



TEMA 1: COMBUSTIBLES SÓLIDOS

MATERIALES DE ESTUDIO

Aitziber Iriondo Hernández
Blanca M^a Caballero Iglesias
Maite de Blas Martín

Escuela de Ingeniería de Bilbao
Ingeniería Química y del Medio Ambiente

COMBUSTIBLES SÓLIDOS

1.1. El carbón

1.1.1. Tipos de carbón

1.1.2. Caracterización

1.1.3. Clasificación del carbón

1.2. Almacenamiento de carbón

1.2.1. Combustión espontánea. Factores

1.2.2. Normas y recomendaciones

1.3. Transporte de carbón

EL CARBÓN

ORIGEN Y FORMACIÓN

El carbón se originó a partir de **sustancias vegetales** depositadas en zonas pantanosas, o que en algunos casos fueron transportadas y depositadas en zonas de agua abiertas a la atmósfera, donde fueron alteradas física y químicamente por distintos procesos de **descomposición, degradación y compactación** a lo largo de millones de años, dando lugar a los carbones actuales. En la fig.1.1 se observa un esquema de la formación del carbón.

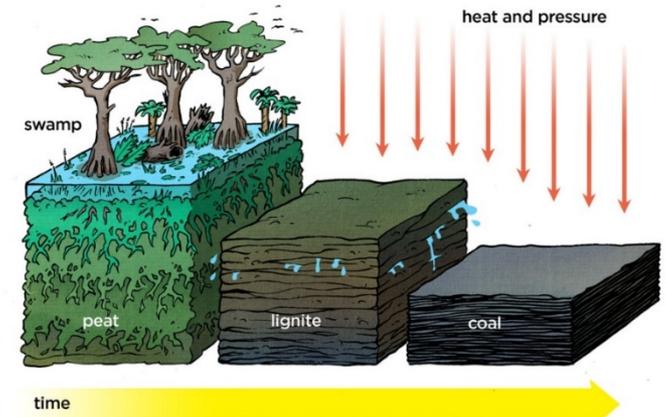


Figura 1.1. Formación del carbón. Ilustración utilizada en Siyavula Gr 7-9 Natural Sciences y publicada en Flickr bajo licencia BY 2.0 [1]

Los **constituyentes vegetales** que podrían dar lugar al carbón son: celulosa, proteínas, ceras, resinas, terpenos, ligninas, taninos, alcaloides, flavonoides, etc.

EL CARBÓN

ORIGEN Y FORMACIÓN

Existen diferentes **teorías** sobre la **formación de los carbones**, destacando dos:

- a) Como resultado de la **carbonización de la celulosa** (polisacárido: $C_6H_{10}O_5$, componente principal de los vegetales)
- b) A partir de las **estructuras de la lignina** (material que une las fibras celulósicas, formada por condensación de anillos)

Las últimas investigaciones han demostrado que la celulosa sufre una rápida biodegradación para ser la principal precursora del carbón, mientras que las ligninas, taninos, flavonoides y posiblemente los alcaloides son más resistentes al ataque de las bacterias, con lo que las **ligninas** podrían ser los constituyentes mayoritarios de los carbones.

EL CARBÓN

ORIGEN Y FORMACIÓN

En el proceso de formación del carbón se pueden considerar dos etapas (fig. 1.2):

1. *La etapa bioquímica ó de la turba*

Se considera la acumulación de residuos vegetales y formación de la **turba**. La materia vegetal sufrió una descomposición parcial por acción de microorganismos, sufriendo procesos tanto aerobios como anaerobios, para dar lugar a ácidos húmicos y sales de ácidos húmicos, y posteriormente a la turba.

Esta etapa se interrumpió al cubrirse la turba por sedimentos y ser compactada y sometida a presiones y temperaturas diversas, en largos períodos de tiempo.

2. *La etapa geoquímica o metamórfica*

El depósito de turba maduró, sufriendo diversas metamorfosis a lo largo de millones de años y dando lugar progresivamente a la serie de carbones: **lignito, hulla subbituminosa, hulla bituminosa y antracita**

EL CARBÓN

ORIGEN Y FORMACIÓN

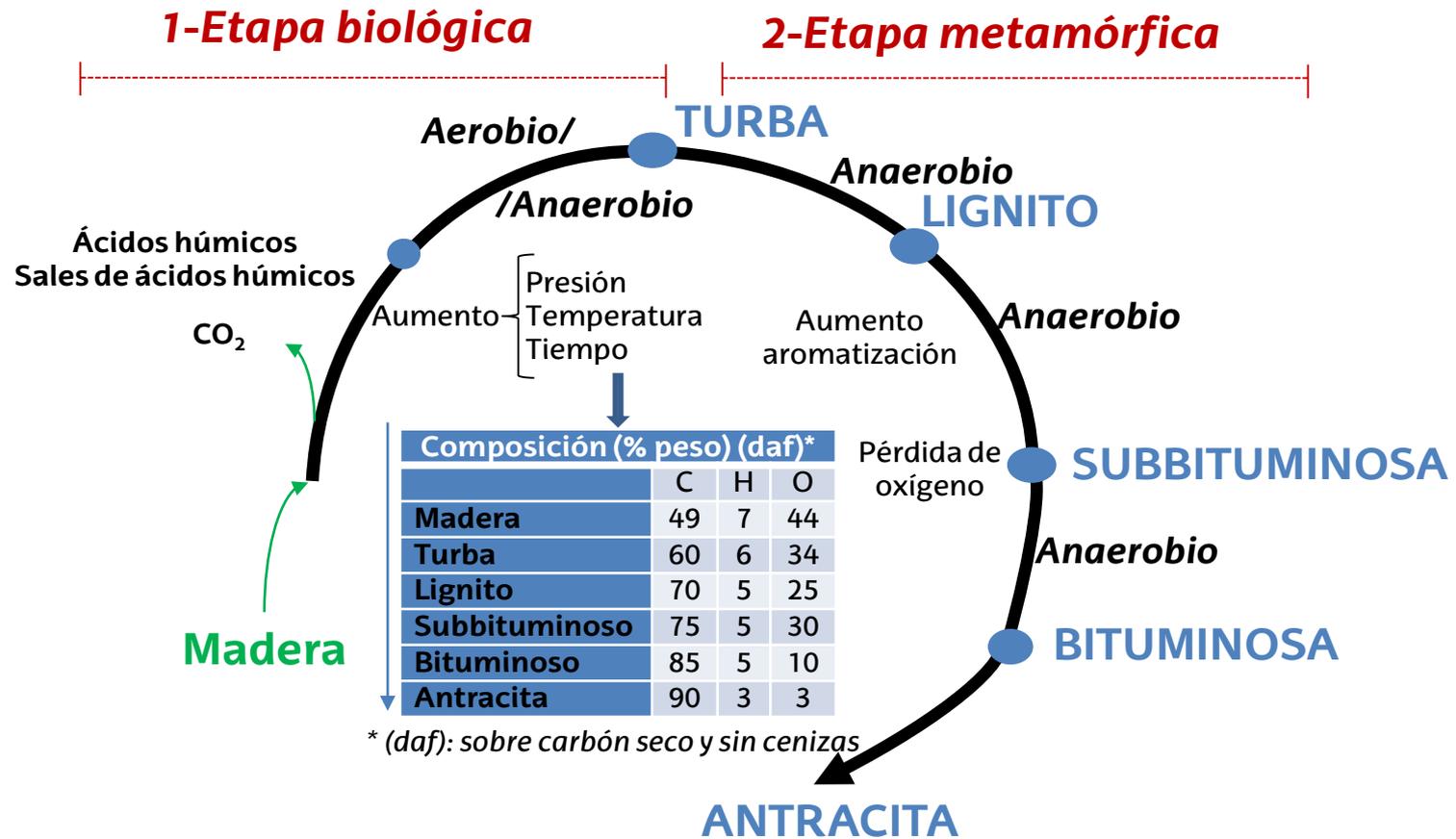


Figura 1.2. Esquema del proceso de formación del carbón. Imagen propia elaborada a partir de la biografía (J. G. Speight, 1983)

EL CARBÓN

ORIGEN Y FORMACIÓN

Al grado de maduración, metamorfosis o transformación del carbón se denomina **RANGO**, y es función de la temperatura, presión, profundidad, etc. del lecho, así como de la duración de las etapas bajo las diversas condiciones. En líneas generales, a mayor temperatura, presión, tiempo, profundidad, etc., mayor rango.

