

**CENIZAS VOLANTES DE CARBÓN, UN RESIDUO DE LA
COMBUSTIÓN EN CENTRALES TERMOELECTRICAS:
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DE SUS PROPIEDADES FÍSICAS,
QUÍMICAS Y MORFOLÓGICAS EN EL ÁMBITO
INTERNACIONAL Y REGIONAL**

Carlos Humberto Pinzón Cuta
Jhon Alexander Pérez Meneses

Julio de 2021.

Universidad de Pamplona.
Facultad de Ingenierías y Arquitectura
Ingeniería Civil.

**CENIZAS VOLANTES DE CARBÓN, UN RESIDUO DE LA
COMBUSTIÓN EN CENTRALES TERMOELECTRICAS:
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DE SUS PROPIEDADES FÍSICAS,
QUÍMICAS Y MORFOLÓGICAS EN EL ÁMBITO
INTERNACIONAL Y REGIONAL**

Estudiantes:

Carlos Humberto Pinzón Cuta
Jhon Alexander Pérez Meneses

Trabajo de grado presentado para optar por el título de Ingeniero Civil

Director:

Jacipt Alexander Ramón Valencia
Doctor en Ingeniería Química
Universidad de Murcia

Codirector:

Bladimir Ramón Valencia
Doctor en Ingeniería de Materiales
Universidad del País Vasco

Julio de 2021.

Universidad de Pamplona.
Facultad de Ingenierías y Arquitectura
Ingeniería Civil.

Dedicatoria

Este trabajo es dedicado a nuestros padres, a nuestra familia, a nuestros amigos y a todos aquellos que nos apoyaron en nuestra trayectoria hasta aquí.

Agradecimientos

Al realizar una retrospectiva de nuestra formación profesional, vemos que todo camino y todo proyecto tiene sus dificultades; mas nuestra fe y todas las personas que tenemos a nuestro lado hicieron un importante aporte para la conclusión de nuestros sueños.

Comenzamos a agradecer a Dios que guio nuestros pasos y nos dieron fuerzas para enfrentar diversas situaciones.

Nuestros padres Julio Humberto Pinzón Jiménez, Esperanza Cuta Bolívar, Carmen Meneses y Elauterio Pérez, nuestros hermanos especialmente a Yeidys Pérez, sobrinos y todos nuestros familiares por el apoyo, paciencia, comprensión y amor proporcionado a lo largo de nuestras vidas.

A nuestros grandes y eternos amigos, especialmente a Marlon, Mishel, Omero, Antonio, Yeixon, por hacer que este tiempo en Pamplona haya sido maravilloso. Muchas gracias por la amistad y por los momentos felices compartidos.

Al profesor Jacipt Ramón y al profesor Bladimir Ramón por creer en nuestras capacidades y que con sabiduría supieron lidiar con todas nuestras turbulencias en el desarrollo del proyecto.

A los profesores María Esther Rivera, Néstor Rojas, Ceudiel Iván Mantilla, Oscar Hernández, Henry Lizcano, Edgar Pérez y todos aquellos docentes que hicieron parte de nuestro proceso académico. Muchas gracias por el tiempo, la paciencia, el conocimiento transmitido y por la sabiduría transmitida.

A los docentes Jorge Luis Ortiz Carrillo, Julio Isaac Maldonado, Diego Sánchez y Manuel Contreras por el conocimiento aportado durante el diplomado en Ingeniería Ambiental y Herramientas aplicadas a los Recursos Hídricos.

“Dios es el dueño de todo, debo a Él la oportunidad que tuve de llegar a donde llegué, muchas personas tienen esa capacidad, mas no tienen esa oportunidad. Él me la dio a mí, no sé por qué, pero sé que no puedo desperdiciarla” (Ayrton Senna)

Resumen

Las cenizas volantes de carbón son un desecho proveniente de las centrales termoeléctricas que se obtienen tras la incineración y posterior atrapamiento en los disipadores electrostáticos o mecánicos, estas son acumuladas en vertederos, generando grandes problemas ambientales, daños a la salud y afectación a los ecosistemas circundantes. En consecuencia, en los últimos años ha tomado gran relevancia su estudio y caracterización de tal manera que su control y manejo sean apropiados. Muchas de sus propiedades están relacionadas con el tipo de carbón mineral del cual provienen, debido a que cada etapa fue sometida a periodos, temperaturas y presiones diferentes; el proceso de incineración, el tipo de horno y las temperaturas a las cuales son sometidos. Todas las anteriores están directamente relacionadas con el elemento base de su estructura molecular (el carbono), este tiene la característica de cambiar su formación microscópica y de esta manera obtener propiedades diferentes (alotropía). Las cenizas volantes pueden surgir de la combustión de compuestos orgánicos como la biomasa, los desechos residenciales y el carbón mineral, este último es el recurso natural que más partículas volátiles genera con respecto a las otras dos y la segunda fuente de energía más contaminante en el mundo. Por ello en este texto se hace una revisión bibliográfica en la cual se reúne información referente a sus propiedades químicas, morfología, propiedades físicas y sus usos en el ámbito mundial y regional; para así aportar al lector información valiosa que le facilite reconocer sus propiedades e identificar las posibles soluciones que permitan mitigar el impacto que estas causan al medio ambiente.

Tabla de Contenidos

1. Introducción	10
2. Cenizas volantes de carbón, un residuo de la combustión en centrales termoeléctricas: revisión bibliográfica de sus propiedades físicas, químicas y morfológicas en el ámbito internacional y regional	12
2.1. Generalidades.....	12
2.1.1. El carbono	12
2.1.2. Formas alotrópicas del carbono.....	13
2.1.2.1. Alotropía:.....	14
2.1.2.2. El diamante	15
2.1.2.3. El grafito	16
2.1.2.4. El fullereno	17
2.1.2.5. Los nanotubos de carbono	18
2.1.3. El carbón	19
2.1.3.1. Origen del carbón.....	21
2.1.3.2. Tipos del carbón.....	23
2.1.3.3. El carbón en Colombia	25
2.1.4. La biomasa	27
2.1.4.1. Biomasa en Colombia	30
2.1.5. Residuos sólidos municipales.....	32
2.2. Centrales termoeléctricas.....	34
2.3. Cenizas volantes de carbón (CFA).....	36
2.3.1. Características de las cenizas volantes de carbón.....	37
2.3.1.1. Composición química.....	38
2.3.1.2. Morfología superficial de las cenizas volantes de carbón	40
2.3.1.3. Estructura cristalina.....	43
2.3.1.4. Propiedades físicas	45
2.3.2. Soluciones a los contaminantes generados por las cenizas volantes de carbón	49
2.3.3. Efectos de las cenizas volantes de carbón.....	54
2.3.3.1. Efectos en el cuerpo humano.....	56

