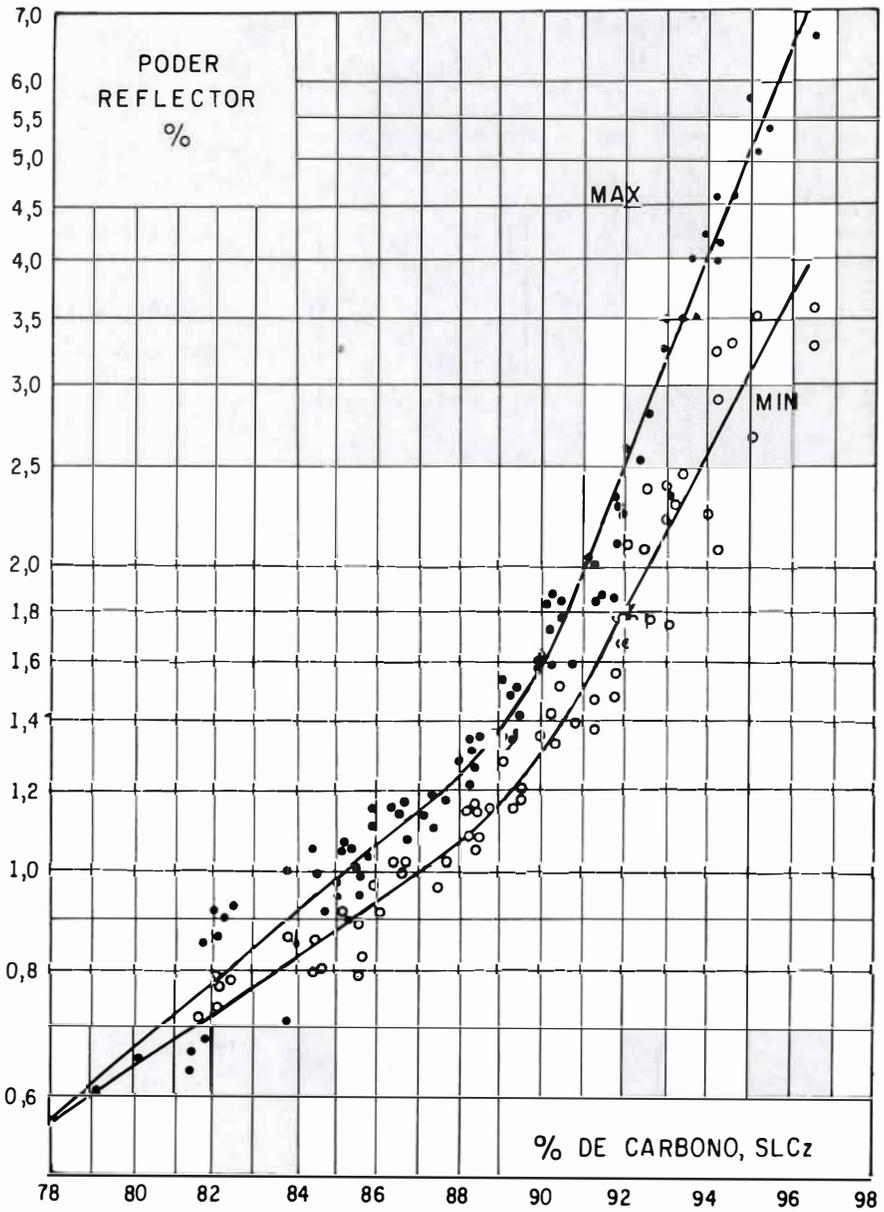


FIG. 11: Relación entre el poder reflector máximo y mínimo de la vitrinita y su contenido de carbono . (Léxico CIPC, 1963).

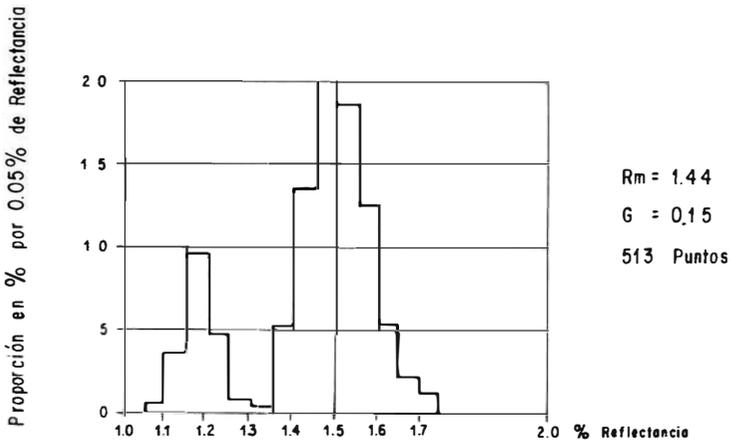
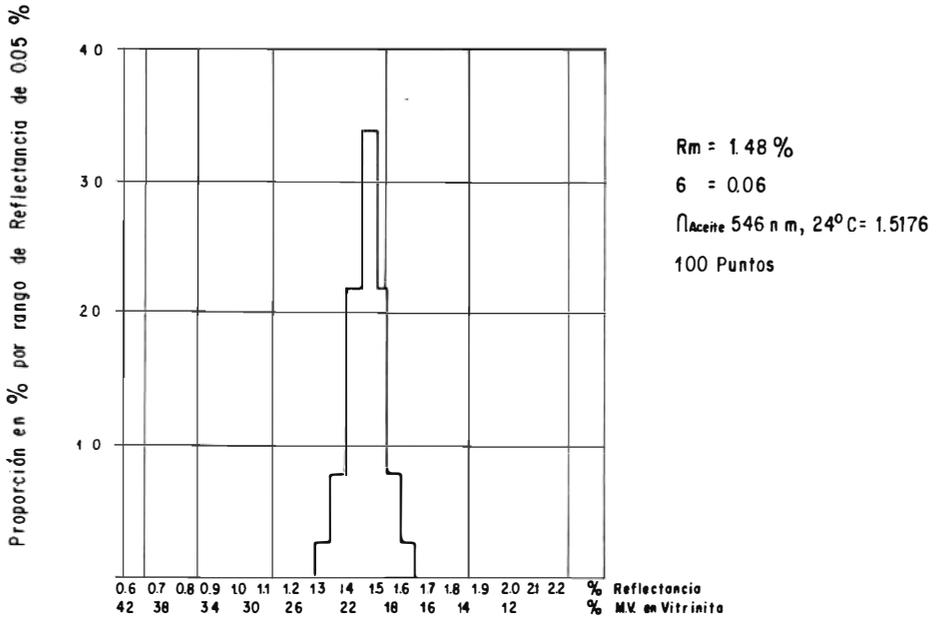


FIG. 12: Determinación del rango por la reflectancia de la vitrinita para un carbón y una mezcla.

la alteración bioquímica de los ingredientes de las plantas originales.

Las sustancias que dan origen a los carbones son de una enorme diversidad pero pueden ser agrupadas en dos: Un primer grupo de tipo continental o sea plantas superiores constituidas principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina. Este tipo de material de origen conduce a carbones que se denominan húmicos o de la serie ligno-celulósica. A medida que nos retiramos de la parte continental acercándonos a las costas o medios lacustres, el tipo de material y la forma de acumulación son diferentes.

En el agua ocurre una clasificación granulométrica, los grandes fragmentos leñosos están ausentes, el aspecto se torna más homogéneo y el conjunto es mucho más fino; estos fenómenos conducen a los carbones denominados sapropélicos.

Los carbones húmicos, son autóctonos o sea de formación "in situ", los sapropélicos son de tipo alóctono, donde el transporte de material ha jugado un papel primordial.

2.2.1. PARAMETROS DE MEDIA DEL TIPO

Los parámetros de medida del tipo deben dar una idea de los dos procesos que dan origen a los diferentes tipos de carbón: la clase de material de origen y su forma de acumulación, y la velocidad e intensidad de las acciones posteriores a la deposición original o sea el predominio de las condiciones aeróbicas o anaeróbicas.

Existe una relación entre la composición petrográfica, el contenido de materia volátil y la relación carbono-hidrógeno de los carbones; sin embargo, es muy difícil determinar un tipo de carbón a partir del análisis próximo o último de sus componentes (FISHER, 1938).

La petrografía es una herramienta invaluable para poder explicar diferencias que

presentan los carbones de composición química similar.

2.2.1.1. Medición del tipo por el análisis de los grupos de macerales.- La mejor forma de determinar el tipo de un carbón es efectuando el análisis de sus componentes petrográficos a los cuales se les ha dado el nombre de macerales y que determinan por sus proporciones y asociaciones las propiedades físicas, químicas y tecnológicas de un carbón de rango dado. (Léxico del CIPC, 1963).

La identificación de los diversos macerales está basada en las diferencias de forma, estructura y poder reflector de los diversos componentes microscópicos. De acuerdo a semejanzas sobre todo en el poder reflector, se han agrupado diferentes macerales que poseen composición elemental y características tecnológicas muy similares. Se pueden reconocer entonces tres grupos de macerales a los cuales se les ha dado diferentes nombres según su grado de evolución: para los carbones bituminosos se distinguen el grupo de vitrinita de poder reflector medio, el grupo de la exinita de poder reflector inferior y el de la inertinita de poder reflector superior al de la vitrinita.

En el caso de los lignitos, los tres grupos de macerales toman el nombre de huminita, liptinita e inertinita.

Las Tablas 2 y 3 muestran los diferentes componentes petrográficos de los carbones y lignitos.

El grupo de macerales más importantes en los carbones del hemisferio norte es el de la vitrinita que comúnmente alcanza valores de 60 a 80%. El grupo de macerales de la exinita generalmente tiene valores del 5 al 20% en los carbones húmicos, pero en los sapropélicos es el grupo predominante.

El tercer grupo de macerales la inertinita, toma su nombre del comportamiento inerte de estos constituyentes en la coquización, la carbonización y la grafitización; es

TABLA 3: MACERALES DE LOS LIGNITOS Y CARBONES SUB-BITUMINOSOS
(Léxico, CIPC, 1971)

GRUPO DE MACERALES	SUB-GRUPO DE MACERALES	MACERALES	TIPO DE MACERALES
HUMINITA	Humotelinita	Textinita	
		Ulminita	Texto-Ulminita Eu - Ulminita
	Humodetrinita	Atrinita	
		Densinita	
	Humocolinita	Gelinita	Porigelinita Levigelinita
		Corpohuminita	Flobafinita Seudoflobafinita
LIPTINITA		Esporinita	
		Cutinita	
		Resinita	
		Suberinita	
		Alginita	
		Liptodetrinita	
		Clorofilinita	
INERTINITA		Fusinita	
		Semifusinita	
		Macrinita	
		Esclerotinita	
		Inertodetrinita	

de marcada ocurrencia en los carbones del hemisferio sur.

Para la determinación del tipo de carbón basta con hacer un análisis cuantitativo en el microscopio de luz reflejada sobre muestras en granos, de los grupos macerales. No se justifica ir más allá de la identificación como por ejemplo macerales, sub-macerales, tipo de macerales o variedad de estos, determinaciones que sólo se hacen necesarias en estudios de correlación e identificación de mantos o en investigaciones de génesis de mantos del carbón.

El método más empleado para el análisis maceral es con un contador de puntos automático; se coloca un retículo en cruz y se identifica el maceral que se encuentra en el cruce de las líneas. Se emplean oculares 8X-10X, objetivos 25,40 ó 50X,

y se identifican al menos 500 puntos en total.

Es necesario aclarar que el análisis de grupos de macerales (o de macerales) no es posible en todos los rangos del carbón; como ya se mencionó en la Sección 2.1.3.2 para los carbones de más alto rango (por ejemplo de más de 90% de C en vitrinita) hay una homogenización de las características de los macerales y se hace muy difícil distinguir por ejemplo, vitrinita de exinita; en los carbones de mayor metamorfismo es imposible hacer la diferenciación.

2.3. PARAMETROS TECNOLOGICOS

Se le ha dado el nombre a aquellos procedimientos analíticos de laboratorio que se utilizan para distinguir los carbones según

su comportamiento en los procesos tecnológicos.

El desarrollo de los diferentes sistemas nacionales de clasificación se ha basado generalmente en la necesidad de ajustar las características de carbones locales a las necesidades de la industria usuaria de los mismos, sin hacer referencia a los carbones de otros países.

Partiendo del principio de distinción establecido con el rango y el tipo de carbón, se han buscado criterios para definir las características más importantes de cada rango o cada tipo mediante técnicas analíticas confiables, fáciles de aplicar y ampliamente conocidas.