** La importancia del proceso de formación del carbón, y en especial de la etapa metamórfica, radica en el hecho de que los carbones difieren considerablemente en composición y otras propiedades en función del rango o grado de metamorfosis, tal y como se observa en la fig. 1.2.*

EL CARBÓN

TIPOS DE CARBÓN

En función del *rango*, los carbones se pueden clasificar en:

- **TURBA** → es el carbón más reciente (también denominado *precursor del carbón*). Tiene un alto grado de impurezas, y de humedad (hasta 90%), bajo PCS (<4000 kcal/kg) y poco C (<50%). Tiene muy poco interés industrial; se utiliza como combustible pobre.
- **LIGNITO** → es el carbón que menos metamorfosis ha sufrido. Presenta alto grado de impurezas y bajo PCS (\cong 5000 kcal/kg), con un contenido en humedad \cong 30-70%. Se emplea en centrales térmicas para la obtención de energía eléctrica y para la obtención de subproductos mediante destilación seca.

Los lignitos se agrupan en:

- Lignitos pardos: carbones terrosos de color pardo oscuro
- Lignitos negros: carbones duros de color negro brillante

EL CARBÓN

TIPOS DE CARBÓN

- **HULLA** → reúne a una gran variedad de carbones con diferente contenido en impurezas, con PCS >7000 kcal/kg y alto % de C ($\cong 85\%$). Es el de más importancia económica. Actualmente se emplea en centrales térmicas y fundiciones de metales (siderurgia). Por destilación seca se obtiene amoniaco, alquitrán y carbón de coque (muy utilizado en industria: altos hornos).

Las hullas se clasifican en:

- Hullas subbituminosas: hullas de menor rango
- Hullas bituminosas: hullas de mayor rango
- **ANTRACITA** → es el carbón más antiguo o de mayor rango. Tiene $>90\%$ de C y menos impurezas, y es el de mayor PCS (>8000 kcal/kg). El contenido en materias volátiles es muy bajo y su combustión muy limpia. Actualmente se emplea en las centrales térmicas.

EL CARBÓN

TIPOS DE CARBÓN

Las antracitas también se clasifican en función del rango en:

- Semiantracita
- Antracita
- Metaantracita

En la fig. 1.3 (a-d) se observa el aspecto de los tipos de carbón en función del rango.



a)



b)



c)



d)

Figura 1.3. a) Turba. Imagen publicada por Beatrice Murch en Flickr bajo licencia CC BY-SA 2.0 [2], b) Lignito. Imagen publicada por Luis Miguel Bugallo Sánchez en Wikimedia bajo licencia CC BY-SA 3.0 [3], c) Hulla bituminosa. Imagen publicada por Chris 73 en Wikimedia de dominio público en EEUU [4], d) Antracita. Imagen publicada por Educerva en Wikimedia bajo licencia CC BY-SA 3.0 [5]

EL CARBÓN

ESTRUCTURA Y COMPOSICIÓN

El carbón es una de las sustancias naturales peor conocida y más heterogénea y variable que existe, en cuanto a su compleja estructura orgánica, composición y reacciones químicas que puede experimentar, debido a las numerosas variables que intervienen en su formación.

Se puede definir como una *roca formada por una compleja mezcla* de una **parte orgánica** (macromoléculas orgánicas carbonosas, llamadas macerales), y otra **parte inorgánica** (minerales).

La parte **orgánica** contiene C, H y O como elementos mayoritarios y básicos, y el N y S como componentes minoritarios.

En cuanto a la *estructura*, la mayor parte de los átomos de C e H se encuentran formando estructuras aromáticas e hidroaromáticas, a las que se encuentran unidas cadenas parafínicas, grupos funcionales oxigenados o nitrogenados, algunos heterociclos, etc.

EL CARBÓN

ESTRUCTURA Y COMPOSICIÓN

Como las macromoléculas orgánicas del carbón no son unidades monoméricas repetitivas, se utilizan unos parámetros para describir más claramente al carbón, entre ellos:

- **Aromaticidad del carbón.**- Los anillos mono y diaromáticos son los que predominan, y existe poca evidencia de que existan anillos aromáticos altamente condensados, pudiendo ser el alto grado de condensación del carbón resultado de los procesos utilizados en su conversión.

La aromaticidad del carbón varía de unos carbones a otros, disminuyendo, en general, al disminuir el rango.

- **Grupos funcionales y heteroátomos.**- Los grupos funcionales predominantes son los que contienen:
 - : fenoles y alcoholes, grupos carbonilos, ácidos carboxílicos y éteres.

EL CARBÓN

ESTRUCTURA Y COMPOSICIÓN

S:

- inorgánico: FeS_2 y sulfatos, de sales o minerales del agua, terreno
- orgánico: tioles, sulfuros, anillos heterocíclicos ↗ Materia orgánica de partida
↘ Adición en la maduración
- elemental

La cantidad de S varía sensiblemente entre los carbones de una zona a otra

N: aminas, amidas, anillos heterocíclicos, procedentes de la materia vegetal primitiva (proteínas vegetales, alcaloides, etc.) y que se encuentra ligado en combinaciones de tipo orgánico, de ahí la escasa variación en el contenido de N de unos carbones a otros.

La funcionalidad varía de unos carbones a otros, aumentando sistemáticamente ésta, en general, al disminuir el rango.

EL CARBÓN

ESTRUCTURA Y COMPOSICIÓN

En cuanto a la parte **inorgánica**, los minerales se encuentran entremezclados con la materia orgánica, y pueden alcanzar proporciones hasta del 50% en peso. El origen puede ser debido a sustancias minerales existentes en el yacimiento o adicionadas al mismo durante el proceso de formación del carbón, o a sustancias existentes en la materia vegetal original.

Todos los elementos en el carbón, excepto C,H,O,N y S, son considerados de naturaleza inorgánica, incluso si están en compuestos organometálicos, quelatos o especies adsorbidas. Hay que tener en cuenta que C,H,O y S pueden también estar presentes como carbonatos, agua de hidratación y sulfuros, etc.

Métodos para determinar el contenido en materia mineral: **difracción de rayos X, espectroscopia infrarroja, métodos microscópicos**, etc.

EL CARBÓN

ESTRUCTURA Y COMPOSICIÓN

En la tabla 1.1. se recogen los minerales más habituales presentes en el carbón.

Tabla 1.1. Minerales constituyentes del carbón. Elaboración propia

MINERAL	EJEMPLOS
SILICATOS	montmorillonita, illita, kaolinita muscovita, etc.
ÓXIDOS	cuarzo, hematites
SULFUROS	pirita, marcasita
SULFATOS	anhidrita, yeso, jarosita, etc.
CARBONATOS	calcita, siderita, dolomita, etc.

EL CARBÓN

CARACTERIZACIÓN

Para caracterizar un carbón, es preciso tomar muestras lo más representativas y homogéneas posibles. La caracterización incluye diversos tipos de análisis:

- ANÁLISIS INMEDIATO
- ANÁLISIS ELEMENTAL
- ANÁLISIS DE MACERALES
- DETERMINACIÓN DEL PODER CALORÍFICO



En la fig. 1.4 se presenta un microscopio petrográfico utilizado para realizar el análisis de macerales.

Figura 1.4. Microscopio petrográfico para análisis de macerales. Fotografía publicada en Wikimedia bajo licencia pública en EE.UU [\[6\]](#)

EL CARBÓN

CARACTERIZACIÓN

- **ANÁLISIS INMEDIATO** → se refiere a la distribución de los productos obtenidos por destilación destructiva del carbón.

En las fig. 1.5 y 1.6 se observa un esquema sobre el análisis inmediato.