3. Conclusiones	58
Lista de referencias.....	60

Lista de tablas

Tabla 1. Clasificación de los carbones según la ASTM.....	25
Tabla 2. Principales cuencas mineras de Colombia.	26
Tabla 3. Composición química de las cenizas volantes residuos sólidos municipales.	33
Tabla 4. Composición química de las cenizas volantes producto de diferentes tipos de carbón.....	39
Tabla 5. Composición química de las cenizas volantes de la central termoeléctrica Termotasajero S.A. ESP	40
Tabla 6. Proporción de la fase mineral en las cenizas volantes de carbón.	44
Tabla 7. Resumen de algunas propiedades físico-químicas de las cenizas volantes.....	46
Tabla 8. Gradación del tamaño de particular de las cenizas volantes de Termotasajero. .	48
Tabla 9. Ventajas y desventajas de los métodos clásicos de hidrotermal.	50

Lista de figuras

Figura 1: formas alotrópicas del carbono a) diamante y b) grafito.	15
Figura 2. Estructura cristalina del diamante.	16
Figura 3. Estructura cristalina del grafito.	17
Figura 4. Estructura cristalina del Fullerenos.	18
Figura 5. Estructura cristalina de los nanotubos de carbono.	19
Figura 6. Proyección del consume mundial de energía. Fuente: (BP review 2014)	20
Figura 7. Combustión mundial de carbón, Asia y Oceanía, Europa y Norte América.	21
Figura 8. Formación Geológica de sedimentos de Carbón. Fuente:	22
Figura 9. Tipos de carbón mineral a) Turba b) lignito c) Hulla d) antracita.	25
Figura 10. Ubicaciones geográficas de los yacimientos en Colombia.	29
Figura 11. Producción Agrícola en Colombia.	31
Figura 12. recuperación y aprovechamiento de las cenizas volantes producto de los desechos municipales.....	33
Figura 13. Sistema de generación de energía en una central termoeléctrica.	35
Figura 14. Diagrama de flujo del Sistema de combustión.	36
Figura 15. Partículas esféricas de cenizas volantes de carbón.....	42
Figura 16. Microscopia electrónica de barrido de a) arcilla y b) cenizas volantes de carbón de la central termoeléctrica Termotasajero.....	43
Figura 17. Electroscopía de difracción de rayos X (EDS) de las cenizas volantes de carbón.....	45
Figura 18. Distribución del tamaño de particular de las cenizas volantes de carbón.....	48
Figura 19. Utilización porcentual potencial de las cenizas volantes de carbón.....	54
Figura 20. Efectos del CFA en el suelo, el agua, el aire y las tierras agrícolas fértiles. ...	55

1. Introducción

La producción mundial de energía eléctrica ocasiona grandes cantidades de desechos que afectan el medio ambiente. El 40% de esta energía es generada empleando el carbón como material de combustión. Las cenizas volantes son el desecho atrapado en los precipitadores electrostáticos del proceso de incineración del carbón, que ocurre al interior de las calderas de las centrales termoeléctricas (Wei, Zhang, Cui, Han, & Li, 2019) (Yang, y otros, 2018). Anualmente se obtiene 750 millones de toneladas de cenizas volantes, de las cuales una cuarta parte se reutiliza, mientras que el porcentaje restante se acumula en vertederos o se dispersa en el ambiente. Como consecuencia, se desencadenan problemáticas como la contaminación del suelo, subsuelo, el aire y el agua, así como desastres geológicos y afectaciones a la salud del ser humano (Gollakota, Volli, & Shu, 2019).

Por tal razón, se está realizando un esfuerzo considerable en todo el mundo en la investigación sobre la reutilización de estos desechos como fuente de materias primas alternativas para producir nuevos materiales, como cemento, concreto, zeolitas, vitrocerámica, adsorbentes para limpieza de gases de combustión, agregados ligeros, subbase de carreteras y ladrillos de arcilla (Li, y otros, 2019) (Esmeray & Atis, 2019) (Koshy, Dondrob, Hu, Wen, & Meegoda, 2019) (Elmrabet, Harfi, & Youbi, 2019) (Lieberman, y otros, 2018) (Luo, y otros, 2017). Antes es indispensable conocer de donde provienen las cenizas volantes, ya que sus posibles fuentes son el carbón mineral, la biomasa y los residuos municipales; cada uno de ellos aporta propiedades y problemáticas particulares. La fuente que más cenizas volantes genera es el carbón

mineral, este se crea luego de la sedimentación de materia orgánica vegetal tras largos periodos, altas presiones y temperaturas. Dentro de los tipos de carbón existentes están la turba, el lignito, la hulla, la antracita y el coque, cada una con periodos de formación y por consiguiente propiedades diferentes (León Delgado, 2006).

En esta revisión bibliográfica se reúne información referente a las propiedades químicas, morfología, propiedades físicas y los usos de las cenizas volantes de carbón en el mundo y en Norte de Santander; para así aportar al lector información valiosa que le facilite reconocer sus propiedades e identificar las posibles soluciones que permitan mitigar el impacto que estas causan al medio ambiente.

2. Cenizas volantes de carbón, un residuo de la combustión en centrales termoeléctricas: revisión bibliográfica de sus propiedades físicas, químicas y morfológicas en el ámbito internacional y regional

2.1. Generalidades.

Las cenizas volantes del carbón son un desecho de baja densidad, por consiguiente, volátiles. Que se obtiene después de la combustión de materiales orgánicos, generalmente de origen vegetal, es decir, no provienen de derivados del petróleo (Ju, Meng, Han, Lin, & Jiang, 2021). En este apartado se hace una descripción teórica del carbono y los principales generadores de cenizas volantes, entre ellos están el carbón mineral, la biomasa, los residuos sólidos industriales, animales y municipales, que ayudará al lector a reconocer algunas particularidades de las cenizas volantes que se derivan de su composición química, su estructura molecular, tipo de enlace, su fuente de procedencia e incluso las temperaturas de incineración.

2.1.1. El carbono

El carbono es un elemento químico presente en gran proporción en muchas sustancias existentes, posee un número atómico de 6, lo que hace que en su último nivel de energía tenga cuatro electrones de valencia, lo anterior permite que se enlace con facilidad con otros elementos. El carbono se une con otros átomos con enlace covalente, es decir, comparte los electrones de su ultimo nivel de energía aprovechando las fuerzas

de cohesión de los núcleos y los electrones de los átomos (Pinzón Cuta, Jaimes Alvarado, & Ramón Valencia, 2019).