En general, los usos más frecuentes del carbón son: en combustión, en coquización, y en obtención de subproductos (gas, alquitrán, y otros combustibles líquidos, principalmente). Esto explica por qué las determinaciones del poder calorífico y las materias volátiles, y además las características del comportamiento del carbón durante el calentamiento han sido desde hace mucho tiempo usados como parámetros de clasificación. Hoy en día, las nuevas tecnologías de gasificación y licuefacción del carbón hacen necesario un conocimiento más preciso de los componentes del carbón y de su participación en los procesos, por lo cual los principios de clasificación deben ser revisados.

Como se indicó en la Sección 2.1.3. las materias volátiles y el poder calorífico pueden ser usados como parámetros de rango, aunque existen límites en la extensión de su aplicación dentro del proceso evolutivo del carbón. Al mismo tiempo, estos parámetros dan información acerca de sus características de comportamiento en determinados procesos, especialmente de combustión.

La necesidad de conocer en más detalle el comportamiento del carbón en condiciones de proceso similares a las encontradas en las plantas de coquización ha conducido al empleo de parámetros como la dilatometría, la plastometría y el ensayo Gray-King,

que se incluyen en diferentes clasificaciones nacionales. Otros ensayos como el índice de hinchamiento y el índice Roga son llevados a cabo en condiciones un tanto diferentes a las encontradas en los procesos de coquización. Se ha pretendido distinguir estos ensayos con base en la velocidad de calentamiento, y se dice que representan las características de "aglutinación", según término consignado en la clasificación internacional.

Es pertinente discutir aquí la distinción que se hace a menudo entre "aglutinación" y "coquización". En general, se dice que las propiedades aglutinantes "reflejan el comportamiento de un carbón cuando es calentado rápidamente, como por ejemplo en los procesos de combustión", y que las propiedades coquizantes "reflejan el comportamiento de un carbón cuando es calentado lentamente como, por ejemplo, en los procesos de carbonización" (VAN KREVELEN, 1961). MOTT (1964) opina que esta distinción es muy cuestionable ya que se ha demostrado experimentalmente que tanto carbones pulverizados como en pedazos de una pulgada, al ser calentados lentamente (1 a 5°C/min) muestran un poder de hinchamiento medido con un dilatómetro Sheffield que se relaciona linealmente con el poder de hinchamiento de esos carbones calentados rápidamente, en el ensayo de hinchamiento en el crisol (norma ISO 501-1974). Quiere esto decir que este último ensayo podría ser eliminado de clasificación internacional, pues la dilatometría o el ensayo Gray-King darían indicio del llamado poder aglutinante de los carbones. Esta idea también sería aplicable al índice Roga.

Por último, ensayos efectuados en los laboratorios de INGEOMINAS sobre carbones de diferente índice de hinchamiento en el crisol, han demostrado que esta determinación adolece de ciertas deficiencias en su metodología, derivadas del elevado grado de empirismo de la prueba (URIBE, 1983).

Dejando ahora la anterior discusión, conviene mencionar algunas características de los carbones sub-bituminosos y los lignitos (denominados "carbones pardos" en

Europa). Estos carbones en general carecen de la propiedad de ablandar y pasar por estado plástico como los carbones bituminosos, aunque hay excepciones conocidas (ALPERN, 1979). Lo mismo sucede con las antracitas.

La excepcional cantidad de alquitrán que se desprende de los carbones de bajo rango los ha hecho atractivos desde el punto de vista de la carboquímica. Así, la clasificación internacional incluye los carbones de menos de 5700 kcal/kg en una tabla que los diferencia según el rendimiento de alquitrán y el contenido de humedad total (ver Fig. 14). Las antracitas únicamente son distinguidas en esa clasificación por su contenido de materias volátiles como criterio del rango.

El sistema internacional cubre los parámetros que más se destacan en el uso de las diferentes clases de carbones, y ha sido un buen intento de lograr un acuerdo entre las diferentes naciones productoras de carbón en lo que a clasificación se refiere. Sin embargo, y por razones que más adelante se destacan (Sección 3.3.), este sistema no constituye hoy en día el medio más adecuado de distinción de los carbones a la luz de las nuevas tecnologías y del progreso de los procesos convencionales de utilización.

3. ALGUNAS CLASIFICACIONES

Con base en los parámetros expuestos en el numeral anterior se han conformado numerosas clasificaciones, algunas de las cuales han sido estudiadas para la realización del presente trabajo.

Las clasificaciones de Gruner, Seyler, ASTM, National Coal Board, Internacional, y la de estructura bandeada de los carbones han sido discutidas en otro escrito (PEREZ, 1979) y por lo tanto no las describiremos de nuevo, limitándonos a reproducir la Internacional y la ASTM, pues se hace mención de ellas en algunos numerales de este estudio (Figuras 13, 14 y 15).

3.1. CLASIFICACIONES NACIONALES

A lo largo de las consideraciones sobre los diferentes parámetros utilizados, se efectuó una revisión de numerosas clasificaciones. Se presenta a continuación un brevísimo resumen de algunas de ellas.

Clasificación Francesa.- Utiliza el contenido de materia volátil y el índice de hinchamiento para clasificar los carbones en ocho grupos: antracitas, magros, 1/4 graso, 1/2 graso, graso de llama corta, graso propiamente dicho, de llama graso y de llama seco.

Clasificación Polaca.- 10 clases de carbón diferenciados de acuerdo con el contenido de materias volátiles, el índice Roga, porcentaje de dilatación y el poder calorífico.

Clasificación Alemana.- 7 clases de carbón con base en el porcentaje de materias volátiles y el poder aglomerante.

Clasificación Belga.- Carbones magros, 1/4 graso, 3/4 graso y graso con base en el porcentaje de materias volátiles.

Clasificación Inglesa.- Clasificación NCB que utiliza un código numérico para diferenciar sus carbones con base en el ensayo Gray-King y el contenido de materias volátiles.

Clasificación Norteamericana.- Clasificación ASTM con parámetros de rango: materia volátil y poder calorífico.

Clasificación Italiana.- 12 clases de carbón utilizando el índice de hinchamiento libre y el contenido de materia volátil.

Clasificación Holandesa.- Utiliza los mismos parámetros de la clasificación alemana separando los carbones en siete clases.

Clasificación Española .- 6 grupos estadísticos diferenciados con base en el índice de hinchamiento y la materia volátil.

FIG. 13: Clasificación internacional de carbones duros.

GRUPOS Determinados por las propiedades aglutinantes		NUMEROS CLAVE					SUB GRUPOS Determinados por las propiedades coquizantes					
No DE GRUPO	PARAMETROS ALTERNATIVOS DE GRUPO	La primera cifra del numero clave indica la clase del carbon, determinado por el contenido de materia volátil hasta 33% M.V.V por el parametro calorífico sobre 33% M.V. La segunda cifra indica el grupo del carbon, determinado por las propiedades aglutinantes. La tercera cifra indica el sub-grupo, determinado por las propiedades aglutinantes.					No. DE SUB-GRUPO	PARAMETROS ALTERNATIVOS DE SUB GRUPOS				
	Indice de hinchamiento en el crisol	435	535	635				Ensayo Dilatómetro	Ensayo Gray King			
3	> 4						5	> 140	> G 8			
	> 45	334	434	534	634		4	> 50-140	G 5 - G 8			
		333	433	533	633	733	3	> 0 - 50	G 1 - G 4			
2		332	432	532	632	732	832	≤ 0	E - G			
		a b										
	2 1/2 - 4	323	423	523	623	723	823	> 0 - 50	G 1 - G 4			
1								≤ 0	E - G			
	1 - 2	212	312	412	512	612	712	812	Unicamente contracción			
0												
	0 - 1/2	200	300	400	500	600	700	800	900			
PARAMETROS DE CLASE		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A titulo indicativo las siguientes clases tienen un contenido aproximado de materias volátiles de ---- CLASE: 6 33 - 41 % 7 33 - 44 % 8 35 - 50 % 9 42 - 50 %
MATERIAS VOLATILES(%)		> 37	> 36.5	> 36	> 35.5	> 35	> 34.5	> 34	> 33.5	> 33	> 33	
PODER CALORIFICO (h/c) cal. gr. - 30°C, 96%/humedad								> 7.750	> 7.200	> 6.100	> 5.700	

Clasificación Soviética.- 8 clases de carbón utilizando la humedad como parámetro de clasificación para los lignitos, la dilatometría para los coquizables, además de los parámetros convencionales de materia volátil y poder calorífico.

3.2. PROPUESTAS DE CLASIFICACION

Dentro de los proyectos de clasificación vale la pena destacar las propuestas de ALPERN, 1979 (Francia) y de MARSHALL, 1976 (Inglaterra) donde se recurre al poder reflector de la vitrinita como parámetro de clasificación.

La propuesta presentada por Alpern clasifica los combustibles fósiles sólidos, in-

cluyendo los esquistos carbonosos y bituminosos, teniendo como principio de clasificación tanto la comercialización como la posibilidad de calcular el potencial energético del planeta sobre una base uniforme comparable. Este proyecto está resumido en las Figuras 16 y 17 y como puede apreciarse establece las siguientes divisiones para los combustibles fósiles: a) Tres estados de rango: lignitoso, coquizable y antracitoso; b) Tres tipos petrográficos: fusinizado, vitrinizado y sapropelizado; y c) Tres estados de depurabilidad: carbón, mixto y esquisto. Esta clasificación permite además el paso a clases más particulares por la utilización de otros parámetros específicos.

NUMERO DE GRUPO	PARAMETRO DE GRUPO RENDIMIENTO EN ALQUITRAN % (SECO, LIBRE DE Cz)	NUMERO CODIGO					
		10	11	12	13	14	15
40	25	1040	1140	1240	1340	1440	1540
30	20 - 25	1030	1130	1230	1330	1430	1530
20	15 - 20	1020	1120	1220	1320	1420	1520
10	10 - 15	1010	1110	1210	1310	1410	1510
00	≤ 10	1000	1100	1200	1300	1400	1500
	Número de Clase	10	11	12	13	14	15
Parámetro de Clase	Humedad total % (Libre de cenizas)	≤20	>20 a 30	>30 a 40	>40 a 50	>50 a 60	>60 a 70

FIG. 14: Clasificación internacional de carbones pardos con un poder calorífico menor de 5.700 Kcal/Kgr (hlcz)

FIG. 15: Clasificación ASTM de carbones por rango.

CLASE	GRUPO	CARBONO		MATERIA		PODER CALORIFICO		CARACTER AGLOMERANTE
		FIJO % Slm.m	% <	VOLATIL % Slm.m	% ≤	Cal/gr hlmm	Cal/gr <	
		≥		>		≥		
	1-Meta-Antracita	98	—	—	2	—	—	No. Aglomerante
	2-Antracita	92	98	2	8	—	—	
	3-Semi-Antracita a)	86	92	8	14	—	—	
	1-Bituminoso Bajo Volátil	78	86	14	2			Comúnmente Aglomerante Aglomerante
	2-Bituminoso Medio Volátil	69	78	22	31			
	3-Bituminoso Alto Volátil A		69	31		7780 ^{b)}		
	4-Bituminoso Alto Volátil B					7220	7780	
	5-Bituminoso Alto Volátil C					6380 5830	7220 6380	
	1-Sub-Bituminoso A					5830	6380	No. Aglomerante
	2-Sub-Bituminoso B					5280	5830	
	3-Sub-Bituminoso C					4610	5280	
	1-Lignito A					3500	4610	No. Aglomerante
	2-Lignito B						3500	

Slmm : Base seca libre de materia mineral.

hlmm Base húmeda libre de materia mineral. Se refiere a la humedad que contiene el carbón como inherente natural, pero no incluye agua visible sobre la superficie del carbón.

Notas Esta clasificación no incluye unos pocos carbones, especialmente variedades no bandeadas, las cuales tienen propiedades químicas y físicas no usuales que caen dentro de los límites de carbono fijo o poder calorífico de los rangos bituminoso alto en volátiles y sub-bituminoso. Contiene menos de 48% de carbono fijo (Slmm).

a) Si aglomera clasifica en el grupo de bajo volátil de la clase bituminoso.

b) Carbones en carbono fijo $\geq 69\%$ se clasifican de acuerdo a este sin tener en cuenta el poder calorífico.

c) Puede haber variedades no aglomerantes.