Figura 1.5. Muestra de carbón. Imagen propia

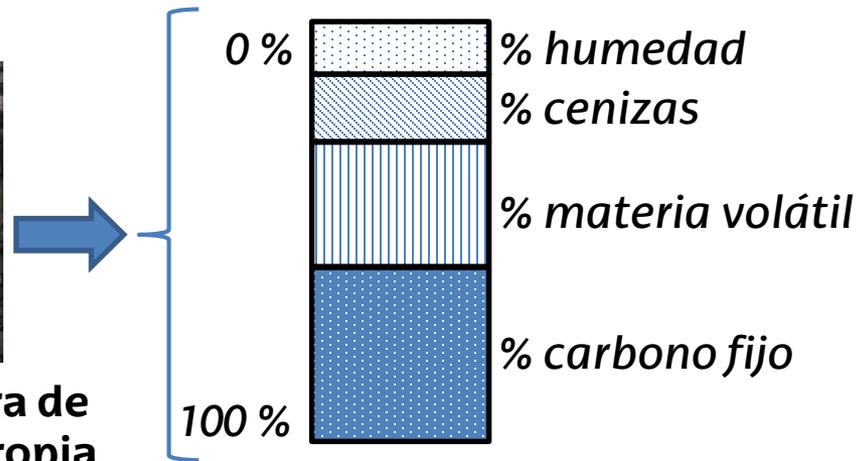


Figura 1.6. Análisis inmediato. Imagen propia

EL CARBÓN

CARACTERIZACIÓN

▪ ANALISIS INMEDIATO - **HUMEDAD**

Se diferencian tres tipos de humedad:

– **Humedad, libre o de inhibición:**

- ✓ Agua en contacto con el carbón en el interior de la mina
- ✓ Agua asimilada en los procesos de lavado y concentración
- ✓ Agua asimilada durante el transporte y almacenamiento del carbón

– **Humedad inherente o higroscópica:**

- ✓ Agua adsorbida por el carbón sobre su superficie, en los poros

– **Humedad total:**

- ✓ Agua libre o superficial + Agua higroscópica o inherente

EL CARBÓN

CARACTERIZACIÓN

ANÁLISIS INMEDIATO - CENIZAS

Residuo inorgánico no combustible que permanece después de la combustión.



Dada la facilidad de cuantificar las cenizas frente a la determinación de la materia mineral inalterada (procedimiento costoso y difícil), lo habitual es utilizar como dato característico del carbón el de las cenizas, que da una idea aproximada de la cantidad de materia mineral. Existen fórmulas que permiten calcular la materia mineral a partir del contenido en cenizas. Entre ellas la más utilizada es la fórmula de Parr:

$$\text{MM (\%)} = 1,08 \cdot \text{A} + 0,55 \cdot \text{S}$$

MM: % materia mineral
A: % cenizas
S: %S

EL CARBÓN

CARACTERIZACIÓN

Además de la cantidad de cenizas, es preciso determinar la composición y fusibilidad de las cenizas.

▪ COMPOSICIÓN DE LAS CENIZAS :

- óxidos de: Si, Al, Fe, Ca y Mg (mayoritarios)
- óxidos de: S, Ti, Na y K (minoritarios)

Aunque dichos compuestos se determinan normalmente en forma de **óxidos**, realmente es una mezcla compleja de silicatos, óxidos y sulfatos con pequeñas cantidades de otros compuestos.

Los silicatos provienen de las pizarras y arcillas contenidas en la materia mineral, los óxidos de calcio y magnesio de la descomposición de sus respectivos carbonatos, el de hierro, en su mayor parte, de la combustión de la pirita, y los sulfatos de reacciones entre el dióxido de azufre, oxígeno y bases diversas.

EL CARBÓN

CARACTERIZACIÓN

▪ FUSIBILIDAD DE LAS CENIZAS:

La fusión de las cenizas a la temperatura de proceso se relaciona, por ejemplo, con la formación de costras en procesos de combustión, que dificultan el paso de aire necesario para continuar dicho proceso, etc.

La fusibilidad de las cenizas depende de su composición química, siendo mínima para el silicato de alúmina ($2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$). Al reemplazarla por óxidos básicos, especialmente por el de hierro, el punto de fusión disminuye por la formación de silicatos dobles.

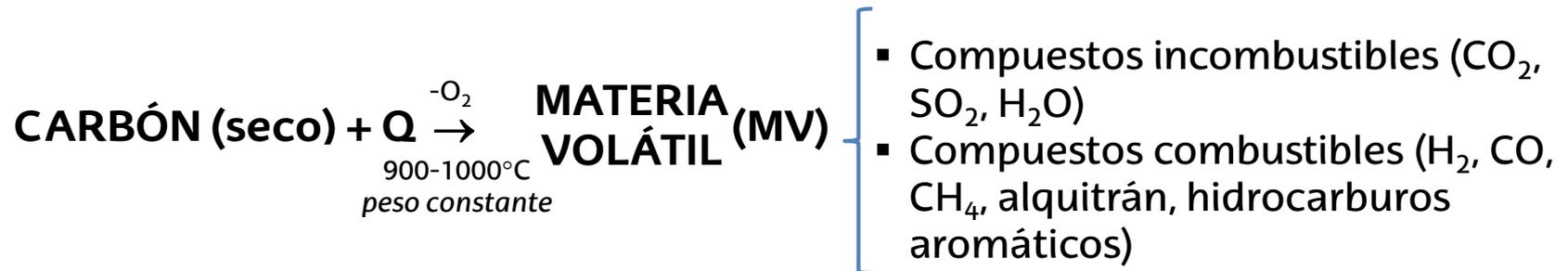
Las cenizas con temperatura de fusión >1400 °C son **refractarias**, entre 1200-1400 °C **intermedias**, y las que tienen temperatura de fusión <1200 °C **fusibles**.

EL CARBÓN

CARACTERIZACIÓN

▪ ANALISIS INMEDIATO - **MATERIA VOLÁTIL (MV)**

Concerniente a los componentes del carbón seco liberados al calentar ($\cong 900\text{ }^{\circ}\text{C}$) bruscamente el carbón en ausencia de aire.



▪ ANALISIS INMEDIATO - **CARBONO FIJO (CF)**

Concerniente al residuo carbonoso, exceptuando las cenizas, no volátil, que permanece en el residuo de la combustión. Se determina por diferencia.

$$\%CF = 100 - \%humedad\ total - \%MV - \%cenizas$$

EL CARBÓN

CARACTERIZACIÓN

- **ANÁLISIS ELEMENTAL** → se refiere a la composición (% peso) de los elementos que componen el carbón: C, O, H, N, S **referidos a carbón seco y sin cenizas** (figs. 1.5 y 1.7 a).

También se refiere a la composición (% peso) de los elementos que componen el carbón: C, O, H, N, S y cenizas y humedad, **referidos a carbón tal y como es recibido** (figs. 1.5 y 1.7 b).



Figura 1.5. Muestra de carbón. Imagen propia

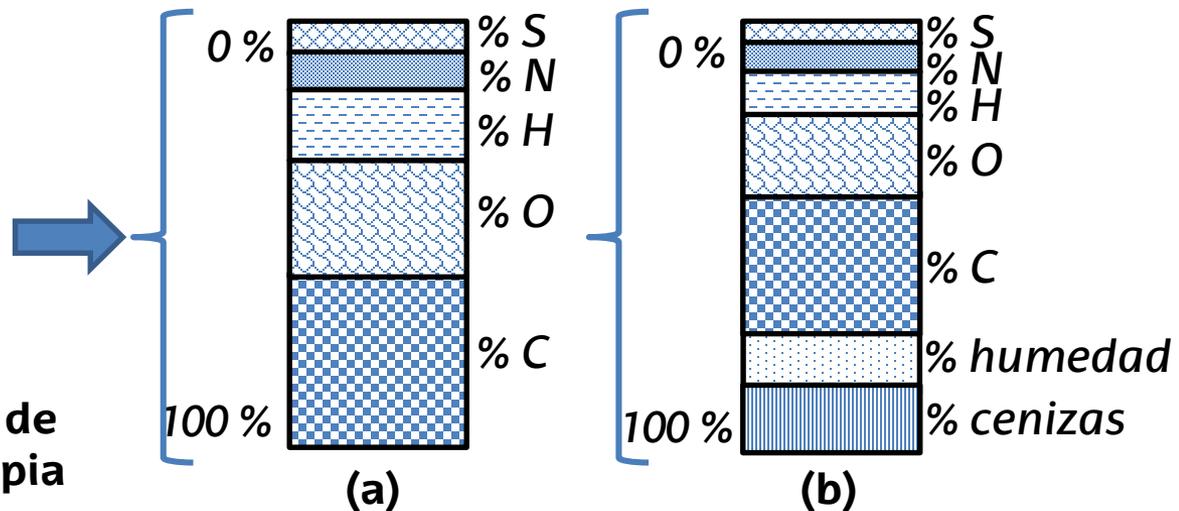


Figura 1.7. Análisis elemental: (a) sobre carbón seco y sin cenizas; (b) sobre carbón tal y como es recibido. Imagen propia