Como se comparten electrones del último nivel, exista una ubicación espacial en que en que las fuerzas de repulsión entre los electrones y las de atracción del protón se equilibran, generando enlaces con alta direccionalidad. Esto genera propiedades en los materiales que poseen este tipo de enlace tales como:

- Son sólidos a temperatura ambiente
- Alta dureza
- Puntos de fusión elevados
- Insolubilidad en disolventes comunes
- Baja conducción eléctrica
- Baja conducción térmica.

Adicionalmente, al formar cadenas produce moléculas importantes como los aminoácidos, los azúcares, las proteínas y en la naturaleza crea alotropías como el diamante, el grafito, el grafeno, los fullerenos y los nanotubos de carbono (Askeland, Fulay, & Wright, 2013).

2.1.2. Formas alotrópicas del carbono

Es importante familiarizarse con términos como alotropía, estructura molecular y cristalinidad, para entender de donde provienen las propiedades de los materiales que contienen carbono es su composición química y como se aprovechan durante su vida útil y después de ella (Lin, Zhang, Zhang, & Klappenberger, 2018).

2.1.2.1. Alotropía:

Es la capacidad de algunos materiales de poseer estructuras moleculares diferentes. Otra definición de alotropía puede ser, sustancias de la misma composición química presentan diferentes estructuras cristalinas. Cabe resaltar, que la estructura micrométrica de los materiales está compuesta por átomos, estos se unen formando sustancias y/o moléculas. Una organización mayor de las anteriores permite la formación de estructuras cristalinas o amorfas, si la estructura es organizada y de largo alcance se denomina estructura cristalina (Galimberti, Agnelli, & Cipolletti, 2017).

La anterior distribución molecular, se caracteriza por poseer mejores propiedades físicas, químicas, térmicas, mecánicas, etc. En comparación con los materiales que tienen estructura amorfa. Lo anterior debido a que el factor de empaquetamiento de los átomos, la rigidez y el tipo de enlace existente de los materiales cristalinos son mucho más altos o fuertes (Wandelt, 2018).

Se conocen 5 formas alotrópicas del carbono, su variación depende de la temperatura y la presión a la que se ve sometido este elemento. Las formas alotrópicas del carbono tienen la misma composición química ya que son carbono puro y sus propiedades y características varían según el arreglo que presenten sus estructuras. Adicionalmente, la tetravalencia del carbono permite que este forme compuestos distintos con estructuras diferentes (Thomas & Hanna, 2017) (Ripp, Hambitzer, Zinck, & Borck, 2009), en la Figura 1 se muestran dos de las alotropías del carbono. Las alotropías del carbono son:

- Diamante
- Grafito
- Fullerenos
- Grafeno
- Nanotubos de carbono

2.1.2.2. El diamante

El diamante es el material más duro de la naturaleza, esto se debe a que cada átomo de carbono está unido a otros cuatro mediante enlace covalente, este enlace es direccional y por ende es fuerte. Adicionalmente, debido al tipo de enlace el punto de fusión es alto, así mismo es su rigidez (módulo de elasticidad) y su dureza. Asimismo, a medida que el material se calienta, genera vibraciones con mayor energía en sus átomos (Bogdanowicz, 2015).



a)



b)

Figura 1: formas alotrópicas del carbono a) diamante y b) grafito. Fuente: autor

Cuando los enlaces son rígidos las vibraciones se transfieren de manera eficiente entre los átomos y por eso la conductividad térmica del diamante es alta. Debido a que todos sus electrones de valencia se comparten con los átomos de carbono vecinos su conductividad eléctrica es baja. En Figura 2 se observa la organización molecular del diamante (Bogdanowicz, 2015).



Figura 2. Estructura cristalina del diamante. Fuente: autor

2.1.2.3. El grafito

El grafito al igual que el diamante, está compuesto de átomos de carbono, pero sus propiedades difieren debido a su estructura cristalina, específicamente los enlaces existentes en ella. En el grafito, los átomos se arreglan en capas sobre capas. En cada capa, los átomos se ordenan en un patrón hexagonal, en este arreglo cada átomo de carbono está enlazado covalentemente solo a otros tres y el cuarto enlace es el que permite la unión entre capas, pero este es de Van der Waals véase la Figura 3. Este último es un enlace con energía de unión baja en comparación con los otros tipos de uniones atómicas (Pohanish, 2017).

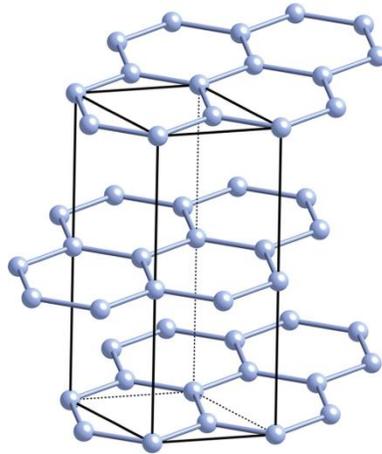


Figura 3. Estructura cristalina del grafito. Fuente: (Baker , 2018)

El enlace débil y la separación entre capas presentes en la estructura, provocan que el grafito adquiera propiedades como baja densidad, es conductor eléctrico y presenta alto punto de fusión, aunque menor en comparación con el diamante. Adicionalmente, esta particularidad permite que las capas se deslicen una sobre otra, acción que es aprovechada en las minas de los lápices y con lo cual se logra realizar el proceso de escritura (Caenn, Darley, & Gray, 2017).

2.1.2.4. El fullereno

Cada molécula de buckminsterfullereno contiene 60 átomos de carbono, cada uno de estos átomos tienen dos enlaces sencillos y uno doble. Estas alotropías pueden tener otros átomos dentro de ellos, parecen ser bastante fuertes y tienen propiedades magnéticas y superconductores interesantes, lo que les otorga propiedades fotovoltaicas y les permite encapsular moléculas específicas usadas como medicina, Por otro lado, se ha encontrado que su capacidad de adsorción de energía es elevada, por consiguiente, se

están empleando como material para paneles solares (Moreira, Guerreiro, Brandão, & Sales, 2015) (Holtrop, Visscher, Jupp, & Slootweg, 2020). Esta alotropía se puede observar en la Figura 4.