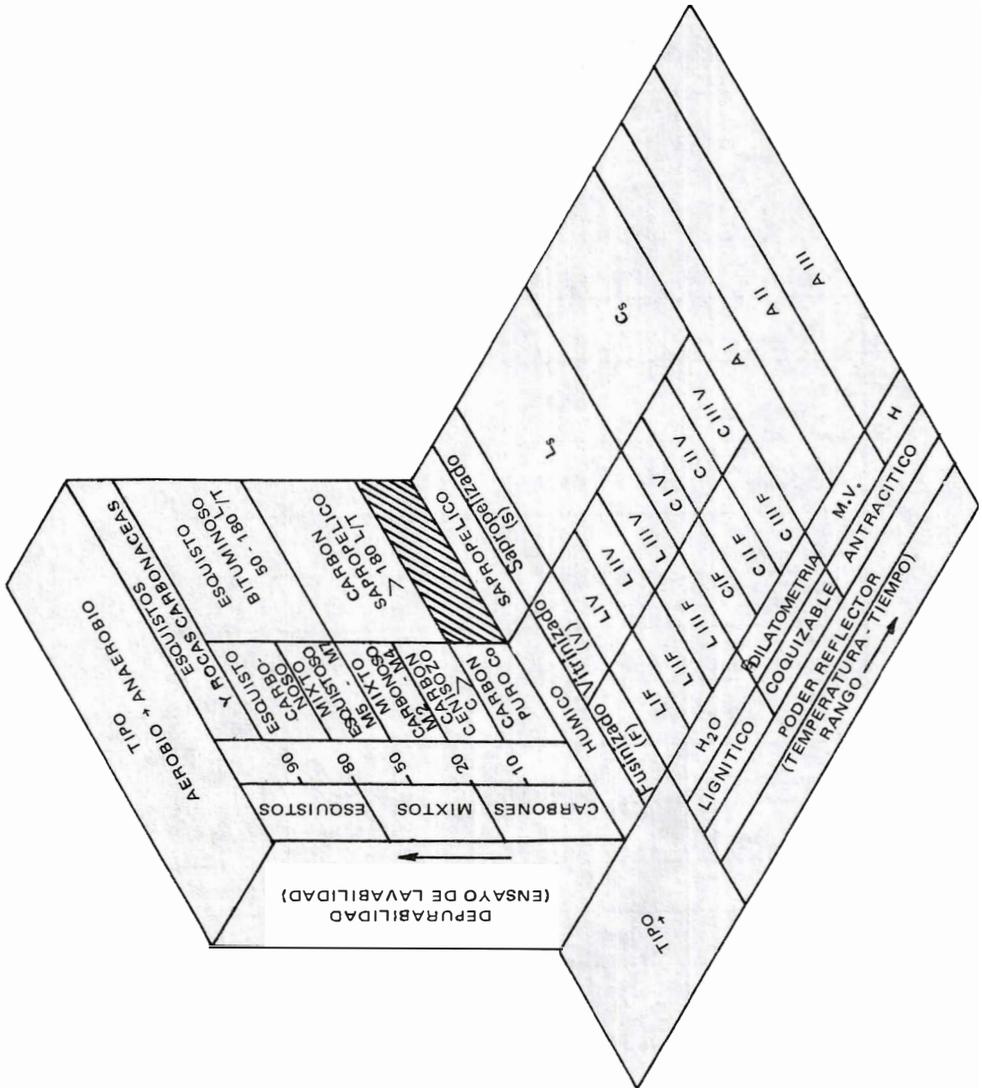


FIG. 16: Clasificación de combustibles fósiles sólidos (ALPERN, 1979).

La propuesta de Marshall es mucho más específica, pues es aplicable a los carbones coquizables, estableciendo 167 categorías de acuerdo a la combinación del poder reflector de la vitrinita con los valores de dilatación máxima. Esta clasificación se muestra en la Figura 18.

Otra de las propuestas que han sido estudiadas es la presentada por EREMIN y KOSINA, 1970 (URSS). Este proyecto de clasificación propone la utilización del contenido de inertinita y la reflectancia media promedio de la vitrinita como parámetros de diferenciación; incluye además dos parámetros tecnológicos como el índice Roga y la amplitud de la zona plástica, valores ampliamente utilizados en la URSS como ensayos relacionados a la coquización.

BENETT y TAYLOR (1970) proponen una clasificación para los carbones australianos, basados igualmente en parámetros petrográficos: el análisis de microlitotipos (vitrinita más clarita más 0,5 intermediarios) y la determinación de la reflectancia máxima media de la vitrinita como medida del rango. Estos dos parámetros son colocados como ejes y establecen una serie de correlaciones en el plano así definido (por ejemplo con el índice de hinchamiento, materia volátil y poder calorífico).

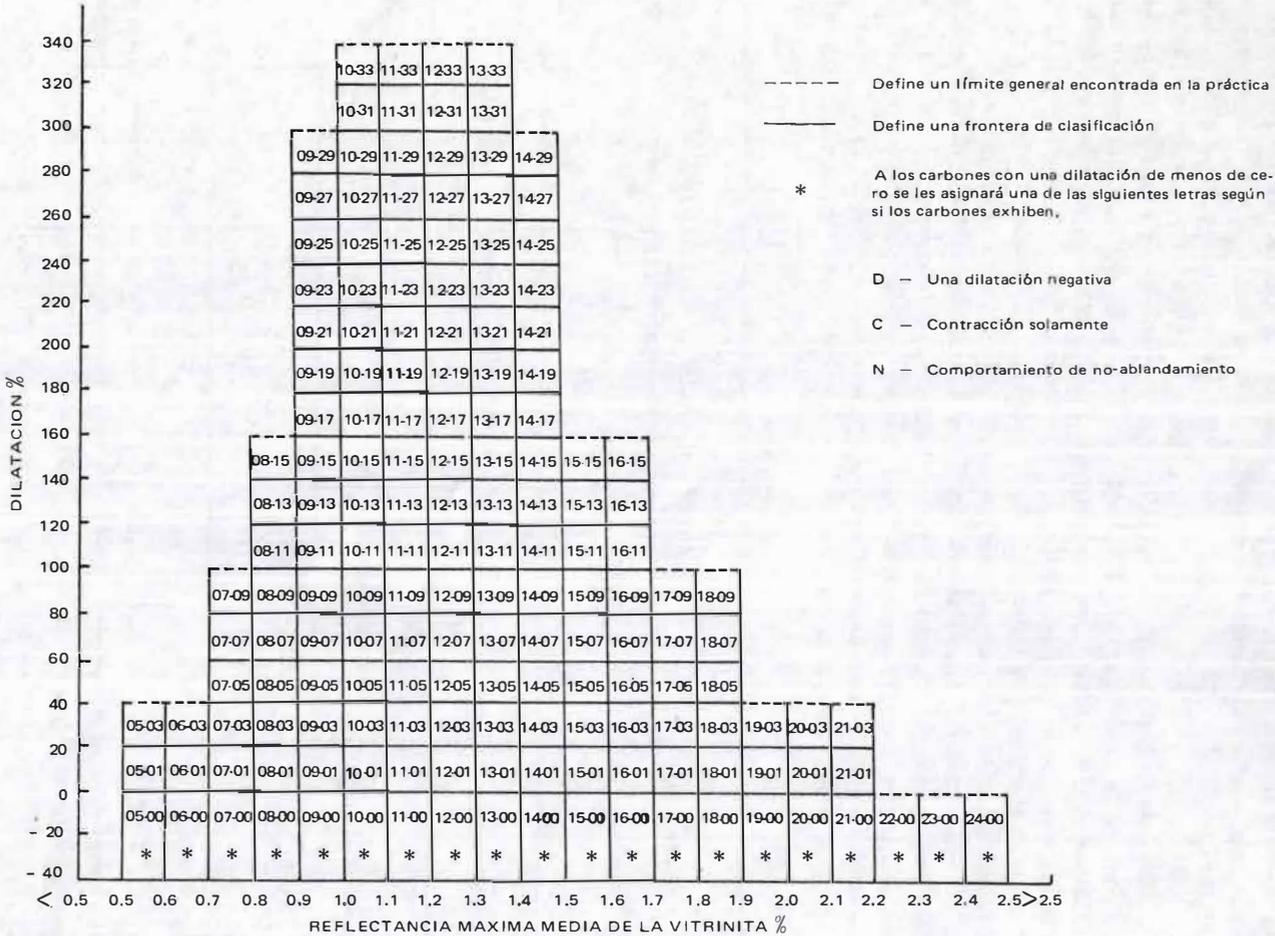
Igualmente, para clasificar los carbones australianos DAVIS (1970) propone la utilización de parámetros similares a los empleados en la clasificación Internacional (materia volátil o poder calorífico, índice de hinchamiento y tipo de coque Gray-King)

PARAMETRO GENERAL	REFLECTANCIA DE GELINITA-COLINITA (R % ACEITE)												
	0,2 0,3 0,4			0,5 1,0 1,5			2,5 3,0 5,0 8,0						
ESTADOS	LIGNITO			CARBON COQUIZABLE (Hulla)			ANTRACITA						
PARAMETROS ESPECIFICOS	Agua de saturación			Dilatación			Materia Volátil	Hidrógeno					
	75	35	25	12	<100	>100	100	-40	< 40	8	5	3	1
SUB-ESTADOS	L I	L II	L III	C I	C II	C III	A I	A II	A III				
	Hipo L	Meso L	Meta L	Hipo C	Meso C	Meta C	Hipo A	Meso A	Meta A				
EXPRESION NUMERICA	H ₂ O x 1: L ₇₅ - L ₁₂ PC x 1/100: L ₂₀ - L ₅₇			Dilatación x 1/10: C ₀ -C ₃₄ Reflectancia x 10: C ₅ -C ₂₄			VM x 1: A ₈ -A ₃ Refl. x 10: A ₂₅ -A ₅₀						

* Los datos de dilatación se dan para el Tipo Húmico Vitrinisado
 ** Un poder calorífico de 5700 cal/g. no es un máximo para lignitos.

FIG. 17: Parámetros para determinación de rango (ALPERN, 1979).

FIG. 18: Sistema de clasificación de carbones.



e incluye un cuarto dígito en la clasificación que expresaría el contenido de cenizas del carbón clasificado.

3.3. DESVENTAJAS DE LA CLASIFICACION INTERNACIONAL

La principal crítica que se le hace a la Clasificación Internacional es que solamente es aplicable a carbones de composición maceral homogénea con bajo contenido de inertinita (un grupo maceral derivado de restos vegetales que han sufrido descomposición primaria, como en el caso de fuegos forestales durante el proceso de carbonificación).

Los parámetros en los cuales se basa esta clasificación no explican las causas de la habilidad del carbón para producir coque apropiado para uso metalúrgico y por lo tanto la efectiva utilización de estos carbones de composición maceral variable no puede definirse. A esto se añade que los parámetros de carbonificación (rango) usados en la Clasificación Internacional, esto es, materia volátil y poder calorífico, son dependientes de la composición maceral y por lo tanto no pueden ser usados para carbones de composición maceral variable. Por otra parte, si lo que se analiza es una mezcla de carbones, estos parámetros no dan idea de la participación de cada componente de la mezcla.

En general los carbones colombianos muestran relativamente altos contenidos de inertinita (más del 25%) especialmente en zonas carboníferas de la Cordillera Oriental (JACOB, 1976; MOJICA et al., 1978; MEJIA y VERGARA, 1981). Ya ALPERN (1979) en su propuesta de clasificación de combustibles fósiles sólidos ha destacado las grandes diferencias que pueden encontrarse entre carbones de alto y bajo contenido de inertinita. La Figura 19 ilustra un ejemplo de esta situación: un carbón europeo (con 75% vitrinita - 20% exinita - 5% inertinita) tiene un contenido de materia volátil de 40%, mientras que un carbón gondwaniano (con 15% vitrinita - 5% exinita - 80% inertinita) tiene un contenido de materia volátil de sólo 20%, aunque su rango es exactamente el mismo (reflectancia: 1%).

A pesar de que el caso citado es extremo, bien puede acomodarse al ejemplo.

Otra crítica que se le hace a la clasificación Internacional (ALPERN, 1979) es que tanto la determinación de las propiedades de aglutinación como de las propiedades de coquización, presentan métodos alternativos de selección. Esto puede conducir a resultados confusos según el método aplicado. Más aún, VAN KREVELEN y HUNTJENS (1958) hicieron un estudio sistemático de la interrelación de los cuatro parámetros que definen las propiedades mencionadas, y concluyeron que el índice de hinchamiento y el índice de Roga no son parámetros alternativos para todos los carbones.