EL CARBÓN

CARACTERIZACIÓN

Los elementos que componen el análisis elemental, referidos a carbón tal y como es recibido, están presentes bajo distintas formas:

- **C:** compuestos orgánicos + carbonatos (minerales)
- **O:** compuestos orgánicos + carbonatos (minerales) + agua constitución (minerales)
- **H:** compuestos orgánicos + humedad + agua constitución (minerales)
- **N:** compuestos orgánicos
- **S:** compuestos orgánicos + pirita/marcasita + sulfatos inorgánicos
- **Cenizas:** minerales
- **Humedad**

EL CARBÓN

CARACTERIZACIÓN

- **ANÁLISIS ELEMENTAL - C e H y N**

- **ANÁLISIS ELEMENTAL - S**

- S orgánico procedente de proteínas de la materia vegetal original
- S inorgánico procedente de

{	Sulfuros: FeS_2	}	→ S total
	Sulfatos: $\text{CaSO}_4, \text{Fe}_2\text{SO}_4$		

- **ANÁLISIS ELEMENTAL - O**

Se determina por diferencia

$$\%O = 100 - (\%C + \%H + \%N + \%S + \text{cenizas} + \text{humedad})$$

EL CARBÓN

CARACTERIZACIÓN

ANÁLISIS DE MACERALES

Los **macerales** son constituyentes microscópicos, discretos y ópticamente homogéneos. En la tabla 1.2 se observan los grupos, tipos y características.

Tabla 1.2. Tipos de macerales. Elaboración propia a partir de datos de la biografía (J. G. Speight, 1983)

GRUPO	TIPO DE MACERAL	ORIGEN Y CARACTERÍSTICAS
VITRINITA (V)	Colinita (sin estructura celular)	Se originó por humidificación y metamorfosis de las paredes celulares de madera y corteza. Color naranja pálido oscuro translúcido en luz transmitida; color gris claro a oscuro en luz reflejada
	Telinita (con algo de estructura celular)	(La diferenciación entre colinita y telinita depende parcialmente del modo de observación)
EXINITA (liptinita) (E)	Resinita	Alto contenido en H, formada a partir de resinas y ceras de plantas. Color naranja claro a oscuro translúcido en luz transmitida; gris claro a oscuro en luz reflejada
	Esporinita	Rica en H, originada a partir de esporas y polen. Amarillo translúcido con baja reflectancia
	Cutinita	Formada a partir de cutículas (materiales de superficie de las hojas). Color más claro que el de la esporinita
	Alginita	Algas fósiles

EL CARBÓN

CARACTERIZACIÓN

Tabla 1.2. Tipos de macerales. Elaboración propia a partir de datos de la biografía (J. G. Speight, 1983) (cont.)

GRUPO	TIPO DE MACERAL	ORIGEN Y CARACTERÍSTICAS
INERTINITA (I)	Macrinita	Sin estructura y origen desconocido. Opaca en luz transmitida; blanca y muy reflectante en luz reflejada
	Micrinita	Material vegetal macerada antes de la carbonización. Lustre marrón y marrón-amarillento en luz transmitida y gris oscuro en la luz reflejada en carbones de bajo rango; en los de más rango es opaca en la luz transmitida y blanca en la reflejada.
	Fusinita	Carbón vegetal fosilizado; estructura de paredes celulares. Es muy duro, y es el principal componente del fuseno. Opaca en luz transmitida, blanca y muy reflectante en luz incidente
	Semifusinita	Intermedia entre la fusinita y la vitrinita con características de ambas, y color intermedio
	Esclerotinita	Originada a partir de restos de hongos. Opaca y muy reflectante

El **análisis** de los macerales se realiza mediante un recuento de puntos con un point-counter observados al microscopio. Se expresa en % volumen (números enteros)

EL CARBÓN

CARACTERIZACIÓN

- **PODER CALORÍFICO** → se refiere al calor desprendido por unidad de peso al quemar el carbón
 - **Poder calorífico superior (PCS)**. Se puede determinar por varios métodos:
 - 1) **Bomba calorimétrica** (fig. 1.8)

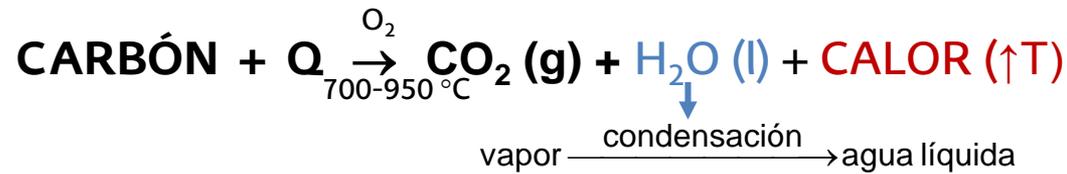
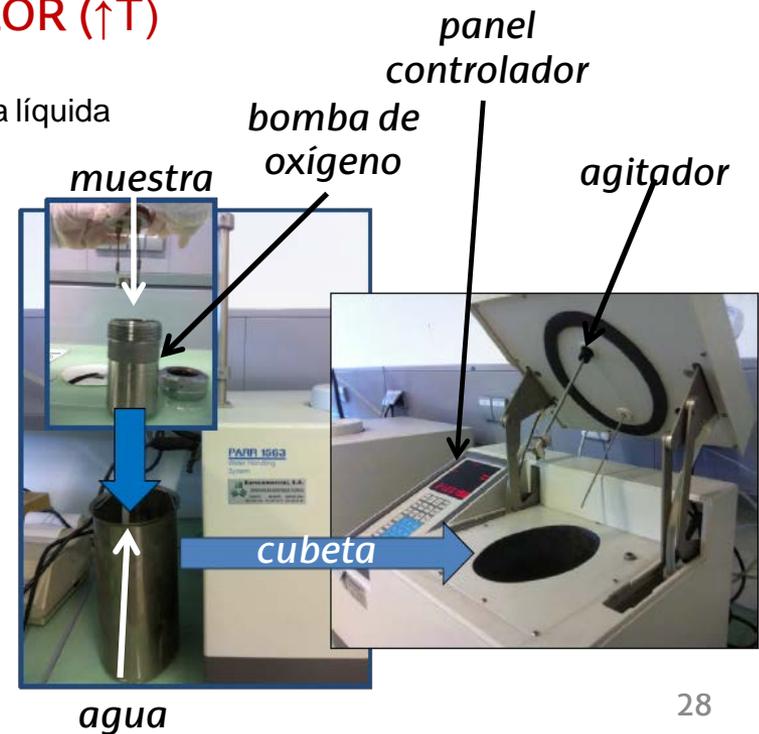


Figura 1.8. Bomba calorimétrica Malher. Imagen propia



EL CARBÓN

CARACTERIZACIÓN

2) Fórmula de Dulong, a partir del análisis elemental

$$PCS = 81 (\%C) + 340 \left(\%H - \frac{\%O}{8} \right) + 22 (\%S) \quad (\text{kcal/kg})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\%H - \frac{\%O}{8} \right) : \text{H disponible} \\ \%O : \text{asociado al H en el H}_2\text{O} \\ \%N : \text{gas inerte} \\ * \%C, \%H, \%S : \% \text{ en peso del carbón "seco"} \end{array} \right.$$

3) Fórmula de Goutal, a partir del análisis inmediato

$$PCS = 82 (CF) + a \cdot (MV) \quad (\text{kcal/kg}) \quad \left\{ \begin{array}{l} * \text{ MV y CF sobre carbón "seco y sin cenizas"} \\ "a" \text{ coeficiente (tabla 1.3)} \end{array} \right.$$

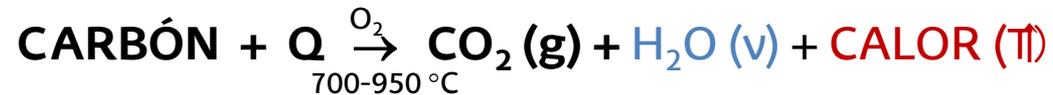
**Tabla 1.3. Valores de "a" en función de la materia volátil (A.
Vian Ortuño, 1994)**

MV	5	10	15	20	25	30	35	40
a	145	130	117	109	103	98	94	80

EL CARBÓN

CARACTERIZACIÓN

– Poder calorífico inferior (PCI)



$$\text{PCI} = \text{PCS} - \lambda_{\text{condensación}} \cdot \frac{9[\text{H}]+w}{100} \quad (\text{kcal/kg})$$

\downarrow
 584 kcal/kg vapor (25 °C)
 (Collieu y Powney, 1977)