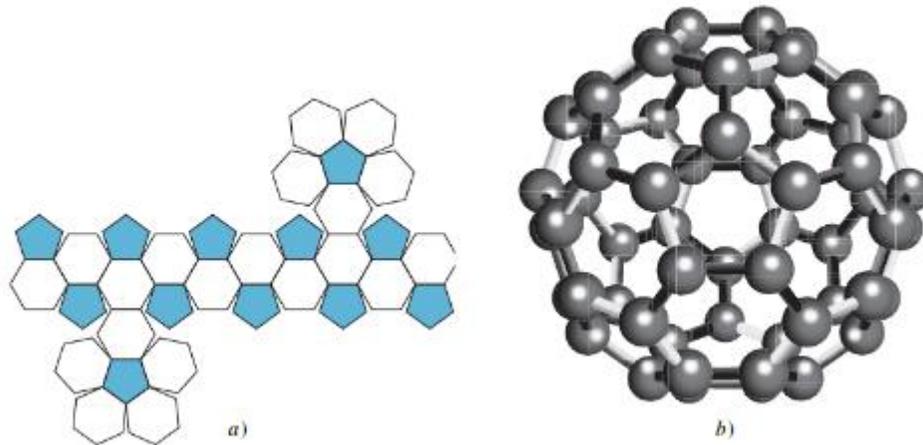


Figura 4. Estructura cristalina del Fullerenio. Fuente: (Askeland, Fulay, & Wright, 2013)

2.1.2.5. Los nanotubos de carbono

Una hoja sencilla de grafito, conocida como grafeno, puede enrollarse en distintas direcciones para producir nanotubos con distintas configuraciones. Los nanotubos de carbono generalmente son de 1 a 25 nm de diámetro y están en el orden de micrómetros de longitud. Al igual que en las otras alotropías la configuración de la estructura del nanotubo define sus propiedades (Verma & Goh, 2019). Actualmente se están empleando para endurecer y hacer más rígidos a los polímeros y como puntas para microscopios de fuerza atómica.

Generalmente presentan alta resistencia mecánica, son capacitores eléctricos y pueden ser conductores o semiconductores según su configuración (Rakhi, 2019)

(Sengupta, 2018). A continuación se observa la estructura cristalina de los nanotubos de carbono en la Figura 5.

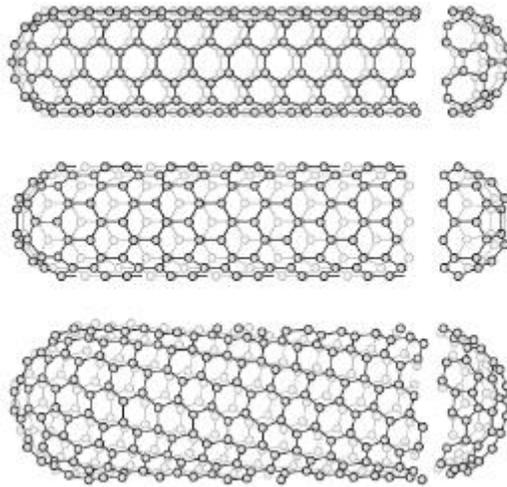


Figura 5. Estructura cristalina de los nanotubos de carbono. Fuente: (Askeland, Fulay, & Wright, 2013)

2.1.3. El carbón

Según la química del carbón, este mineral es un tipo de compuesto orgánico macromolecular formado de múltiples unidades estructurales orgánicas estructuralmente idénticas, pero no completamente iguales; enlazados por puentes alifáticos o heteroalifáticos. La unidad de estructura orgánica incluye anillos aromáticos fusionados y grupos de cadenas laterales. También, algunas sustancias de bajo peso molecular, incluidos principalmente hidrocarburos alifáticos y compuestos de cadena que contienen oxígeno, que se unen con estructuras macromoleculares mediante enlaces de puente de hidrógeno y enlace de van der Waals (Miao, Li, Meng, Li, & Yang, 2021).

Desde el punto de vista mineralógico, el carbón es una roca sedimentaria orgánica que contiene carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y azufre, contiene además, dióxido de carbono y metano; compuestos aceitosos, como alquitrán y brea, que a su vez contienen amoniaco, tolueno, naftas y creosotas. Las proporciones de la composición química y mineralógica del carbón puede variar en función del lugar del cual se extraiga, debido a que las rocas presentes en las zonas y la vegetación de cada sitio es diferente (Corona-Esquivel, Tritlla, Benavides-Muñoz, Piedad-Sánchez, & Ferrusquía-Villafranca, 2006) (Shen, y otros, 2021).

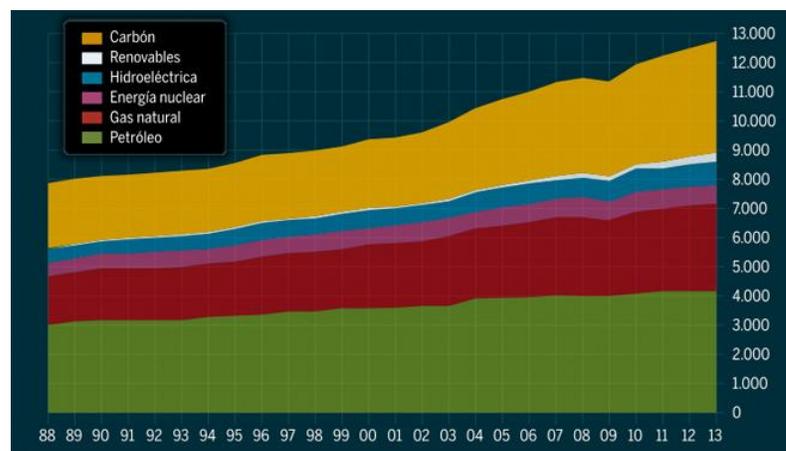


Figura 6. Proyección del consume mundial de energía. Fuente: (BP review 2014)

Adicionalmente, el carbón mineral es el combustible fósil con mayor abundancia en la corteza terrestre, tiene alto poder calorífico, su extracción y transporte son más eficientes y económicas con relación a otras fuentes de energía no renovables; por consiguiente, el carbón es una de las fuentes de energía fósiles más importantes en el presente y en un futuro inmediato en el mundo, solo en el año 2018 la extracción mundial de carbón alcanzo las 8,013 mil millones de toneladas y el consumo significó el 27, 2%

del consumo total de energía primaria (Zhou, y otros, 2021) (Liu, y otros, 2021) (Gan, y otros, 2021).

Por otro lado, las industrias que emplean el carbón como combustible son responsables de hasta el 45% de las emisiones de relacionadas con el carbono y además es uno de los mayores contribuyentes al deterioro del medio ambiente, ya que en las emisiones se encuentran Mg, As, SO₂ y NO_x causantes de la lluvia acida (Belviso, 2018).