Alpern estima que un buen método de clasificación debería jerarquizar los diferentes parámetros aplicados en lugar de ponerlos en competencia.

Por otra parte, los términos "rango" y "tipo" son confundidos en la clasificación Internacional. En la época en que ésta fue sugerida (1956), ya se hacía la distinción de aquellas características de los carbones que no necesariamente estaban ligadas al rango y que determinaban ciertos tipos de carbón. Dado que los carbones usados localmente eran de tipo más constante, este término era relativamente de escasa significación en la industria, y el rango definía las diferentes clases de carbones con bastante aproximación con base en el contenido de materias volátiles o el poder calorífico.

Pero la situación ha cambiado. El creciente intercambio comercial de carbones de composición petrográfica y origen diferentes a los acostumbrados por los países productores de carbón, ha hecho necesario considerar el tipo como factor importantísimo en los procesos industriales; el contenido de materias volátiles o el poder calorífico no son ya suficientes ni apropiados para distinguir todas las clases de carbón, pues estos parámetros pueden ser altamente afectados por la composición petrográfica variable, como se indicó anteriormente.

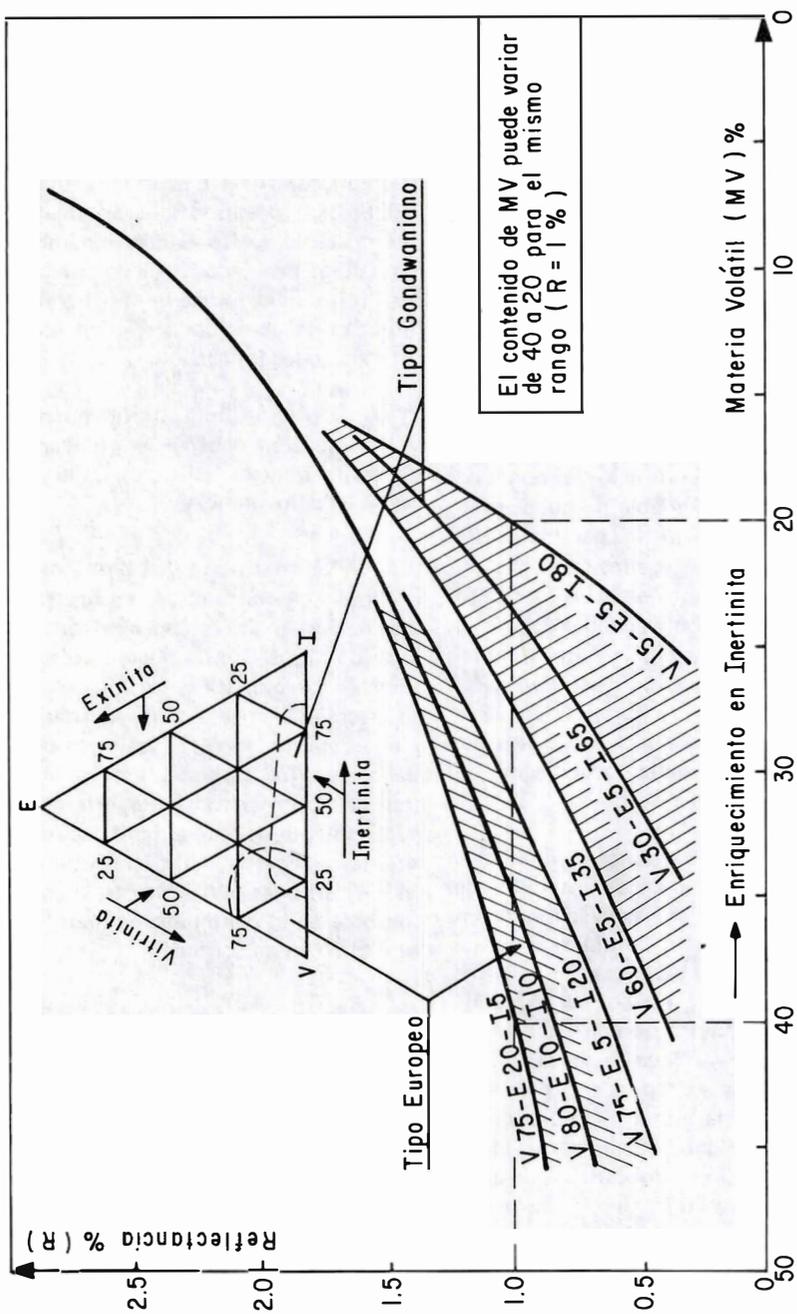


FIG. 19: Influencia de la composición maceral sobre la relación entre reflectancia y materia volátil. (ALPERN, 1979).

Por último, la diversificación de la utilización del carbón en procesos tales como la gasificación, hace necesario considerar nuevos criterios para la clasificación de este material. El tipo de carbón, relativamente descuidado en la Clasificación Internacional, adquiere ahora un justo valor en la evaluación de estos nuevos procesos y de las técnicas tradicionales.

4. ESTADO ACTUAL DE LA CLASIFICACION DE CARBONES EN COLOMBIA

La clasificación de carbones en Colombia ha tenido un proceso lento, posiblemente debido al uso indiscriminado que se hace de ellos como resultado de la ausencia de una política racional de utilización y de las dificultades del mercadeo. En el escrito titulado "Clasificación de los Carbones en Colombia" (URIBE, 1978) se presentaba la propuesta de acoger y utilizar a nivel nacional el sistema de la Clasificación Internacional de Carbones Duros por Tipo. (Fig. 13). Allí también se indicaban las ventajas y desventajas de este sistema con respecto a la Clasificación por Rango de la American Standard for Testing Materials (también conocida como la Clasificación ASTM; ver Fig. 15). Hoy en día pueden presentarse algunos ejemplos de su aplicación en zonas carboníferas Colombianas; BLANCO et al (1977) utilizaron la Clasificación Internacional en la caracterización de los carbones del flanco occidental del Sinclinal de Checua-Lenguazaque (Cundinamarca). El estudio detallado de la zona carbonífera de El Cerrejón por parte de la empresa Colombiana de Carbones S.A. (CARBOCOL) y la compañía americana International Resources (Colombia) Co. (INTERCOR) permite clasificar el carbón de esa zona con los números códigos 611 y 711 del sistema internacional. Sin embargo, poco es lo que se puede agregar a estos ejemplos, que esté respaldado por una suficiente y veraz información.

Los trabajos del Instituto Nacional de Investigaciones Geológico-Mineras (INGEOMINAS) en exploración y caracteri-

zación de carbones condujeron a la elaboración del escrito titulado "Zonas Carboníferas de Colombia" (DURAN et al., 1979) en el cual se incluyó un mapa que distinguía los principales yacimientos descubiertos hasta el presente con su correspondiente número código de clasificación. Sin embargo, este número señalaba con precisión solamente una cifra (el número de clase), sin definir las propiedades aglutinantes y coquizantes de la casi totalidad de los carbones, que fijan las dos cifras restantes del número código. Esto obedeció sencillamente a la falta de información que en ese momento se tenía sobre los carbones colombianos. Tampoco se hizo mención de la aplicación del cuadro anexo de la Clasificación Internacional (ver Fig. 14) referente a carbones "pardos" (subbituminosos y ligníticos) en carbones colombianos. La verdad es que no se ha hecho ningún estudio al respecto. De este trabajo, sin embargo, se desprenden varias conclusiones. Entre ellas, que tenemos una gran variedad de carbones cubriendo toda la escala de metamorfismo desde el lignito a la antracita, y también que muy poco conocemos de ellos.

La reunión de expertos de varias instituciones y empresas industriales entre las cuales se pueden citar CARBOCOL, INGEOMINAS, el Instituto de Investigaciones Tecnológicas (IIT), PROEXPO, ECOPETROL, Acerías Paz de Río S.A., Instituto de Fomento Industrial (IFI), ESSO, PROPAL S.A. y Cementos El Cairo, condujo a que el Instituto Colombiano de Normas Técnicas (ICONTEC) expidiera la Norma No. 1676 (24 septiembre 1981) sobre Clasificación de Carbones, acogiendo el sistema internacional como base. Las conferencias, seminarios y encuentros de intercambio tecnológico sobre investigación del carbón, que han tenido como principal patrocinador al Fondo Colombiano de Investigaciones Científicas y Proyectos Especiales "Francisco José de Caldas" (COLCIENCIAS), han permitido dar a conocer este sistema, y si bien es cierto que esta no es una información que la generalidad del público colombiano posee, al menos puede decirse que los más interesados en el desarrollo de la tecnología del carbón sí están enterados.

En la actualidad, el fortalecimiento de la empresa estatal CARBOCOL, la adquisición de más y mejor equipo, la capacitación del personal de INGEOMINAS, y el interés de la industria y de las universidades por el tema del carbón, han contribuido a la formulación de planes serios de exploración, caracterización e investigación de este recurso natural. Se espera que en el curso de los próximos cinco años, el conocimiento de nuestras reservas carboníferas más importantes y con mejores posibilidades de desarrollo sea llevado a un alto nivel, de tal forma que su selección esté basada en un abundante banco de datos confiables. La clasificación de los carbones colombianos deberá entonces incluir aquellos parámetros que mejor los distinguen y que tengan amplia aceptación mundial para facilitar su comercialización y utilización. Este escrito pretende ser un aporte para el logro de este objetivo.

5. PROPUESTA DE CLASIFICACION

En este capítulo se presentan los principios que fundamentan la proposición del nuevo sistema de clasificación de carbones, se exponen y discuten en detalle los parámetros que conforman este sistema, y se dan ejemplos de su aplicación.

5.1. PRINCIPIOS DE LA CLASIFICACION PROPUESTA

De los anteriores capítulos se desprende que una nueva clasificación de carbones debería estar basada en los siguientes principios:

- 1) La clasificación debe incluir especialmente un parámetro que indique adecuadamente el **Rango** de los carbones, y que no sea influenciado por la composición maceral variable.
- 2) Debe expresar en una forma apropiada la composición maceral que define el **Tipo** de carbón.
- 3) Debe aplicar el mínimo número posible de parámetros tecnológicos y químicos.

- 4) Debe poseer, en lo posible correspondencia con la Clasificación Internacional.
- 5) Debe usar un sistema codificado, con simplicidad de expresión.
- 6) Debe permitir la distinción entre un carbón individual y una mezcla de carbones.
- 7) Debe incluir un parámetro que tenga una estrecha correspondencia con las propiedades del coque.
- 8) Los parámetros incluidos deben ser de reconocida aceptación en los laboratorios de carbón a nivel mundial y de fácil e inmediata adaptación especialmente en Colombia.
- 9) Estos parámetros deben dar información directamente aplicable a los diferentes procesos de utilización de los carbones.

5.2. PARAMETROS DE CLASIFICACION PROPUESTOS

Un esquema de la clasificación propuesta se muestra en la Figura 20. Básicamente, un carbón clasificado según este sistema se representará por medio de un número código de cuatro cifras, así:

La primera cifra indica el **Rango** del carbón, y tiene como parámetro la **Reflectancia Máxima Media de la Vitrinita** (Gelinita Colinita) (\bar{R}_{max}). Su determinación es independiente de la composición maceral, y es actualmente llevada a cabo en la mayoría de las instituciones y empresas involucradas en la caracterización de carbones en todo el mundo (STACH, 1982). El Cuadro I presenta los números de rango que definirán esta primera cifra y que corresponden a intervalos de valores de reflectancia dentro de la escala de carbonificación desde el lignito a la antracita.