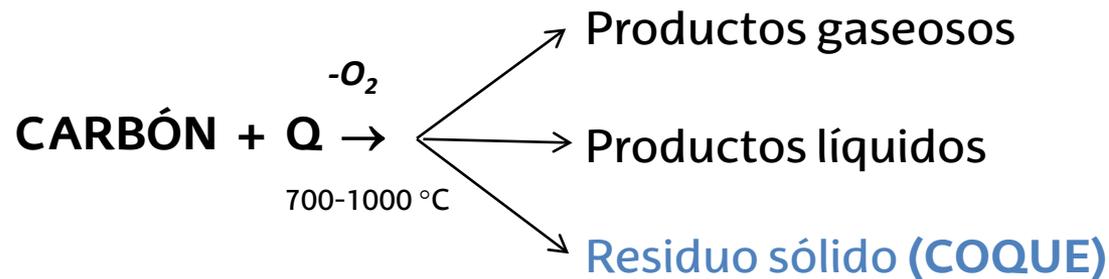
} % H carbón
 } % w (humedad) carbón

} kg vapor/kg carbón

EL CARBÓN

CARACTERIZACIÓN

- **PROPIEDADES COQUIZANTES (AGLOMERANTES)** → se refieren a aquellas propiedades del carbón que derivan de la capacidad de fundir en mayor o menor grado durante su calentamiento, **en ausencia de aire**.



Las propiedades coquizantes dependen del rango del carbón; aunque es necesario efectuar en el laboratorio algunos ensayos y cuyos resultados facilitan información sobre tales propiedades:

- Índice de hinchamiento al crisol
- Índice Roga
- Plastímetro Gieseler
- Dilatómetro Arnu
- Ensayo Gray-King

EL CARBÓN

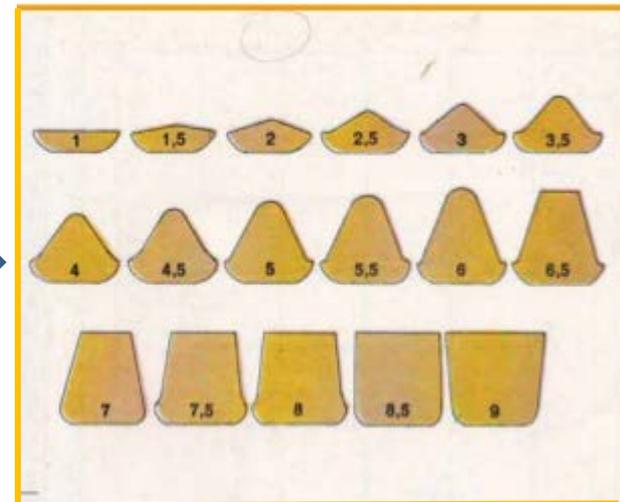
CARACTERIZACIÓN

- PROPIEDADES COQUIZANTES (AGLOMERANTES) - **HINCHAMIENTO AL CRISOL**

Relativo a la medida del aumento de volumen producido en el carbón, cuando se calienta en condiciones estandarizadas, en ausencia de aire.

Carbón seco y molido + Q^{-O_2} → RESIDUO SÓLIDO (COQUE)

En el ensayo se obtienen unos botones de residuo sólido (coque), cuya forma y perfil se compara con la de unos botones estándar, que están clasificados del 1 al 9 (fig. 1.9), atribuyéndole el número de aquel que más se le asemeje.



Valores 7,5-8 indican carbón apropiado para obtener un buen coque (buenas propiedades aglomerantes)

Figura 1.9. Ensayo de índice de hinchamiento al crisol. Modificación del esquema publicado por Alejandro Requena (diapositiva 25) bajo licencia CC BY-NC-SA-4.0 [\[7\]](#)

EL CARBÓN

CARACTERIZACIÓN

PROPIEDADES COQUIZANTES (AGLOMERANTES) - ÍNDICE ROGA (IR)

En algunos países se utiliza este ensayo (prueba de aglutinación).

Carbón seco y molido + Antracita + Q $\xrightarrow{-O_2}$ RESIDUO SÓLIDO (Q_s) } (fig. 1.10)
 Tamizado: a través de un tamiz de mallas (1 mm)
 Prueba de abrasión: tambor giratorio

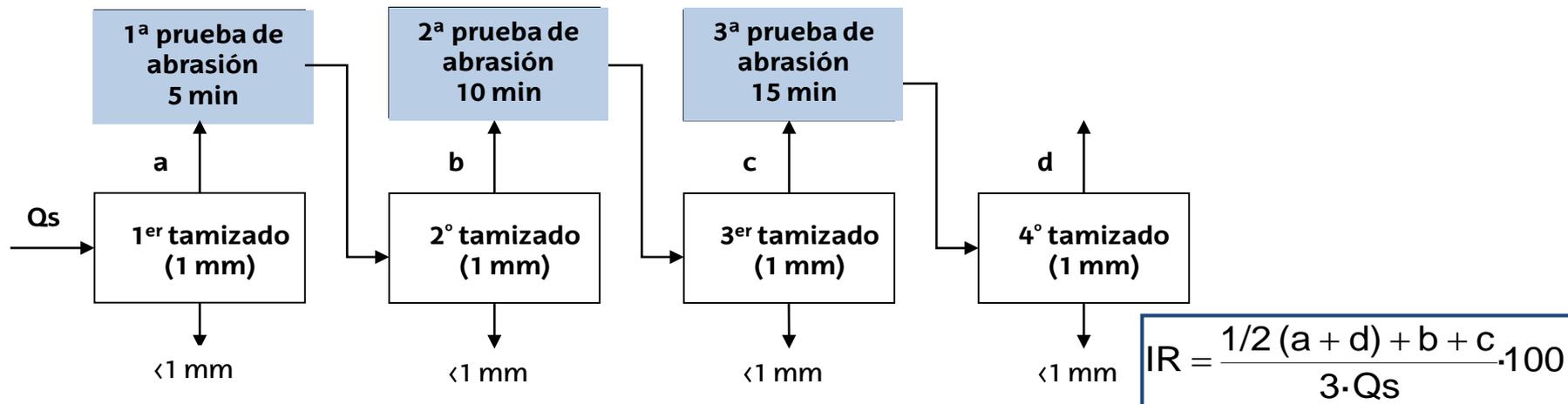


Figura 1.10. Esquema del ensayo de índice Roga.
Imagen propia

(IR adopta valores 0-70)

Valores altos IR indican mejores propiedades aglutinantes del carbón

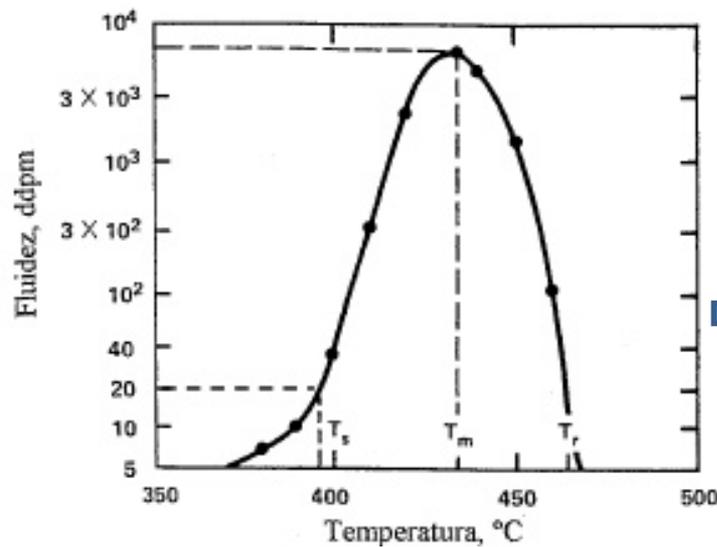
EL CARBÓN

CARACTERIZACIÓN

PROPIEDADES COQUIZANTES (AGLOMERANTES) - PLASTÍMETRO GIESELER

Determina los niveles de fluidez producidos por la variación de velocidad que experimenta un agitador de paletas introducido en la muestra de carbón que se va calentando en un horno, en ausencia de aire.