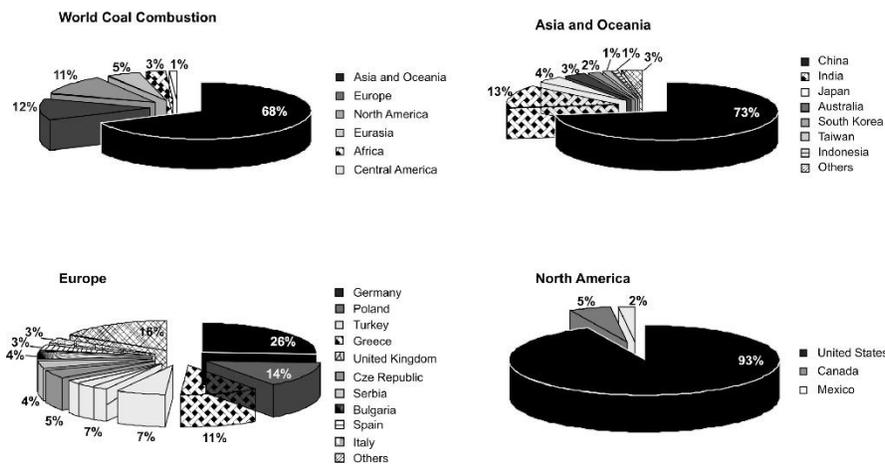


Figura 7. Combustión mundial de carbón, Asia y Oceanía, Europa y Norte América.

Fuente: (Belviso, 2018).

2.1.3.1. Origen del carbón

El carbón es un mineral de origen vegetal y se formó geológicamente (diagénesis) al sedimentarse con algunas otras rocas que contenían arcillas, limos y arenas, y acumularse durante un tiempo prolongado a alta temperatura y presión en depósitos denominados turberas. Los movimientos tectónicos, el tiempo de sedimentación y las presiones provocadas por la acumulación de materia vegetal y el efecto de la gravedad

ocasionaron que estos yacimientos se desplazaran a mayor profundidad. Debido a lo anterior los restos vegetales ahora denominados turba se degradaron y por consiguiente se produjeron mutaciones en su composición química debido a la liberación de carbono y metano presentes en la estructura molecular de las plantas vegetal (León Delgado, 2006).

También, se generaron cambios físico-mecánicos que van desde cambio de color, incremento en la dureza, solidez en la consistencia mineral, densidad y cambio en la fractura. El hecho que el carbón provenga de sustancias vegetales es evidente al analizar los diferentes tipos de carbón. Por ejemplo, los lingóticos se muestran de color café, tienen baja dureza y se observa presencia de estructura vegetal a simple vista. Por otro lado, en los bituminosos se pueden evidenciar estructuras como semillas y algunas trazas de tejido celular. En el carbón del tipo antracita se aprecia incremento en la dureza, su color es negro brillante y se observa poca presencia de material (Corona-Esquivel, Tritlla, Benavides-Muñoz, Piedad-Sánchez, & Ferrusquía-Villafranca, 2006).

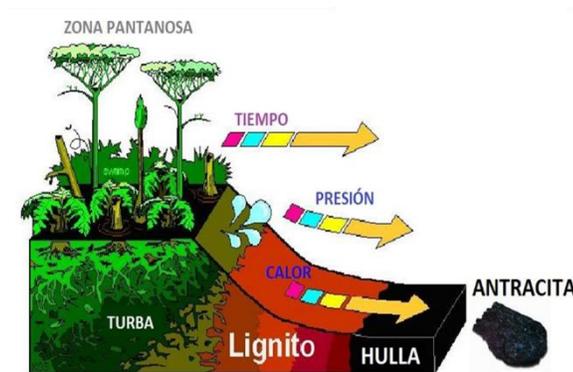


Figura 8. Formación Geológica de sedimentos de Carbón. Fuente: (Pinzón Cuta, Jaimes Alvarado, & Ramón Valencia, 2019)

2.1.3.2. Tipos del carbón

El carbón se clasifica con el objetivo de definir su rendimiento al ser empleado en determinadas áreas o aplicaciones, y con base en lo anterior se establece su precio. El incremento en los usos industriales hace necesaria una clasificación más detallada, por lo que se han desarrollado sistemas basados en combinaciones de las características visuales y microscópicas, así como de las propiedades físicas y químicas, principalmente por su poder calorífico. Cabe resaltar que, a mayor contenido de carbono en su composición química, mayor grado de formación se tiene, lo que repercute en mayor pureza y mejores propiedades físicas, químicas, térmicas y mecánicas. Existe diferentes de tipos de carbón, que a continuación se especifican con más detalles con relación a sus propiedades físico-químicas (León Delgado, 2006).

- **Turba:** Posee un 55% de carbono, lo que ocasiona que este tipo de carbón sea muy baja calidad, este es el primer tipo de carbón que se forma, su color es verde pardo y al momento de su extracción todavía contiene agua. Por ende, debe ser secado antes de quemarse. Cuando arde genera mucho humo y ceniza (Pinzón Cuta, Jaimes Alvarado, & Ramón Valencia, 2019).
- **Lignito:** Se obtiene fruto de la compresión de la turba, es de color negro y generalmente su textura es similar a la de la madera de la que proviene, su contenido de carbono esta entre el 60% y el 75%, además, es un combustible de calidad media y generalmente se destina como combustible de las turbinas las plantas de generación de electricidad (Pinzón Cuta, Jaimes Alvarado, & Ramón Valencia, 2019).

- **Hulla:** Es un mineral duro, negro, opaco y graso, contiene entre el 75% y el 85% de carbono, se forma cuando se comprimen los yacimientos de lignito, posee un alto poder calorífico que lo hace ideal para la producción de energía en las centrales térmicas (Pinzón Cuta, Jaimes Alvarado, & Ramón Valencia, 2019).
- **Antracita:** Se deriva de la transformación de la Hulla, es el mejor de todos los tipos de carbón, con porcentajes de carbono que pueden llegar hasta el 95%, es el menos contaminante, y el que tiene mayor poder calorífico, se torna de color negro, brillante y tiene alta dureza, se usa en calderas de calefacción para viviendas y para generar electricidad (Pinzón Cuta, Jaimes Alvarado, & Ramón Valencia, 2019).
- **El coque,** es el residuo de la destilación del carbón. Estructuralmente el coque es un compuesto celular, poroso. Las propiedades físicas y químicas del coque metalúrgico, así como de su composición, dependen del carbón usado y de la temperatura de coquización (Pinzón Cuta, Jaimes Alvarado, & Ramón Valencia, 2019).