PARAMETROS DE TIPO (CUADRO II)										
ANALISIS DE GRUPOS MACERALES										
	0 a 9	0 a 8	0 a 7	0 a 6	0 a 5	0 a 4	0 a 3	0 a 2	0 a 1	0
CONTENIDO DE EXINITA (E)										
CONTENIDO DE VITRINITA (V)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1										
2										
3										
4								4704		
5					5414					
6	6085						6604			6905
7								7701		7901
8										
9										
0										
PARAMETRO DE RANGO (CUADRO I)										
% RMAX										
Reflectancia máxima media de vitrinita										
DILATOMETRIA (P) % MAXIMA DILATACION (d)										
MATERIA VOLATIL (MV)										
0 a 2										
0 a 5										
0 a 4										
PODER CALORIFICO (PC) Cal./g. - hiez										
PARAMETRO DE CUALIFICACION (CUADRO III)										

CUADRO III
NUMERO DE CUALIFICACION

PARA CARBONES ANTRACITICOS		PARA CARBONES SEMI-ANTRACITICOS, BITUMINOSOS		PARA CARBONES SUB-BITUMINOSOS Y LIGNITICOS	
No.	% MV (siez)	No.	% d	No.	P.C Cal/g (hiez)
0	≤ 3	0	No se ablanda	0	> 5700
1	> 3-5	1	Sólo contracción	1	> 5200 - 5700
2	> 5	2	≤ 0	2	> 4500 - 5200
		3	> 0-50	3	> 3400 - 4500
		4	> 50-140	4	≤ 3400
		5	> 140		

CUADRO II
NUMEROS DE TIPO

V	% VOL.	E	% VOL.
0	≤ 10	9	> 90
1	> 10-20	8	> 80-90
2	> 20-30	7	> 70-80
3	> 30-40	6	> 60-70
4	> 40-50	5	> 50-60
5	> 50-60	4	> 40-50
6	> 60-70	3	> 30-40
7	> 70-80	2	> 20-30
8	> 80-90	1	> 10-20
9	> 90	0	≤ 10

CUADRO I
DENOMINACION DEL CARBON

No. DE RANGO	RMAX %	DENOMINACION DEL CARBON
1	> 2.8	Antracítico
2	> 2.2-2.8	Semi-Antracítico
3	> 1.7-2.2	Bituminoso Bajo Volátil
4	> 1.4-1.7	Bituminoso Medio Volátil A
5	> 1.1-1.4	Bituminoso Medio Volátil B
6	> 0.8-1.1	Bituminoso Alto Volátil A
7	> 0.7-0.8	Bituminoso Alto Volátil B
8	> 0.5-0.7	Bituminoso Alto Volátil C
9	> 0.4-0.5	Sub-Bituminoso
0	> 0.3-0.4	Lignítico

FIG. 20: Clasificación de carbones.

La segunda y tercera cifras indican el **Tipo** de carbón, definido por la composición maceral y determinado con los contenidos de vitrinita (o huminita) que se expresan con la segunda cifra y de exinita (o liptinita) que se expresan con la tercera cifra. Esta determinación, llamada **Análisis de Grupos Macerales**, se hace por medio de un microscopio de luz reflejada y es también procedimiento rutinario dentro de los estudios petrológicos del carbón (STACH, 1982). Durante el curso de esta prueba se pueden observar distintas condiciones de la muestra como por ejemplo, el grado de oxidación y la asociación de los macerales entre sí y con materia mineral.

El Cuadro II presenta los números de tipo para los contenidos de vitrinita y exinita. Los porcentajes están dados "por volumen" y en base libre de materia mineral.

La cuarta cifra del número código está definida por los aquí llamados **Parámetros de Cualificación**. Uno de estos parámetros, el contenido de **Materias Volátiles**, cualifica las antracitas. Los resultados se expresan en base seca, libre de cenizas (s. l. cz). Un segundo parámetro, la **Dilatación Máxima**, cualifica las semiantracitas y los carbones bituminosos. Por último, el **Poder Calorífico**, expresado como calorías/gramo en base húmeda, libre de cenizas (h. l. cz), que cualifica los carbones sub-bituminosos y los lignitos. El Cuadro III presenta los números de cualificación dispuestos para cada uno de los parámetros nombrados.

5.2.1. CRITERIOS DE SELECCION DE LOS PARAMETROS PROPUESTOS Y ESTABLECIMIENTO DE CATEGORIAS

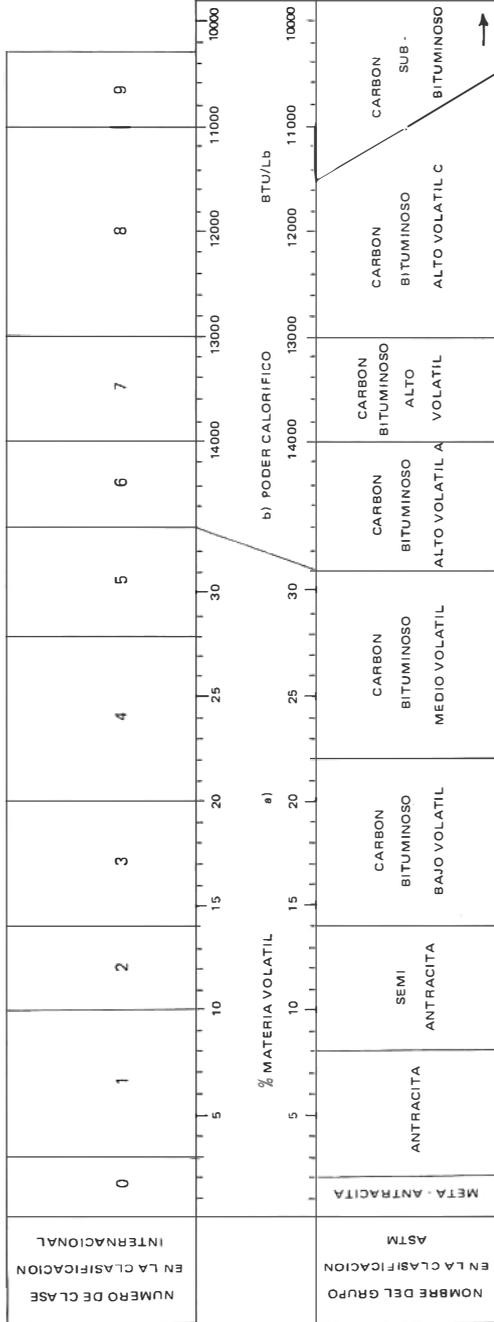
La escogencia de los parámetros que determinan el número código en la clasificac-

ión propuesta, fue el resultado de un estudio detallado y cuidadoso. A continuación se presentan los criterios y consideraciones tenidas en cuenta para seleccionar los parámetros y para establecer las distintas categorías en que fueron divididos.

5.2.1.1. Primera cifra: Rango.- Diez números de rango, como se observa en el Cuadro I, fueron dispuestos para determinar la primera cifra del número código. Estos números de rango corresponden a intervalos de valores de reflectancia máxima dentro de la escala de carbonificación. Estos intervalos han sido definidos siguiendo las sugerencias de varios autores, y estableciendo su correspondencia con la terminología americana de la clasificación ASTM por rango (ver Fig. 15). Esta terminología es ampliamente conocida en todo el mundo, aunque varios países siguen empleando sus denominaciones tradicionales para los carbones de diferente rango. En Colombia son ya de uso común los términos indicados por la clasificación ASTM, y por tal motivo se ha considerado adecuado seguir empleándolos en la propuesta de clasificación.

Se ha hecho un análisis de la equivalencia de la terminología americana del rango de carbones, la cual corresponde a valores de materia volátil (o carbono fijo) y poder calorífico, con la clasificación internacional y con los intervalos de reflectancia dados por diferentes autores.

Por una parte, este análisis ha revelado que no hay una equivalencia estricta de los números de clase de la clasificación internacional con los nombres de grupo de la clasificación ASTM, como se observa en la Figura 21. Las principales diferencias se encuentran en los carbones bituminosos medios en volátiles, los cuales corresponden aproximadamente a los números de clase 4 y 5 de la clasificación internacional. Asimismo, la clase 9 de esta clasificación sólo abarca los denominados carbones sub-bituminosos A en la clasificación ASTM. En los carbones sub-bituminosos B y C y en los ligni-



a) En la clasificación internacional los parámetros son en base libre de cenizas, en la ASTM en base libre de materia mineral.
 b) Para la clase 6 y el carbón bituminoso alto volátil A no se fija límite superior.

FIG. 21: Comparación entre la clasificación internacional y la ASTM.

tos (no mostrados en la Figura 21) el sistema internacional usa el parámetro de humedad total, mientras que la clasificación ASTM usa el poder calorífico. Como nota al margen se debe mencionar, sin embargo, que existe una buena correlación entre humedad total y poder calorífico para carbones de bajo rango.

Por otra parte, la correlación entre materias volátiles (MV) y reflectancia (PRV) varía de autor a autor, dentro de ciertos límites. Debe también tenerse en cuenta que la expresión de los resultados de reflectancia puede hacerse como reflectancia media (es decir, sin rotación de la muestra en el microscopio) o reflectancia máxima promedio (ver Sección 2.1.3.2.).

La comparación de las diferentes versiones de la correlación MV-PRV ha conducido a los autores de este escrito a seleccionar aquella de TEICHMULLER y BARTESTEIN (1979) para carbones con reflectancia mayor de 1.4% (ver Fig. 22). Cuatro números de rango cubren respectivamente a las antracitas (\bar{R}_{\max} : > 2.8%), semiantracitas (\bar{R}_{\max} : > 2.22-8.8%), carbones bituminosos bajos en volátiles (\bar{R}_{\max} : > 1.7-2.2%), y los que aquí se han denominado "carbones bituminosos medios en volátiles A" (\bar{R}_{\max} : > 1.4-1.7%), para distinguirlos de aquellos con un rango \bar{R}_{\max} : > 1.1-1.4%, que se han denominado "carbones bituminosos medios en volátiles B" (ver Cuadro I). Esta subdivisión encuentra una correspondencia cercana con las clases 4 y 5 de la clasificación internacional. Aproximadamente en el valor 1.4% \bar{R}_{\max} se detecta un "salto" en el proceso de carbonificación (STACH, 1982) caracterizado por una marcada reducción de oxígeno y por el comienzo de desprendimiento de metano. Hasta este punto se extiende el llamado "rango de bituminificación", es decir, aquella etapa en el proceso de carbonificación en que se forman sustancias bituminosas, parecidas al petróleo, a partir de la exinita y la vitrinita, y que comienza en aproximadamente 0.5% de reflectancia. La bituminificación tiene un considerable efecto sobre ciertas propiedades del carbón, especialmente en su comportamiento durante la coquización.

Así, en el intervalo 1.1-1.4% \bar{R}_{\max} se registran generalmente valores máximos de dilatación (VAN KREVELEN, 1961; MARSHALL, 1976; URIBE, 1982).

Para el rango de los carbones con máxima reflectancia igual o inferior al 1.4% se ha usado la Figura 23, reproducida del texto Coal Petrology (STACH, 1982).

Nótese que los carbones sub-bituminosos podrían tener una reflectancia de hasta 0.65% según esta tabla, al hacerse la equivalencia con la clasificación ASTM. Según este sistema, el carbón es sub-bituminoso sino presenta aglomeración al realizarse la prueba de materias volátiles; si aglomera, el carbón se considera bituminoso alto volátil C.

Se ha preferido, sin embargo, eliminar esta ambigüedad en la clasificación propuesta, y la distinción se hace con base en los límites de reflectancia expuestos en el Cuadro I (Fig. 20). Los carbones sub-bituminosos, entonces, tendrían un rango 0.4-0.5% de reflectancia máxima.

A los lignitos se les ha asignado un rango de 0.3-0.4% \bar{R}_{\max} . ALPERN (1979) ha considerado en su propuesta de clasificación la iniciación del estado lignítico en 0.2% \bar{R}_{\max} . En la Figura 23 este valor corresponde a la turba, la cual no ha sido incluida dentro del concepto carbón para los fines de la clasificación sugerida en el presente escrito. Se comprenderá que es difícil fijar una frontera precisa a este nivel de evolución, ya que la transición de turba a lignito tiene lugar muy gradualmente.

La equivalencia del contenido de materia volátil con los intervalos de reflectancia máxima definidos en el Cuadro I (Fig. 20), puede tomarse de la Tabla 4, la cual se ha establecido con base en las figuras 6, 22 y 23. Se advierte que para los carbones con reflectancia máxima inferior a 1.4% se ha usado la Figura 23, asumiendo la reflectancia máxima aproximadamente igual a la reflectancia media, como efectivamente se encuentra en la práctica.

FIG. 22: Clasificación de carbones bituminosos de alto rango y antracitas con base en diferentes parámetros (TEICHMULLER, M. y R. y BARTENSTEIN, 1979).