Carbón seco y molido + Q $\xrightarrow{-O_2}$ RESIDUO SÓLIDO



En la fig. 1.11 se presenta un ejemplo de curva y datos obtenidos

T_s : temperatura de reblandecimiento

T_m : temperatura de máxima fluidez

T_r : temperatura de resolidificación

$T_r - T_s$: intervalo fluidez

* las paletas comienzan a girar, o se detienen definitivamente, cuando alcanzan la velocidad de 10 ddpm (divisiones de dial por minuto)

Figura 1.11. Ejemplo de curva obtenida en el plastímetro Gieseler.

Modificación del esquema publicado por Alejandro Requena

(diapositiva 27) bajo licencia CC BY-NC-SA-4.0 [7]

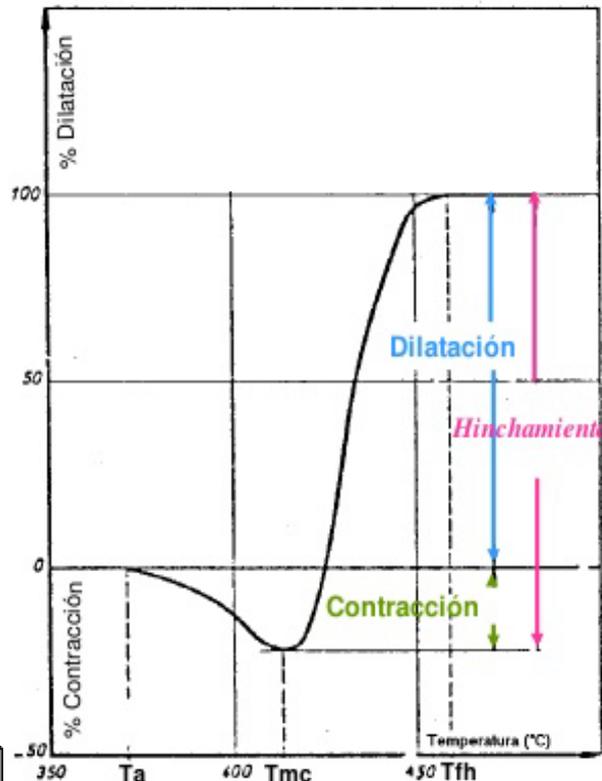
EL CARBÓN

CARACTERIZACIÓN

PROPIEDADES COQUIZANTES (AGLOMERANTES).- DILATOMETRO ARNU

Determina los cambios de volumen que experimenta el carbón, en el intervalo plástico, a medida que se calienta, en ausencia de aire.

Carbón seco y pulverizado (lápiz L= 60 mm, D=6,5 mm) + Q^{-O_2} → RESIDUO SÓLIDO



En la fig. 1.12 se presenta un ejemplo de curva y datos obtenidos

T_a : temperatura de reblandecimiento
 T_{mc} : temperatura de máxima contracción
 T_{fh} : temperatura final de hinchamiento

Figura 1.12. Ejemplo de curva obtenida en el dilatómetro Arnu. Modificación del esquema publicado por Alejandro Requena (diapositiva 28) bajo licencia CC BY-NC-SA-4.0 [7]

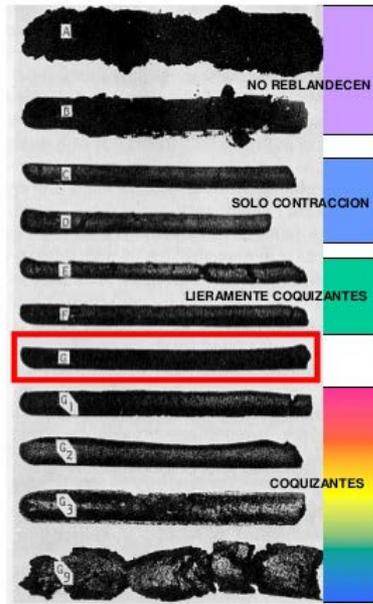
EL CARBÓN

CARACTERIZACIÓN

PROPIEDADES COQUIZANTES (AGLOMERANTES).- ENSAYO GRAY-KING

Mide la capacidad coquizante de un carbón (prueba de aglutinación)

Carbón seco y pulverizado (tubo de cuarzo L= 150 mm, D=23 mm) + Q^{-O_2} → RESIDUO SÓLIDO



Al final del ensayo se saca la barrita de coque formada, se compara su longitud y aspecto con los patrones identificados con distintas letras, (fig. 1.13), atribuyéndose aquella relativa al coque más parecido. Si la barrita es >150 mm, el ensayo se repite incorporando antes al carbón una sustancia inerte en la proporción necesaria ("x" partes de coque y "20-x" partes de carbón) para que tras el ensayo, la barrita sea similar al patrón G (coque tipo).

Según la proporción (x) en la que añade el coque \cong tipo G → (Ensayo Gray-King tipo Gx)

Figura 1.13. Ensayo Gray-King.
Modificación del esquema publicado
por Alejandro Requena (diapositiva
31) bajo licencia CC BY-NC-SA-4.0 [7]

EL CARBÓN

CLASIFICACIÓN DEL CARBÓN

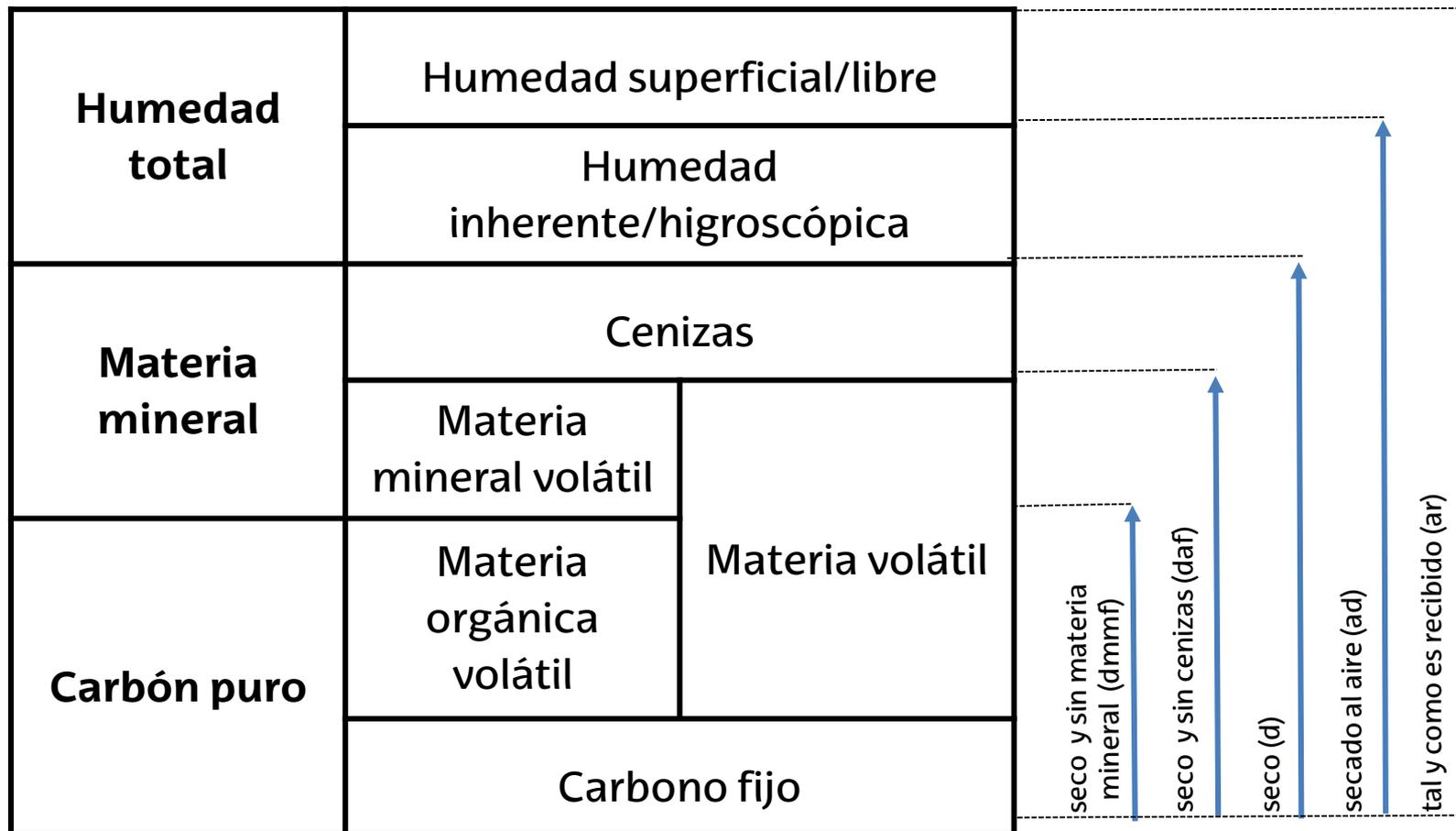


Figura 1.14. Bases de referencia para presentar resultados de caracterización. Imagen propia

EL CARBÓN

CLASIFICACIÓN DEL CARBÓN

Dada la gran variedad de carbones existente, y las diferentes propiedades y composiciones que presentan, es imprescindible un método **de denominación y clasificación** de los mismos, para establecer las características y comportamiento de cada carbón, y comparar los carbones de distintas procedencias. El **objetivo** de las clasificaciones es ordenar los distintos carbones en una forma lógica, de acuerdo con algún parámetro útil.