En la Figura 9, se pueden observar los diferentes tipos de carbón e incluso se puede evidenciar hay diferencias físicas relacionadas con el color y el contenido de material orgánico.

Tabla 1. Clasificación de los carbones según la ASTM. Fuente: (León Delgado, 2006)

<i>Tipo de carbón</i>	<i>% de carbono</i>	<i>Poder calorífico (cal/gr)</i>
Turba	55,44	4500/6000
Lignito	72,95	6000/7000
Bituminoso (Hulla)	84,24	7000/8000
Antracita	93,50	>8000

La ASTM emplea el contenido de carbón fijo y materia volátil en base seca para clasificar los diferentes tipos de carbón. Teniendo en cuenta las anteriores el carbón se puede clasificar como se muestra en la Tabla 1.

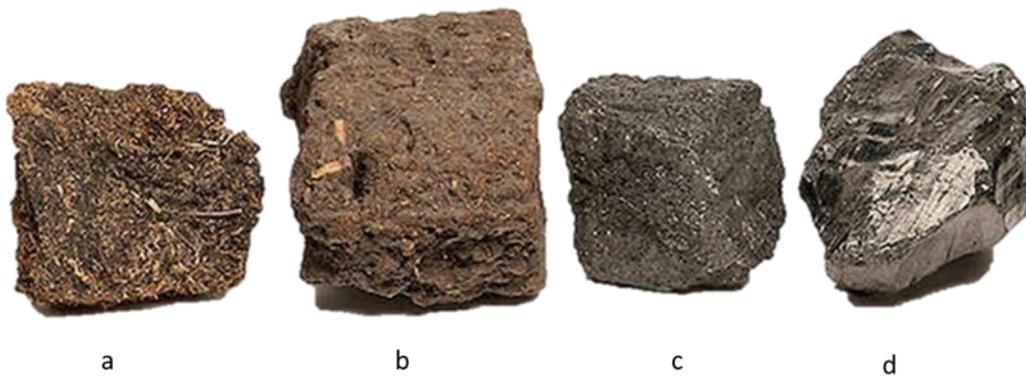


Figura 9. Tipos de carbón mineral a) Turba b) lignito c) Hulla d) antracita. Fuente: (Pinzón Cuta, Jaimes Alvarado, & Ramón Valencia, 2019)

2.1.3.3. El carbón en Colombia

En América Latina, Colombia tiene las mayores reservas de carbón bituminoso (térmico y coquizable) de calidad superior que se extraen a cielo abierto o en minas subterráneas. Adicionalmente, Colombia es el cuarto exportador de carbón más grande

del mundo según la Agencia Internacional de Energía (AIE) (Gómez Rojas, Blandón, Perea, & Mastalerz, 2020). También se sabe que la mayor reserva y producción de este mineral en el país se encuentra en la costa norte, siendo la Guajira el departamento que representa la producción más alta y el Cesar el departamento con mayor reserva de carbón (Akinyemi, y otros, 2021).

Las regiones con potencial carbonífero en Colombia tienen cuencas junto a los puertos marítimos como lo son los departamentos de la Guajira, Cesar y Córdoba, y al interior del país cerca de las zonas industriales en las cuales se emplea este mineral como combustible, como lo son los departamentos de Cundinamarca, Boyacá, Antioquia, Valle y los Santanderes (Huang, y otros, 2019). En la Tabla 2 se resume la información de los carbones de las siete zona carboníferas más importantes del país, el tipo de producción predominante de carbón y su uso final .

Tabla 2. Principales cuencas mineras de Colombia. Fuente: (Huang, y otros, 2019) & (Gómez Rojas, Blandón, Perea, & Mastalerz, 2020)

<i>Región</i>	<i>Producción predominante de carbón</i>	<i>Uso final</i>
La Guajira	Carbón de rango medio	Exportar
Cesar	Carbón bituminoso C, altamente volátil	Exportar
Antioquia-Viejo Caldas	Carbón de rango medio y bajo	Carbón térmico de uso domestico
Huila-Tolima	Carbón de rango medio y bajo	Carbón térmico para uso domestico

Boyacá	Carbón metalúrgico de alto rango	Carbón térmico y coquizable para doméstico y exportación
Cundinamarca	Carbón de alto rango	Carbón térmico y coquizable para doméstico y exportación
Córdoba-Norte de Antioquia	Carbón de rango medio	Carbón térmico para uso doméstico y exportación
Norte de Santander	Carbón de alto rango	Carbón térmico y coquizable para doméstico y exportación
Santander	Carbón de alto rango	Carbón térmico y coquizable para doméstico y exportación
Valle del Cauca	Carbón de rango medio y bajo	Carbón térmico para uso domestico
Cauca	Carbón de rango medio y bajo	Carbón térmico para uso domestico

El carbón se encuentra en las tres cordilleras de los Andes colombianos: Occidental, Central y Oriental. En La Guajira, Cesar y Córdoba - Norte de Antioquia, existen grandes y medianas operaciones a cielo abierto como Cesar y La Guajira que utilizan las últimas tecnologías mineras; estas operaciones son eficientes y competitivas internacionalmente. En cambio, en el interior del país, Antioquia, Caldas, Valle del Cauca - Cauca, Cundinamarca, Boyacá y Norte de Santander, el carbón se explota en pequeñas minas subterráneas por métodos manuales y semimecanizados. En la Figura 10 se muestra la distribución de los yacimientos de carbón en Colombia (Gómez Rojas, Blandón, Perea, & Mastalerz, 2020).

2.1.4. La biomasa

El incremento constante del consumo de combustibles y los daños al medio ambiente, la capa de ozono, el cambio climático, etc. Ha provocado que esta industria busque alternativas para reemplazar el diésel proveniente de fuentes de energía fósiles; es

ahí donde aparece el biodiesel como una solución viable que permita mitigar algunos de los efectos mencionados con anterioridad y adicionalmente los costos de producción y contribuir con la economía circular (Vargas, Ospina, Neves, Tarelho, & Nunes, 2021) (Raza, y otros, 2021). Las centrales eléctricas que funcionan con biodiesel como combustible ya representan el 16% del consumo de energía en el mundo y se plantea que llegue hasta el 50% (Fořt, y otros, 2021).