RANGO DEL CARBON	REFLECTANCIA			%EN VITRITAS (SIC)			APLICABILIDAD DE VARIOS PARAMETROS				
	R MAX %	Rm %	Rmin %	C	H	MATE-RIA VO-LATIL					
CARBON BITUMINOSO MEDIO VOLATIL	1.4	1.3	0.9-14	87	5.5	28	CARBONO	HIDROGENO	MATERIA VOLATIL	REFLECTANCIA DE LA VITRINITA RMAX	Rm
	1.6	1.5									
CARBON BITUMINOSO BAJO VOLATIL	1.8	1.65		89		22					
	2.0	1.85	1.1-1.8			19					
SEMI-ANTRACITA	2.2	2.0				14					
	2.4	2.2				12					
	2.6	2.35				10					
	2.8	2.5	1.5-2.4	91	4	8					
ANTRACITA	3.0	2.7									
	3.2	2.9				6					
	3.4	3.0									
	3.6	3.2				5					
	3.8	3.35									
	4.0	3.5	1.8-3.3	93.5	2.5	4					
	5.0	4.35	1.7-4.1			3					
	6.0	5.1	1.0-4.5	95.0	1.5	2					
META-ANTRACITA	5 - 10			96.5	0.8	1,25					
	>10-18			100	0	0					
GRAFITO											

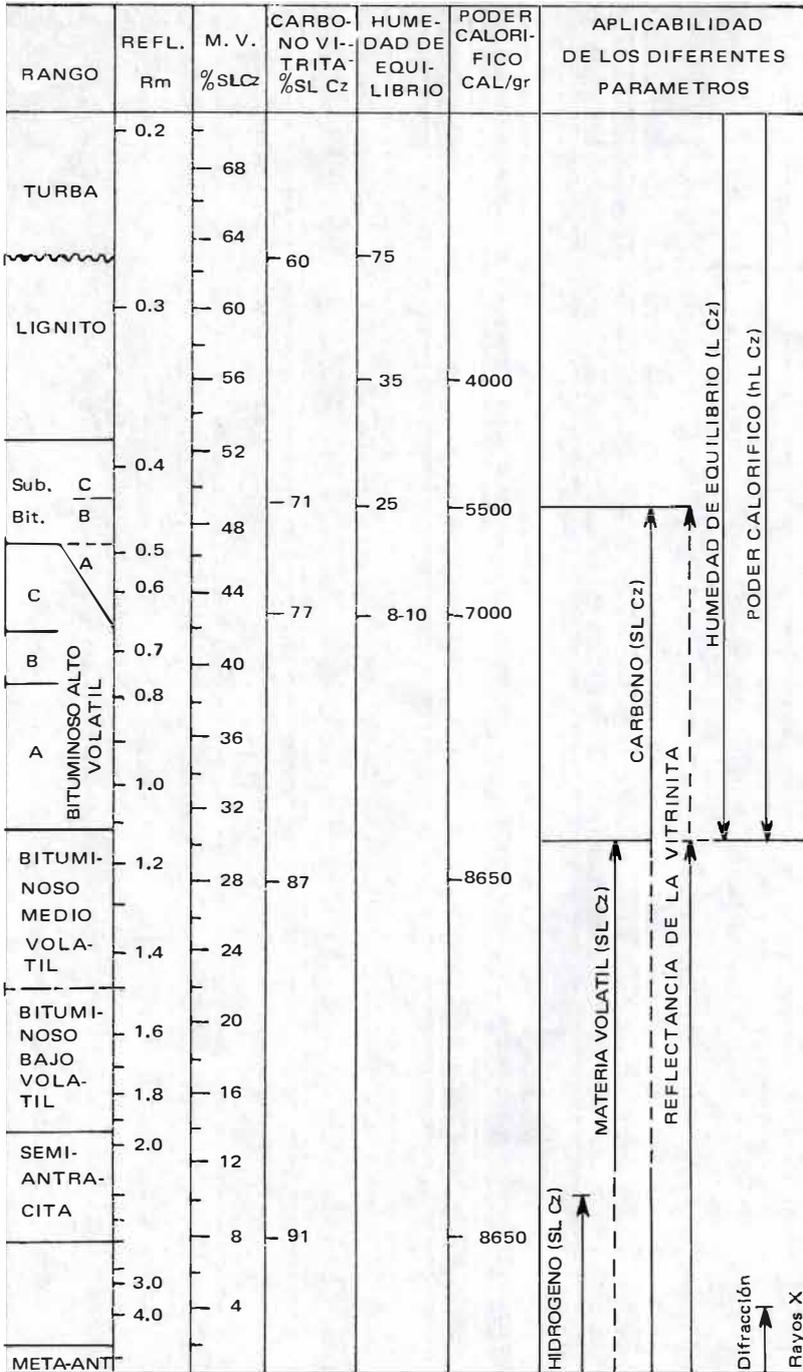


FIG. 23: Estados de carbonificación de acuerdo a la clasificación americana (ASTM).

TABLA 4: EQUIVALENCIA APROXIMADA DE REFLECTANCIA MAXIMA PROMEDIO, REFLECTANCIA MEDIA Y MATERIA VOLATIL

Reflectancia Máxima (\bar{R}_{max})	Reflectancia Media (R_m)	Materia Volátil (MV)(s.l.cz.)*
2.8	2.5	8
2.2	2.0	14
1.7	1.6	22
1.4	1.3	28
1.1	1.1	31
0.8	0.8	38
0.7	0.7	41
0.6	0.6	44
0.5	0.5	46
0.4	0.4	51
0.3	0.3	60

* En carbón seco, libre de cenizas.

5.2.1.2. Segunda y tercera cifras: Tipo.- El

Tipo de carbón estará representado en el número código por la segunda y la tercera cifras, que indican los contenidos de vitrinita y exinita, respectivamente. Es frecuente encontrar en la literatura que el tipo de carbón se represente por el sólo contenido de inertinita, determinado por el análisis de macerales. Esto se hace con el criterio de distinción de los macerales por su comportamiento durante los procesos de carbonización en dos grupos: macerales "reactivos" (vitrinita y exinita) y macerales "inertes" (inertinita).

Se introduce aquí el tema de la "reactividad" de los macerales en procesos tecnológicos. Al respecto puede decirse que tanto la vitrinita como la exinita se comportan de una manera similar (aunque no igual) durante la carbonización y, dependiendo del rango del carbón, pasan por un estado "plástico" transitorio hasta que resolidifican y dan lugar a la formación de coque. Sin embargo, también se ha comprobado (VAN KREVELEN, 1961) que la exinita tiene una

mayor fluidez que la vitrinita de un mismo carbón durante el calentamiento, desprende una mayor cantidad de materias volátiles (STACH, 1982, ver Fig. 24) y produce un coque muy poroso y de calidad inferior al obtenido con la vitrinita.

Es entonces interesante saber la participación de cada uno de estos macerales reactivos en determinado proceso. Por otra parte, también interesa conocer la cantidad de material que no pasa por ese estado plástico y que, por el contrario, permanece sin cambio significativo durante la carbonización. Este material que se denomina "inerte" lo constituyen los macerales del grupo de la inertinita y la materia mineral.

El análisis de grupos macerales permite definir la cantidad de constituyentes presentes en el carbón y así calcular sus porciones reactiva e inerte. Esta y muchas otras investigaciones pueden emprenderse con ayuda de las técnicas microscópicas. Para efectos de clasificación, sin embargo, basta la determinación de poder reflector de la vitrinita y de la cantidad de cada grupo maceral.

También se ha considerado útil la información del número código acerca de los contenidos de vitrinita y exinita con relación a procesos como la licuefacción y la gasificación.

Estos macerales son altamente apropiados para licuefacción, aunque macerales como la fusinita, semifusinita y micrinita (estos pertenecientes al grupo de la inertinita) contribuyen muy poco en el proceso (DAVIS et al., 1976).

De otro lado, la gasificación de un carbón puede llevarse hasta las cercanías del 100%, pero la economía de este proceso se verá disminuida por las dificultades de conversión de la inertinita.

Igualmente, en los procesos de combustión es interesante saber el grado de participación de los macerales. Así, en las centrales térmicas que utilizan finos de carbón,

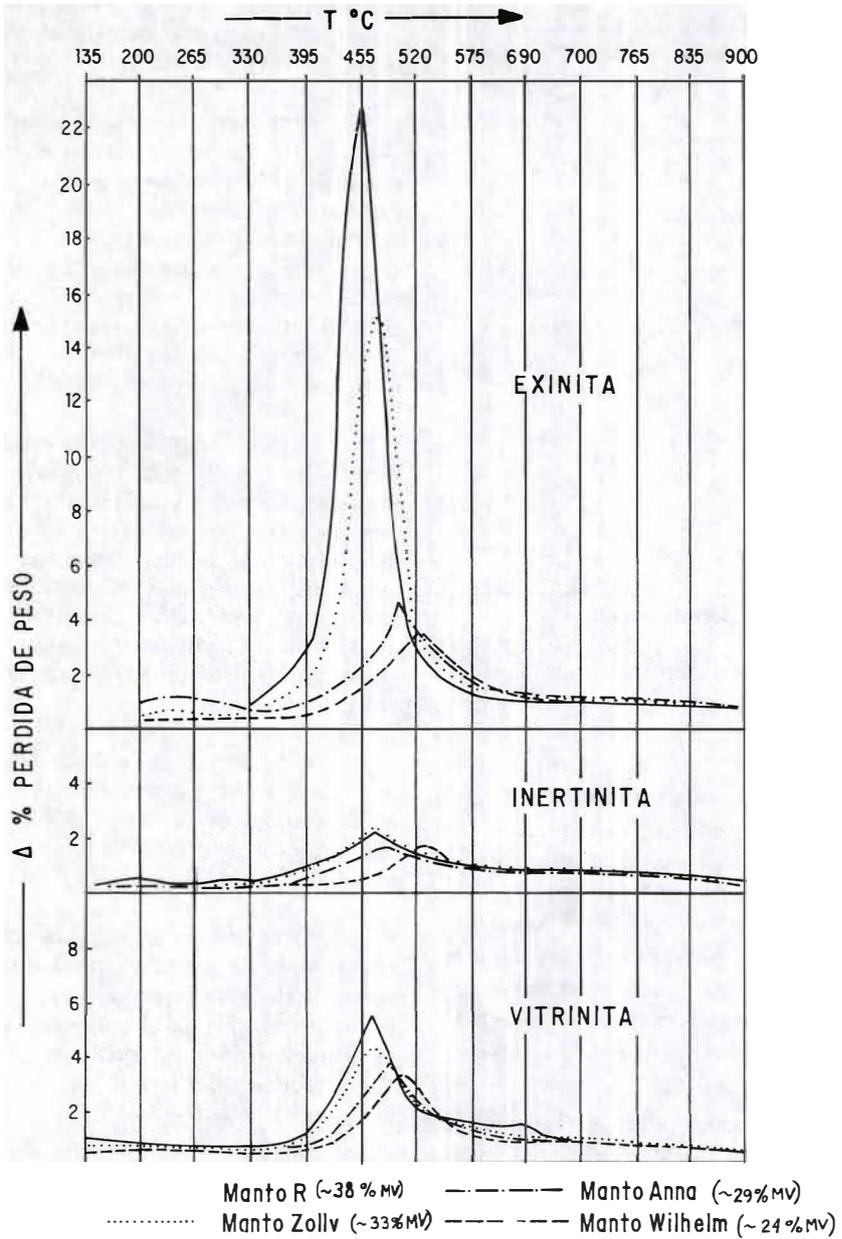


FIG. 24: Velocidad de degasificación de los tres grupos de macerales, en función de su rango (modificado, después de KROGER, 1957).

un porcentaje demasiado elevado de fusinita produce una inflamación retardada y de este hecho una disminución de la temperatura en la cámara de combustión (Léxico CIPC, 1971).

El Cuadro II (Fig. 20) incluye los números de Tipo para los contenidos de vitrinita y exinita. Para ilustrar la forma de empleo de este cuadro, tomemos como ejemplo un carbón con la siguiente composición maceral:

Vitrinita	44.4%
Exinita	16.8%
Inertinita	36.8%
Materia Mineral	2.0%

Estos porcentajes están dados "por volumen", tal como se determinan con el método de análisis de macerales. Sin embargo, se propone en la nueva clasificación que adicionalmente se use la forma de expresión "libre de materia mineral", para definir con mayor aproximación el contenido de inertinita en la muestra de carbón analizada, al restar de 100 la suma de los porcentajes de vitrinita y exinita.

Por consiguiente, la expresión de los resultados anteriores dados como ejemplo en base libre de materia mineral sería como sigue:

Vitrinita	45.3%
Exinita	17.1%
Inertinita	37.6%

Entonces el número de tipo por el contenido de vitrinita sería del 4 (por estar en el intervalo $> 40 - 50\% <$) y por el contenido de exinita sería el 1 (por estar en el intervalo $> 10 - 20\% <$). A partir de la información dada por el número código con la segunda y tercera cifras, entonces, podría deducirse el contenido de inertinita como localizado entre el 30 y el 48%. Un promedio de estos límites deducidos del Cuadro II disminuiría, como norma general, las posibilidades de una apreciación muy aparte de la realidad.