Se han desarrollado numerosos métodos de clasificación de los carbones, en función de distintos parámetros, tales como por ejemplo:

- **Rango** (visto en el apartado 1.1.)
- **Análisis elemental (dmmf)** clasificación Seyler
- **Contenido en MV (dmmf) y PCS (mmf)** **clasificación ASTM D388**
- **Contenido en MV (daf), PCS (daf) y diversas propiedades coquizantes** **clasificación Internacional**

TRANSPORTE DE CARBÓN

El carbón se puede transportar en la propia mina o hasta el consumidor de diferentes formas:

Cintas transportadoras: utilizadas para transportar carbón desde su lugar de extracción hasta las instalaciones de trituración, molienda o limpieza en la propia mina (fig. 1.15)

Conductos "slurry": actualmente en desuso, se utilizaban para transportar *slurry* o lodo de carbón (carbón triturado + agua)

Camiones: para el transporte en distancias relativamente cortas, bien en la propia mina o desde la mina al lugar de almacenamiento, o hasta el consumidor (fig. 1.16).



Figura 1.15. Transporte de carbón en conductos tipo *slurry* (Arizona, EEUU). Fotografía publicada en Flickr bajo licencia CC0 [8]



Figura 1.16. Transporte de carbón en camión. Fotografía publicada bajo licencia CC0 [9]

TRANSPORTE DE CARBÓN

Para distancias más largas suelen utilizarse el transporte por ferrocarril (fig 1.17) o el transporte marítimo: barcazas (fig. 1.18) y buques.

Tren: uno de los medios de transporte terrestres más utilizado para el transporte del carbón. En EEUU el 70% del carbón se transporta por ferrocarril

Buques: para el transporte marítimo a largas distancias



Figura 1.17. Transporte de carbón median ferrocarril. Fotografía publicada por Martin Routledge en Wwikimedia bajo licencia CC BY-SA 2.0 [\[10\]](#)

Figura 1.18. Transporte de carbón mediante barcaza . Fotografía publicada bajo dominio público [\[11\]](#)



TRANSPORTE DE CARBÓN

El transporte de carbón puede ser incluso más caro que la propia extracción. Por este motivo, las **centrales térmicas** suelen localizarse:

- a) **Cerca de las minas de carbón.** Por ejemplo en la cuenca minera de Asturias y León (Compostilla II y La Robla, ambas en León) o la cuenca de lignitos aragonesa (Andorra, Teruel)
- b) **Localizaciones costeras** cercanas a puertos marítimos, ya que facilita el transporte marítimo de carbón. Es el caso de las centrales del sur de la Península y Levante (Los Barrios, Cádiz; Carboneras, Almería)

Paradójicamente, el carbón consumido hoy en día en algunas centrales españolas, se extrae a miles de km de distancia (fig.1.19)

Figura 1.19. Central térmica de carbón de Andorra (Teruel). Fotografía publicada por Jpgbdn en Wikipedia bajo licencia CC BY-SA 2.0 [\[12\]](#)



TRANSPORTE DE CARBÓN

CADENA LOGÍSTICA DEL CARBÓN: Ejemplo de transporte transoceánico

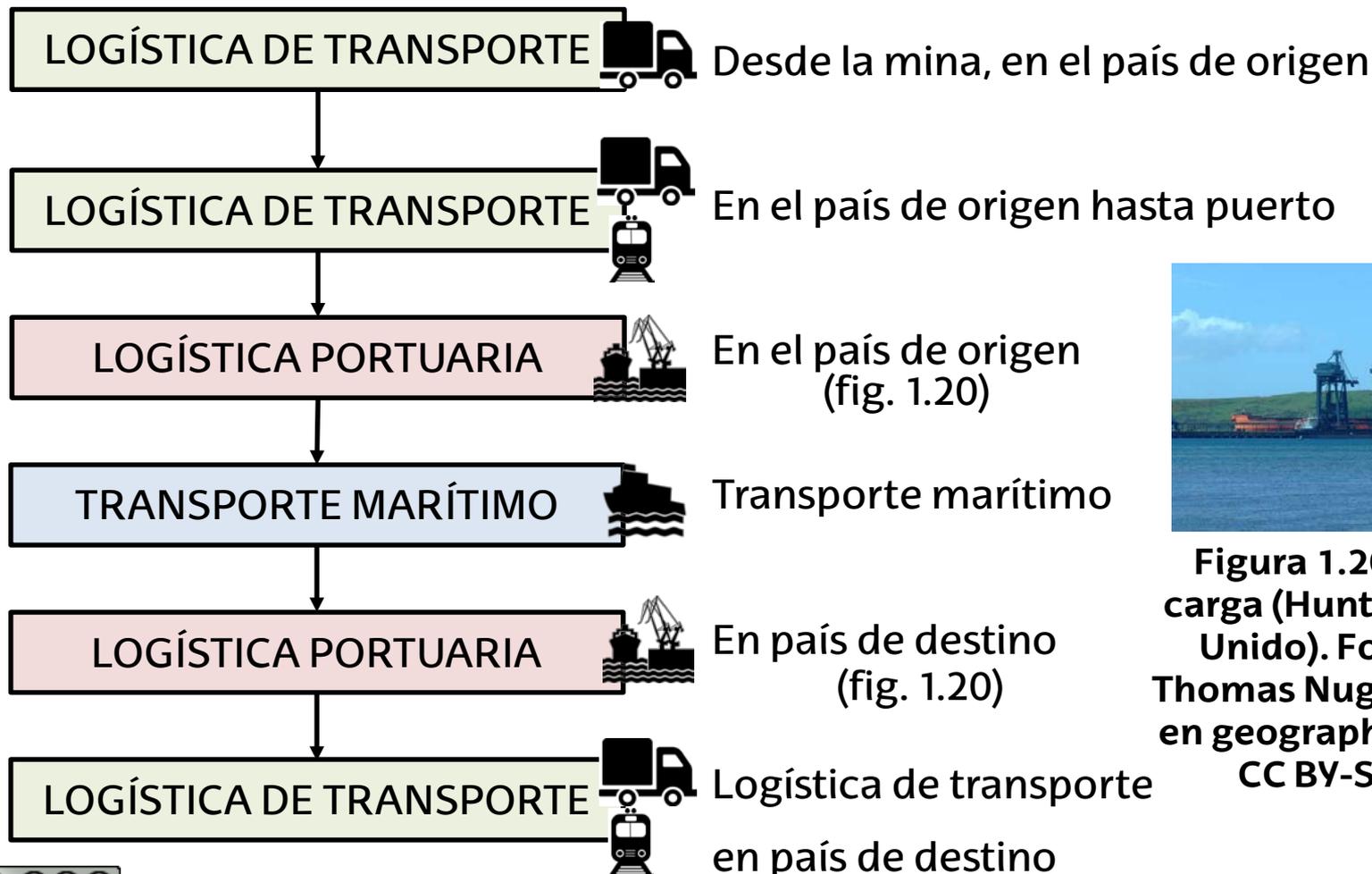


Figura 1.20. Muelle de carga (Hunterston, Reino Unido). Fotografía de Thomas Nugent publicada en geograph bajo licencia CC BY-SA 2.0 [13]

ALMACENAMIENTO DE CARBÓN

TIPOS DE ALMACENAMIENTO

El carbón puede almacenarse en sistemas abiertos (al aire libre) o cerrados

Almacenamiento abierto (al aire libre): suele hacerse en pilas de distintas formas (cónica, longitudinal, anular, etc.), cuando el riesgo de que el carbón se deteriore al aire libre es bajo (tabla 1.4: ventajas y desventajas).