La energía de extraída de la biomasa o bioenergía se considera como una fuente de energía versátil, debido a que la biomasa se puede procesar de tal manera que se obtengan combustibles sólidos, líquidos y gaseosos. Existen muchas formas de convertir la biomasa en energía eléctrica, algunas de ellas son la gasificación, la pirolisis y digestión anaeróbica; de estas el proceso más rentable y viable comercialmente para obtener combustible es la gasificación (Gamarra Quintero, Díaz Gonzalez, & Pacheco Sandoval, 2021).

En muchos lugares del mundo las cenizas volantes de biomasa están caracterizadas como residuos sólidos industriales y no hay información concisa acerca de su manejo; por tanto, su disposición final será en vertederos. Lo que repercute en problemas económicos, ambientales y sociales.

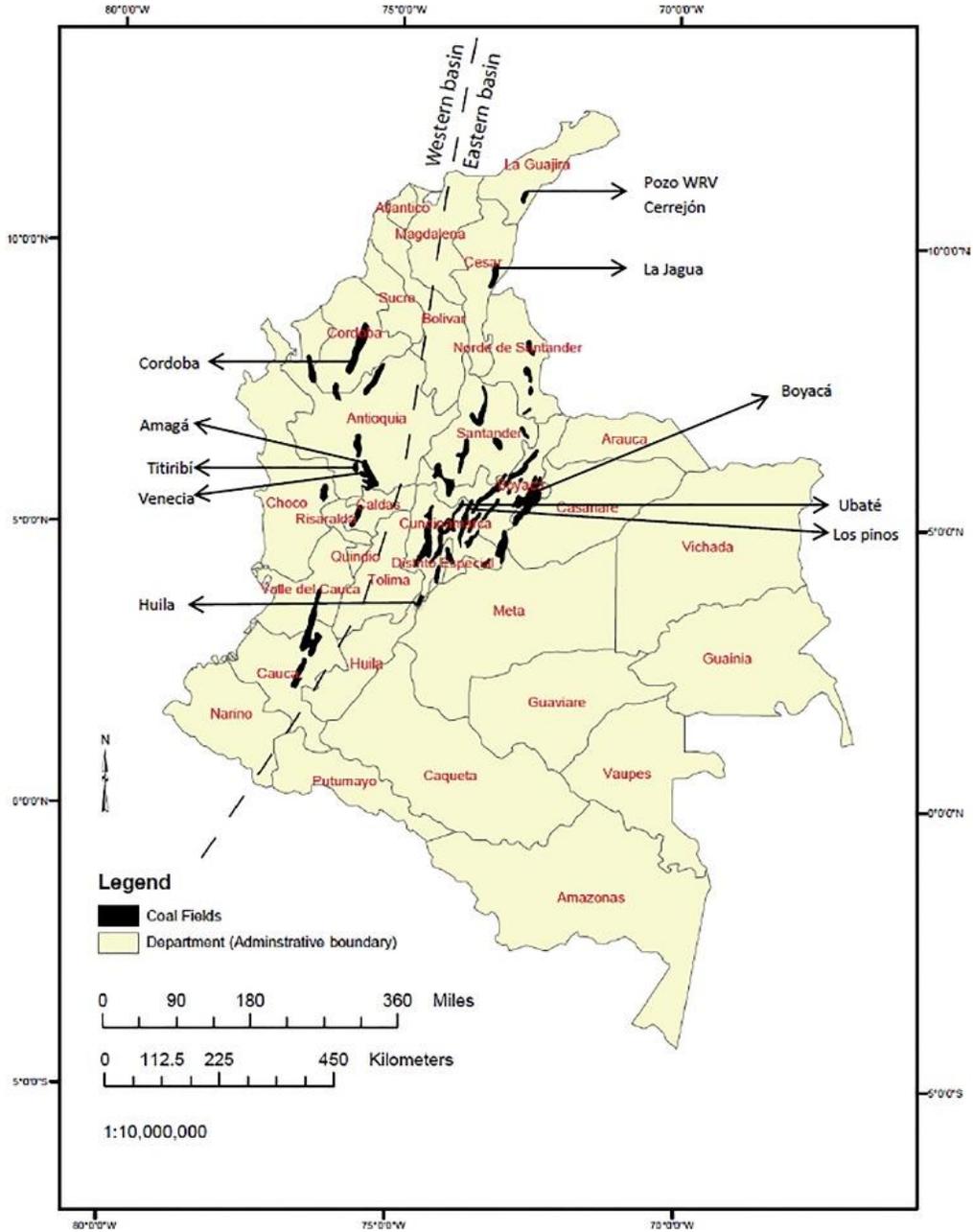


Figura 10. Ubicaciones geográficas de los yacimientos en Colombia. Fuente: (Huang, y otros, 2019)

En algunos otros países se reciclan en campos agrícolas o bosques, pero sin tener un control definido. Por consiguiente, se buscan algunas alternativas para su manejo, reutilización y reciclaje. Se ha encontrado que las fuentes precursoras de cenizas volantes

de biomasa son la cascarilla de arroz, paja de trigo, paja de caña de azúcar y madera (Teixeira, Camões, Branco, Aguiar, & Fangueiro, 2019).

2.1.4.1. Biomasa en Colombia

Colombia se ha caracterizado por ser un país de alta producción agrícola, la cual se utiliza para abastecer el consumo interno, emplearlos como materia prima en la agroindustria y para exportarlos como mercancías agrícolas, en la Figura 11 se muestra un resumen de esta producción a nivel nacional. El aprovechamiento de los cultivos además ha tomado otro enfoque y se empiezan a emplear como materia prima para la producción de gas etano para la producción de biocombustibles. Actualmente, la capacidad de generación de energía instalada de fuentes alternativas en Colombia es alrededor de 18 GW, de esta el 0.8 % es aportada por la biomasa, debido a que se le ha dado más relevancia y se ha estudiado a mayor profundidad la generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables como la cinética del viento, el agua y la radiación solar. El país se comprometió a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero en un 20% para el año 2030, razón por la cual la biomasa surge como una solución viable, pero el desarrollo de los sistemas de generación de energía basados en biomasa se encuentra limitado a corto y mediano plazo (Sagastume Gutiérrez, Cabello Eras, Hens, & Vandecasteele, 2020).

Se ha encontrado que los sectores industriales colombianos que más biomasa generan son el agrícola con un 29%, la industria forestal y maderera con un 31%, la ganadería con un 29% y los residuos sólidos municipales con un 11%; la mayoría de

estas se extraen de zonas no interconectadas del país (Sagastume Gutiérrez, Cabello Eras, Hens, & Vandecasteele, 2020).