5.2.1.3. *Cuarta cifra: Cualificación.*- La cuarta cifra del número código está definida por los aquí llamados **Parámetros de Cualificación**. "Cualificar" es sinónimo de "calificar" y significa atribuir a una persona o cosa cierta cualidad, o asignar un grado de los de cierta escala establecida (Diccionario de la Lengua Española, Edit. Kapelusz, 1979). En el caso de la clasificación propuesta, este término se encontró adecuado, pues se trataba de asignar a los carbones una cualidad o un grado que los ubicara dentro de una escala apropiada y que los distinguiera unos de otros en la mejor forma posible.

La selección de los parámetros obedeció a los siguientes criterios:

- 1) Los ensayos de laboratorio deberían identificar y agrupar los carbones según cualidades intrínsecas colocándolos dentro de un marco adaptado para su utilización.
- 2) Estos ensayos y su metodología deberían ser suficientemente conocidos por los laboratorios de carbón y sus resultados ampliamente utilizados en la práctica.

Un gran grupo se destaca entonces dentro de los parámetros escogidos y es el que cubre la **Dilatometría**. Este ensayo es uno de los más ampliamente aceptados y da uno de los mayores rangos de valores. Más aún, suministra información acerca de puntos característicos del proceso de carbonización y del estado plástico que manifiestan los carbones o mezclas de carbones coquizables durante su calentamiento. Los cambios de factores tales como el rango del carbón, la composición maceral, la cantidad y distribución del tamaño de cualquier materia mineral presente, el tamaño de las partículas de carbón y el estado de oxidación de la muestra pueden afectar la dilatación de un carbón calentado a una velocidad dada (MARSHALL, 1976). Ya que estos factores también afectan las propiedades físicas del coque, se pueden establecer correlaciones

entre resultados del dilatómetro y las medidas de resistencia del coque, como el ensayo tumbler y el índice Micum M_{40} (SIMONIS, 1968; GIBSON y GREGORY, 1977).

El grupo de carbones cubierto por este parámetro de dilatometría va desde los carbones bituminosos altos en volátiles hasta los semiantracíticos. Aunque los carbones altos en volátiles y las semiantracitas no producen buen coque por ellos mismos, a menudo se usan en mezclas coquizantes para propósitos específicos. Entonces, un sistema de clasificación de carbones, y en especial de carbones coquizantes, deberá cubrir todo el rango de carbones usados. (MARSHALL, 1976).

Sin embargo, las antracitas no se incluyeron dentro del parámetro de dilatometría aunque estos carbones también son usados algunas veces en mezcla. Esto se debió a que las antracitas no manifiestan ablandamiento durante el calentamiento en el dilatómetro y obviamente no presentan dilatación alguna. En consecuencia, su discriminación con el uso de la dilatometría fue considerada inútil y, por lo tanto, se seleccionó el contenido de **Materias Volátiles** (en carbón seco, libre de cenizas, s.l.cz) como parámetro de cualificación para las antracitas. Con esta prueba, entonces, se pueden distinguir tres grados de antracitas, según se aprecia en el Cuadro III (Fig. 20).

El contenido de materias volátiles ha sido usado en todo el mundo y por largo tiempo como parámetro de rango, y en carbones de avanzado estado de carbonificación como las antracitas no es influenciado por la composición maceral. En el caso presente, y ya habiéndose adoptado la reflectancia de la vitrinita como parámetro de rango, se decidió emplear otro ensayo que diera una información adicional característica de las diferentes antracitas. Se consideró el contenido de hidrógeno, pero dado que las diferencias en las determinaciones de este elemento se ha comprobado que son muy irregulares para niveles superiores a 3.5% reflectancia (McCARTNEY y TEICHMULLER, 1972), se prefirió usar el contenido de materias volátiles como parámetro.

Volviendo a la dilatometría y refiriéndonos al Cuadro III, se distinguieron seis categorías de ubicación de los carbones según su comportamiento en el dilatómetro, con su correspondiente número de cualificación. Estas categorías guardan estricta relación con los números de Subgrupo de la clasificación internacional.

Conviene mencionar aquí, que si bien es cierto que carbones semiantracíticos y bituminosos altos en volátiles C (Cuadro I), hasta el presente no se han reportado con valores mayores del 50% de dilatación, se ha preferido no establecer límites estrictos de dilatometría para estos carbones considerando la posibilidad de que tal hecho suceda y para simplificar la clasificación; se anota que tanto el sistema internacional como la propuesta de MARSHALL (1976) admiten esa posibilidad de valores altos de dilatometría en carbones de los rangos mencionados.

El parámetro escogido para los carbones sub-bituminosos y ligníticos fue el **Poder Calorífico**, expresado en base húmeda, libre de cenizas. Se establecieron cinco números de cualificación con sus intervalos correspondientes, aunque no se fijaron límites superior e inferior para los carbones sub-bituminosos y ligníticos, respectivamente. Los límites de aplicación de este parámetro estarán dados por la reflectancia de la huminita, es decir, por el rango del carbón. Los intervalos corresponden aproximadamente a aquellos de la clasificación ASTM.

La humedad de equilibrio fue considerada como parámetro de cualificación para estos carbones, tal como lo propuso ALPERN (1979). Sin embargo, se consideró que la humedad de equilibrio es más bien un parámetro de rango y que el poder calorífico da una mejor idea de las posibilidades de utilización de los carbones. De cualquier forma, aquellos carbones que se pretendan clasificar y que no estén equilibrados en su capacidad de retención de humedad tal como se encuentran en su ambiente de formación, deberán ser sometidos a la prueba de humedad de equilibrio (Norma ISO 1018-75 o Método ASTM D1412-74) para lograr la adecuada expresión de los resultados de poder calorífico.

Otro parámetro considerado fue el rendimiento de alquitrán, tal como se incluye en la clasificación internacional para carbones de bajo rango, y que aporta información desde el punto de vista carboquímico. No obstante su importancia y dado que el procedimiento no ha sido aplicado hasta el momento en Colombia y que se tienen pocas referencias de él a nivel internacional, se ha preferido descartarlo como parámetro de cualificación.

5.2.2. APLICACION DE LA CLASIFICACION PROPUESTAS SEGUN EL CONTENIDO DE MATERIA MINERAL DE LOS CARBONES

Para finalizar este tema del modo de empleo y campo de aplicación de la clasificación propuesta, es necesario destacar la influencia de la **Materia Mineral** que en repetidas ocasiones se ha mencionado a través de este escrito.

Dados los efectos que la materia mineral puede producir sobre los resultados de los parámetros de cualificación, se propone esta clasificación para carbones de un contenido de cenizas igual o inferior a 10%, límite que también emplea la clasificación internacional. Aunque algunos autores (LANGE et al., 1962) han estimado como alto este límite, se considera que muchos carbones (especialmente gondwanianos) tendrían que someterse al tratamiento especial si este límite fuera reducido a menos de 10%.

Por consiguiente, una muestra de carbón que se pretenda clasificar según los términos propuestos, deberá analizarse en su contenido de ceniza. Si éste es inferior o igual al 10%, se procederá a la realización de las otras pruebas para su clasificación. Si el contenido de cenizas es superior al 10%, entonces se le someterá a una prueba de lavado

(para lo cual deberá adoptarse un procedimiento normalizado) y producir una curva de lavabilidad de la cual se deduzcan:

La fracción que contiene menos del 10% de ceniza (que se llamará **Carbón Limpio**).

La fracción que contiene entre el 10% y el 20% de ceniza (que se llamará **Carbón Impuro**).

La fracción que contiene entre el 20% y el 50% de ceniza (que se llamará **Mixto Carbonoso**).

La fracción que contiene más del 50% de ceniza (que se llamará **Mixto Esquistoso** hasta el 80% de ceniza; un mayor porcentaje de ceniza corresponderá a un **Esquistoso**).

La fracción de menos de 10% y la de 10-20% de ceniza serán entonces caracterizadas por los parámetros de rango, tipo y cualificación. El informe de clasificación de estos carbones deberá estar acompañado de la información del estudio de lavabilidad. Una curva típica de lavabilidad se observa en la Figura 25.

Para el caso de carbones de alto contenido de ceniza no eliminable (p. e., más del 20%) por el método de lavado convenido, como puede ocurrir con los carbones de tipo sapropélico, la fracción entre 20 y 50% de cenizas se llamará entonces **Carbón Cenizoso**, y se clasificará por los parámetros del sistema propuesto.

5.2.3. EJEMPLOS DE UTILIZACION DE LA CLASIFICACION PROPUESTA

A continuación se dan algunos ejemplos de determinación de los números código de muestras de carbón procedentes de diferentes localidades de Inglaterra y de Colombia:

ANÁLISIS	CARBONES						
	A	B	C	D	E	F	G
Reflectancia máxima, %	1.01	1.10	1.52	0.96	1.03	0.79	0.73
Contenido de vitrinita, %v (lmm)*	9	45	74	66	94	90	72
Contenido de exinita %v (lmm)	65	17	1	2	2	7	6
Contenido de inertinita, %v (lmm)	26	38	25	32	4	3	22
Dilatación máxima, %	190	110	52	56	254	s.c.	s.c.
Contenido de cenizas, % (s)**	1.7	8.8	6.4	10.2	6.9	6.9	4.6

* v (lmm): en volumen, libre de materia mineral
 ** (s): en muestra seca
 s.c.: sólo contracción

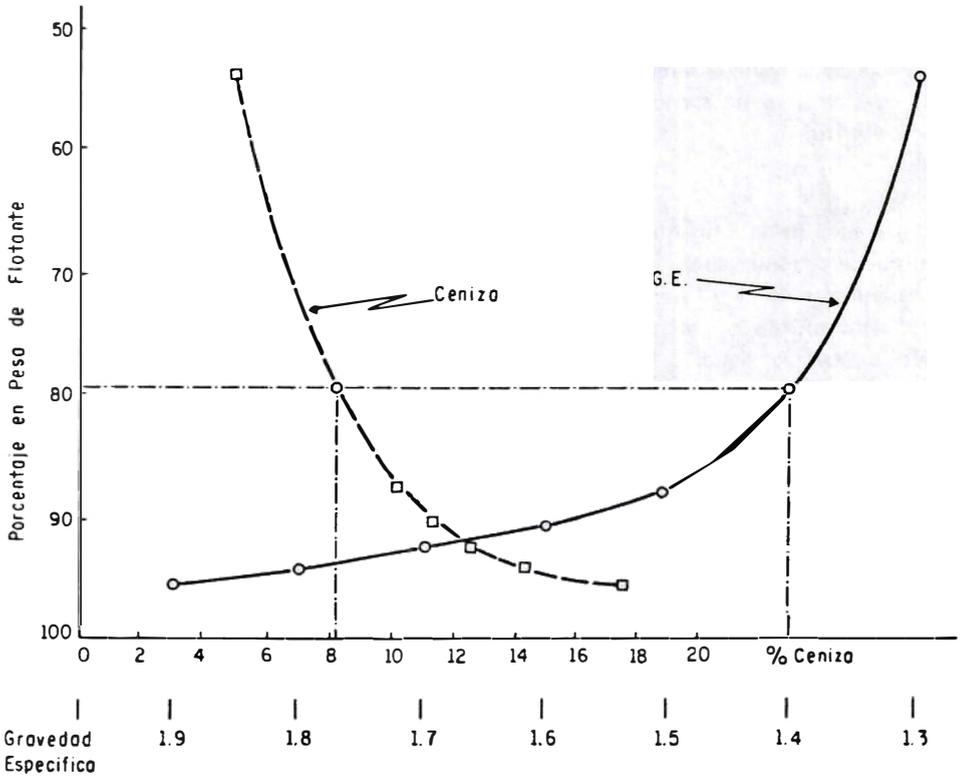


FIG. 25: Curva típica de lavabilidad.