Factores a considerar en el diseño de sistemas:

- Sistemas de drenaje y recogida de agua de lluvia
- Fenómenos meteorológicos: viento y lluvia
- Proximidad de núcleos urbanos, áreas de interés o recursos hídricos

Tabla 1.4. Ventajas y desventajas del almacenamiento de carbón al aire libre

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">- Permiten almacenar grandes volúmenes de carbón- Menor coste que los sistemas cerrados	<ul style="list-style-type: none">- Pérdida de material por erosión del viento y lluvia- Contaminación de otros materiales/carbones por materia particulada- Aumento de coste por sistemas de riego

ALMACENAMIENTO DE CARBÓN

TIPOS DE ALMACENAMIENTO

Almacenamiento al aire libre: en este tipo de sistemas (fig. 1.21) aumenta el riesgo de que se produzca la combustión espontánea del carbón (fig. 1.22)



Figura 1.21. Almacenamiento de carbón al aire libre. Fotografía publicada por Alan Murray-Rust en Wikimedia bajo licencia CC BY-SA 2.0 [\[14\]](#)



Figura 1.22. Combustión espontánea del carbón. Fotografía publicada por Rueter en Wikimedia bajo licencia CC BY-SA 2.0 [\[15\]](#)

ALMACENAMIENTO DE CARBÓN

TIPOS DE ALMACENAMIENTO

Almacenamiento en sistemas cerrados: el carbón se almacena en sistemas cerrados cuando por motivos de calidad o problemas ambientales no puede almacenarse al aire libre. En la tabla 1.5. se resumen las ventajas y desventajas de los sistemas de almacenamiento cerrados

Tabla 1.5. Ventajas y desventajas del almacenamiento de carbón cerrados

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">- Mayor control de pérdidas de material por erosión y lluvia- Minimización de impactos ambientales- Algunos sistemas , por ejemplo los domos, permiten climatización	<ul style="list-style-type: none">- Incremento del coste respecto del almacenamiento al aire libre- Normalmente, los domos, silos y tolvas permiten almacenar un solo producto- Es necesario controlar la aglomeración del producto, especialmente en silos y tolvas

ALMACENAMIENTO DE CARBÓN

TIPOS DE ALMACENAMIENTO

Almacenamiento en sistemas cerrados. Se emplean distintos sistemas en función de la cantidad de carbón almacenar:

- Cantidades relativamente pequeñas, antes de su consumo: silos y tolvas
- Grandes cantidades: domos (fig. 1.23) y hangares (fig. 1.24)



Figura 1.23. Almacenamiento de carbón en domo. Fotografía publicada por Chris Allen en geograph bajo licencia CC BY-SA 2.0 [\[16\]](#)



Figura 1.24. Almacenamiento de carbón en hangar. Fotografía publicada por Jogi don en Wikimedia bajo licencia CC BY-SA 4.0 [\[17\]](#)

ALMACENAMIENTO DE CARBÓN

CAMBIOS EN LOS CARBONES DURANTE SU ALMACENAMIENTO

Durante el almacenamiento del carbón, especialmente en sistemas abiertos, por acción del aire y agentes atmosféricos (viento y lluvia), pueden ocurrir reacciones exotérmicas como la **oxidación lenta** y la **adsorción de humedad**.

Si el calor desprendido no se disipa adecuadamente, puede ocurrir la **combustión espontánea**, al alcanzarse una temperatura crítica a la que se produce el autoencendido (≈ 50 °C en lignitos y hulla subbituminosa).

Factores que influyen en la combustión espontánea:

- La tendencia a la oxidación es mayor cuanto menor es el rango del carbón
- Los carbones más susceptibles de arder espontáneamente son aquellos de reciente extracción (4-6 semanas)
- La velocidad a la que se produce la combustión espontánea aumenta con la temperatura y disminuye con el tamaño de partícula

ALMACENAMIENTO DE CARBÓN

CAMBIOS EN LOS CARBONES DURANTE SU ALMACENAMIENTO

Otras variaciones en las características del carbón:

- Aumento de peso
- Aumento del contenido de O_2
- Aumento de higroscopicidad
- Elevación de la temperatura de ignición
- Disminución del poder calorífico
- Disminución del contenido en hidrógeno
- Disminución de sus propiedades coquizantes
- Reducción de la granulometría media del carbón

ALMACENAMIENTO DE CARBÓN

CAMBIOS EN LOS CARBONES DURANTE SU ALMACENAMIENTO

Factores que influyen en el calentamiento de las pilas (especialmente en sistemas abiertos):

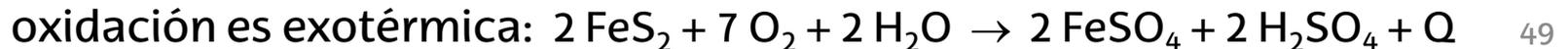
1) El carbón almacenado tiene menor **contenido en humedad** que el correspondiente a su humedad en equilibrio → el carbón adsorbe agua de hidratación (proceso exotérmico), en los siguientes casos:

- Carbón seco que tras un periodo seco y caluroso se expone a la lluvia
- Carbón parcialmente seco sobre el que se vierte carbón húmedo

2) La velocidad de calentamiento es mayor a la de enfriamiento si existe gran superficie de contacto, especialmente para carbones de **granulometría fina**

3) **Factores químicos**, que dan lugar a reacciones exotérmicas:

- Los **ácidos húmicos**, presentes en lignitos o hullas jóvenes, fijan el oxígeno con facilidad, produciendo una gran cantidad de calor
- Ciertas **bacterias** pueden producir reacciones bioquímicas responsables de focos de calor
- La presencia de **azufre**, sobre todo en forma de piritita (FeS_2), cuya oxidación es exotérmica:



ALMACENAMIENTO DE CARBÓN

NORMAS Y RECOMENDACIONES EN EL APILADO DE CARBONES

- 1) El **suelo** sobre el que descansan las pilas debe estar bien nivelado, ser firme, no tener grietas y estar bien drenado
- 2) La **altura de las pilas** debe ser adecuada, lo menor posible (tabla 1.6):
 - Para que el calor se disipe más fácilmente, al controlarse las corrientes de aire que circulan por los huecos
 - Para reducir la fragmentación por aplastamiento de las partículas de la parte inferior, que tienen tendencia a deshacerse en tamaños menores debido al peso que soportan

Tabla 1.6. Alturas de apilamiento recomendadas para carbones

Materia volátil	Tamaño de partícula, Encyclopedía Británica [18]	Altura de las pilas (m)
≥ 18 %	Finos (< 12.5 mm)	< 3,5 m
	Granos (≥ 12.5 mm)	< 5 m
< 18 %	Finos (< 12.5 mm)	< 5 m
	Granos (≥ 12.5 mm)	< 6,5 m

ALMACENAMIENTO DE CARBÓN

NORMAS Y RECOMENDACIONES EN EL APILADO DE CARBONES

- 3) **Evitar la separación natural por tamaños.** En las zonas de tamaños más gruesos se establecen chimeneas de ventilación, mientras que las zonas con partículas pequeñas están peor ventiladas
- 4) **El carbón no debe apilarse durante periodos muy calurosos,** ya que muchos fuegos parecen proceder de este hecho
- 5) **No apilar una carga de carbón demasiado húmedo con otro más seco**
- 6) **Observar periódicamente la temperatura** de las pilas mediante termómetros (separaciones de 2-4 m). Si se encuentra un foco con $T > 60$ °C, ha podido ocurrir combustión espontánea → utilizar agua de riego para apagar el foco. El carbón resultante estará muy húmedo, por lo que habrá que tener cuidado de no mezclarlo con otro carbón muy seco

ALMACENAMIENTO DE CARBÓN

IMPACTOS AMBIENTALES DERIVADOS DEL ALMACENAMIENTO Y MANEJO DEL CARBÓN

- **Contaminación atmosférica** por materia particulada que puede provocar efectos respiratorios debido a su inhalación en los trabajadores y en las personas que viven cerca de las instalaciones de almacenamiento
- **Contaminación de aguas.** El agua de lluvia puede arrastrar los finos de carbón, aumentando la cantidad de sólidos totales en el agua, compuestos ácidos y metales pesados
- **Contaminación de suelos.** Cambios en el uso del suelo, ya que para el almacenamiento de carbón son necesarias grandes extensiones. También pueden producirse vertidos ocasionales y/o infiltración de lixiviados.

Para minimizar estos efectos suelen emplearse sistemas de almacenamiento cerrados