Según datos anteriores, los números códigos correspondientes serían:

CARBON A (Silkstone Manvers, Inglaterra): 6065

CARBON B (Marley Hill, Inglaterra): 5414

CARBON C (Lambton, Inglaterra): 4704

CARBON D (Ubaté, Colombia): 6604

CARBON E (Zipaquirá, Colombia): 6905

CARBON F (Cerrejón, Colombia): 7901

CARBON G (Cerrejón, Colombia): 7701

5.3. POSIBILIDADES DE APLICACION DE LA CLASIFICACION PROPUESTA EN COLOMBIA

Estamos capacitados en Colombia para aplicar de manera inmediata la clasificación que aquí se propone? La respuesta a esta pregunta es: Sí. Desde hace algunos años varias instituciones dedicadas al estudio de nuestros carbones han venido adquiriendo equipo y capacitando personal en un grado tal que hoy en día se dispone de la técnica necesaria para realizar y evaluar las determinaciones analíticas requeridas por el sistema propuesto.

Haciendo un resumen, esas determinaciones son las siguientes:

1. Reflectancia de la vitrinita
2. Análisis de macerales
3. Contenido de cenizas
4. Contenido de materias volátiles
5. Dilatación máxima
6. Humedad de equilibrio
7. Curva de lavabilidad (para carbones de más de 10% de contenido de ceniza).

Haciendo una comparación con la Clasificación Internacional, observamos que el índice de hinchamiento no ha sido incluido en la clasificación propuesta, y por el contrario se hace uso de técnicas microscópicas (reflectancia y análisis de macerales). Los Items contenido de ceniza, contenido de materia volátil, dilatación máxima, poder calorífico y humedad de equilibrio son comunes a ambas clasificaciones y su determinación es llevada a cabo corrientemente en las instituciones dedicadas a la caracterización de carbones. La curva de lavabilidad no se determina con frecuencia, pero las dos clasificaciones admiten una condición de limpieza del carbón para su estudio. De cualquier forma, la prueba de lavabilidad es simple aunque engorrosa su ejecución.

Por otra parte, el cuadro anexo de la Clasificación Internacional que incluye los carbones "pardos" (sub-bituminosos y ligníticos) vendría a estar representado en la nueva clasificación por dos parámetros: la reflectancia de la vitrinita y el poder calorífico. Estos reemplazarán entonces a las determinaciones de humedad total y rendimiento de alquitrán.

En términos generales, sólo las técnicas microscópicas representan una innovación dentro del marco de la clasificación propuesta con respecto al sistema internacional. Sin embargo, se consideran fundamentales para una correcta y útil caracterización de carbones. Entidades tales como el INGEOMINAS y el IIT están actualmente en capacidad de realizar el análisis completo de las muestras para efectos de clasificación. De considerable interés sería la adecuación y complementación de equipos en centros de estudio como la Universidad Industrial de Santander (UIS - Bucaramanga), la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC - Sogamoso) y la Universidad Nacional de Colombia (Centro del Carbón - Medellín). Esta operación sería de fácil logro y bajo costo, según se desprende de un inventario de recursos físicos y humanos contenidos en un reciente estudio dirigido por COLCIENCIAS (1980).

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La proposición presentada está basada en el hecho de que el sistema existente de la "Clasificación Internacional de Carbones Duros por Tipo", no es suficiente para la toma de decisiones en la utilización de la materia prima para la industria de la coquización, como tampoco lo es para las nuevas tecnologías de combustión y licuefacción del carbón.

El creciente empleo de carbones de composición maceral variable y de carbones de bajo rango en los diferentes procesos, hace necesario el uso de parámetros que definan adecuadamente la participación de cada uno de los componentes de los carbones mismos y de las mezclas de carbones.

Las técnicas microscópicas, representadas por la reflectancia de la vitrinita y el análisis de macerales, constituyen hoy en día una gran posibilidad para la solución de muchos de los problemas presentes en la utilización del carbón y son base fundamental de la clasificación propuesta. Aunque, como en todo trabajo de laboratorio, cierta habilidad y experiencia son necesarias, las mediciones microscópicas requeridas no presentan dificultades técnicas.

Se hace una clara distinción entre **Rango** y **Tipo**, términos que se confunden en la Clasificación Internacional, y los diferentes carbones dentro de la escala de carbonificación se caracterizan convenientemente por medio de las materias volátiles, la dilatación máxima, y el poder calorífico.

Se conserva casi enteramente la terminología usada en la Clasificación por Rango de la ASTM (lignitos-carbones sub-bituminosos - carbones bituminosos - antracitas), y se utiliza un número código de cuatro cifras que es determinado por los parámetros de rango, tipo y cualificación. Este número da una gran simplicidad de expresión y facilita la sistematización de los datos, con posibilidades de programación con computador.

Se ha intentado mantener, en lo posible, una correspondencia con la Clasificación Internacional para hacer compatible la información existente. Las convenciones (que son intrínsecas de toda clasificación) se han basado en la opinión y el trabajo de expertos en la materia y en la experiencia propia de los autores.

Las características de los carbones del hemisferio sur, y por ende las de los carbones colombianos, corresponden a un grupo que se diferencia de aquellos carbones europeos y del Este de Norteamérica, para los cuales se dispuso la Clasificación Internacional, en su composición y en su comportamiento en los procesos tecnológicos. La nueva clasificación permite ubicar convenientemente estos grupos, lo que la hace más universal y con mejores posibilidades de aplicación que la Clasificación Internacional.

Se recomienda por lo tanto:

- 1) Que se cree una comisión de estudio de la propuesta de clasificación, constituida por expertos interesados y conocedores del tema.
- 2) Que de aceptarse la propuesta, se someta a su aprobación como norma colombiana, y se le de amplia difusión en el medio científico, tecnológico y comercial.
- 3) Que se fomente el empleo de los parámetros incluidos en la Clasificación, en Universidades e Instituciones de Investigación.

7. BIBLIOGRAFIA

- ALPERN, B., 1979.- *Essai de classification des combustibles fossiles solides*. Publicatio Cerchar 2810, 14 p.
- ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS, 1978.- *Gaseous fuels, coal and coke*. Atmospheric analysis. Part 26, 220.

- BENEDICT, L.G., y BERRY, W., 1966.- *Further applications of coal petrography*. En: *Coal Science*; F.R. Gould, editor. p. 577-591.
- BENNETT, A.J.R. y TAYLOR, G.H., 1970.- *A petrographic basis for classifying Australian Coals*. En: *Proceedings of the Australian Institute for Mining and Metallurgy*, No. 233, 5 p.
- BLANCO, G., ROMERO, E. y URIBE, C., 1977.- *Clasificación internacional de los carbones de Checua-Lenguazaque*. Inf. 1726, Ingeominas. 17 p.
- COLCIENCIAS, 1980.- *Investigación y desarrollo tecnológico del carbón*. Programa Colombia - PNUD-UNESCO COL. 76/005, 92 p.
- COPPENS, P.L., 1967.- *Synthese des propriétés chimiques et physiques des houilles*. Institut National de l'Industrie Charbonnière. Liege.
- DAVIS, A., 1970.- *A classification for Australian coals*. En: *Queensland Government Mining Journal*, 2 p.
- DAVIS, A.; SPACKMAN, W. y GIVEN, P.H., 1976.- *The influence of the properties of coals on their conversion into clean fuels*. En: *Energy Sources*, Vol. 3, No. 1. Crane-Russak & Co. Inc., editors. pp. 5581.
- DURAN, R., et al., 1979.- *Zonas carboníferas de Colombia*. Publ. Geol. Esp. Ingeominas, No. 3; con destino al Congreso Ilafa-Carbón/79.
- EREMIN, I.V. y KOSINA, M., 1976.- *New classification of hard coals*. 6 pp.
- FISHER, C.H., 1938.- *Relation between volatile matter and hydrogen-carbon ratio of coal and its banded constituents*. *Industrial and Engineering Chemistry*. Ann. ed. 10, pp. 374-378.
- FRANCIS, W., 1954.- *Coal, its formation and composition*. p. 323.
- GIBSON, J. y GREGORY, D.H., 1978.- *Selections of coals and blend preparation for optimum coke quality*. En: *The Coke Oven Managers Year-Book*. p. 215.
- INTERNATIONAL CLASSIFICATION OF HARD COALS BY TYPE, 1956.- Geneva. Economic Commission for Europe. United Nations Publ.
- JACOB, H., 1976.- *Geological, chemical and technological properties of Colombian coals*, 13 pp.
- KOTTER, K., 1960.- *Die mikroskopische Reflexionsmessung mit dem Photomultiplier und ihre Anwendung auf die Kohlenuntersuchung*. En: *Brennst. Che.* 41, pp. 263-272, y *Léxico CIPC* 1963.
- LANGHE, W., RADMACHER, W. y VIERNERSEL, H., 1962.- *The significance of the dilatometer test for the estimation of the coking capacity of bituminous coal*. En: *Brennstoff-Chemie*, No. 2, Vol. 43. pp. 39-45.
- LEXIQUE INTERNATIONAL DE PETROGRAPHIE DES CHARBONS. 2^{eme}. edition 1963.- 1^{ere} Supplement á la deuxieme edition 1971; 2^{eme}. Supplement á la 2^{eme}. Edition 1975. Centre National de la Recherche Scientifique.
- LOWRY, H. H., 1945.- *Chemistry of Coal Utilization*. Volume I. New York, London. pp. 1-85.
- , 1963.- *Chemistry of Coal Utilization*. Supplementary Volume. New York, London. pp. 27-34.
- MCCARTNEY, J. T., y TEICHMULLER, M., 1972.- *Classification of coals according to degree of coalification by reflectance of the vitrinite component*. En: *Fuel*, Vol. 51. pp. 64-68.
- MACKOWSKY, M.T. y SIMONIS, W., 1969.- *Die Kennzeichnung von Kokskohlen im Horizontal kammerofen bei Schuttbetrieb durch Ergebnisse mikroskopischer Analysen*. 12 pp.
- MARSHALL, R. J., 1976.- *Classification of coking coals*. En: *Fuel*, Vol. 55. pp. 346-348.

- MEJIA, L.J. y VERGARA, H., 1981.- *Estudio petrográfico y poder reflector de algunos carbones colombianos*. En: *Geología Norandina*, Vol. 4, pp. 13-22.
- MOJICA, P. E., et al., 1978.- *Informe sobre la prospección geológica para carbón en el área de Subachoque, Departamento de Cundinamarca, República de Colombia*. Informe Ingeominas-Geominas, 45 pp.
- MOTT, R.A., 1964.- *Coal Classification and assesment in coke oven practice*. En: *The Coke Oven Manager Year-Book*. pp. 256-272.
- PEREZ, F., 1979.- *Clasificación de Carbones*. Informe Ingeominas. 27 pp.
- SIMONIS, W., 1966.- *Classifying the coking behaviour of hard coal*. Charleroi International Congress on Coke in the Iron and Steel Industry. 9 pp.
- STACH, E. et al., 1982.- *Coal petrology*. 3d. ed. Berlín. 533 pp.
- TEICHMULLER, M., 1971.- *Anwendung Kohlenpetrographischer Methoden bei der Erdol - und Erdgasprospektion*. Erdol u. Khole, 24. pp. 69-76. En: *Stach's Coal Petrology*, 1982, p. 42.
- TEICHMULLER, M., TEICHMULLER, R., 1966.- *Geological causes of Coalification*. En: *Coal Science*, 1966. F.R. Gould, editor. pp. 133-153.
- TEICHMULLER, M., TEICHMULLER, R. y BARTENSTEIN, H., 1979.- *Inkohlung und Erdgas in Nordwestdeutschland. Eine Inkohlungskaste der Oberflache des Oberkarbons*. Fortschr. Geol. Rheinld. u. Westf. 27 pp. 201-276. Krefeld. En: *Stach's Coal Petrology*, 1982. p. 47.
- URIBE, C., 1978.- *Clasificación de los carbones en Colombia*. Informe Ingeominas. 17 pp.
- , 1982.- *Dilatometer studies of coals in relation to their rank and type variation*. Tesis de grado M.Sc. Newcastle upon Tyne (England).
- , 1983.- *Esayo de Indice de hinchamiento en carbones: Usos y limitaciones*. Informe Ingeominas. 16 pp.
- VAN KREVELEN, D.W., 1961.- *Coal. Typology, chemistry, physics, constitution*. Elsevier, ed. pp. 10-34.
- VAN KREVELEN, D.W. y HUNTKENS, F.I., 1958.- *Compt. rend. 3 le. Congr. Intern. Chimie Industr., Liège, TI*, 426 pp.
- WHITE, D., 1933.- *Economic Geology*.- Vol. 28 p. 556; En: *Coal*, W. Francis, 1954.
- WILSON, P. y WELLS, J., 1953.- *Charbon, coke et sou: produits*. Paris Liege. pp. 47-83.