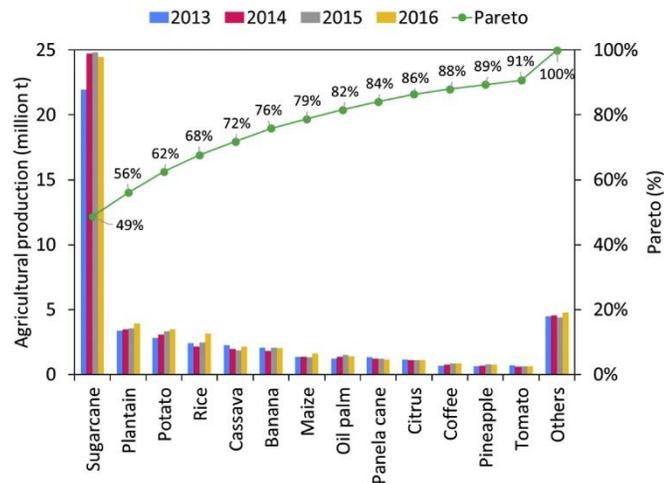


Figura 11. Producción Agrícola en Colombia. Fuente: (Sagastume Gutiérrez, Cabello Eras, Hens, & Vandecasteele, 2020)

La utilización de biomasa en Colombia como fuente de energía abarca 3 categorías, que son el empleo de la biomasa en la producción de carbón vegetal para uso doméstico o el uso de la biomasa para la cocción, el aprovechamiento de los residuos de caña o aceite de palma como fuente de energía de las calderas en sistemas de cogeneración en estas plantas, y tercero, la síntesis de biomasa en biocombustibles para automóviles. La biomasa también ha servido como fuente de electricidad en las zonas rurales en bajas proporciones en relación con los tres primeros usos enumerados (Gamarra Quintero, Díaz Gonzalez, & Pacheco Sandoval, 2021).

2.1.5. Residuos sólidos municipales

Debido al incremento de la población y el vertiginoso crecimiento de la urbanización en el mundo, se están generando cada vez más residuos sólidos municipales. Estos generan inconvenientes en la población cercana a los vertederos que van desde problemáticas ambientales relacionadas con la contaminación del aire, el suelo local y las fuentes hídricas colindantes; las problemáticas sociales que involucran el incremento de roedores y vectores y las problemáticas locativas que tienen que ver con el poco espacio con el que se cuenta para la disposición final de los desechos.

Dentro de las soluciones que se han encontrado para la eliminación de los residuos, la más usada ha sido la incineración, debido a que esta además de reducir la densidad de los desechos, se aprovecha el poder calorífico de los polímeros para recuperar algo de energía, y adicionalmente, se eliminan algunos virus y bacterias (Tian, y otros, 2021) (Ren, y otros, 2021). En la Figura 12 se observa el proceso empleado para la eliminación de los residuos sólidos y la obtención de cenizas volantes. Después de la incineración se generan cenizas volantes y cenizas de fondo como residuo. Las cenizas volantes producto de los residuos sólidos municipales son consideradas residuos peligrosos porque contienen algunos metales pesados y dioxinas. Por consiguiente, se necesita de tratamientos físico-químicos antes de llevarlas nuevamente al relleno sanitario (Sun, Zhou, Jiang, Zhang, & Mao, 2021).

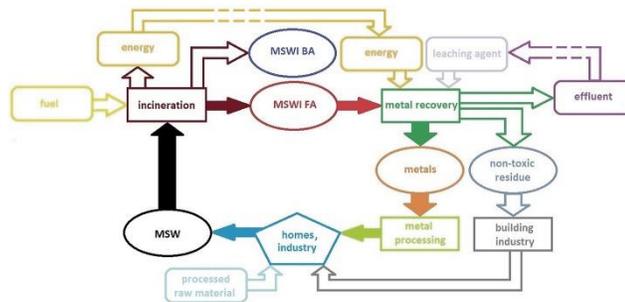


Figura 12. recuperación y aprovechamiento de las cenizas volantes producto de los desechos municipales. Fuente: (Bakalár, Pavolová, Hajduová, Lacko, & Kyšela, 2021)

En la Tabla 3 se muestran los principales constituyentes de las cenizas volantes producto de la incineración de residuos sólidos, estos se determinaron por fluorescencia de rayos X (XRF) y difracción de rayos X (XRD) .

Tabla 3. Composición química de las cenizas volantes residuos sólidos municipales.

Fuente: (Sun, Zhou, Jiang, Zhang, & Mao, 2021)

Óxidos	% en peso
SiO ₂	4.7
CaO	52.2
SO ₃	4.5
Na ₂ O	5.9
Fe ₂ O ₃	4.6
K ₂ O	4.3
Al ₂ O ₃	2.0
MgO	0.8
Cl	19
Zn	0.9
Cu	0.2
Pb	0.4
Cr	0.08
Ni	0.03

2.2. Centrales termoeléctricas

En la sección anterior se estudiaron las diferentes materias primas que al ser incineradas propician las cenizas volantes. En esta se ahondará los procesos industriales en los cuales se emplean estas materias primas generalmente como combustible y por consiguiente, se llevan a altas temperaturas y se obtiene como residuo las cenizas volantes de carbón.

La generación de energía eléctrica en el mundo ha producido grandes volúmenes de desechos que afectan el medio ambiente. El 40% de esta energía es generada empleando el carbón como material de combustión, debido a su alto poder calorífico y bajo costo, lo que implica que el aprovechamiento de este combustible fósil se conserve elevado durante mucho tiempo (Ju, Meng, Han, Lin, & Jiang, On the state of the art of crystalline structure reconstruction of coal fly ash: A focus on zeolites, 2021).

Una de las industrias que más emplea carbón como combustible son las centrales termoeléctricas, en estas se quema el combustible fósil en los hornos con el fin de elevar la temperatura para convertir agua en vapor en una caldera que hace girar una turbina. El vapor que sale de la turbina, se condensa nuevamente en agua en un condensador de carcasa y tubos antes de regresar a la caldera (Nithyanandam, Shoaie, & Pitchumani, 2021), así como se muestra en la Figura 13.

Existen esencialmente cuatro tipos de hornos para la combustión de carbón: horno de combustión de rejilla, horno de lecho fluidizado, horno de combustible pulverizado y horno ciclónico. En la práctica, el tipo de hornos se escoge en función de las propiedades del carbón y otros factores. Los hornos de combustible pulverizado se utilizan

principalmente en la industria de combustión de carbón, en la que la temperatura de combustión es alta (principalmente por encima de 1400 ° C).

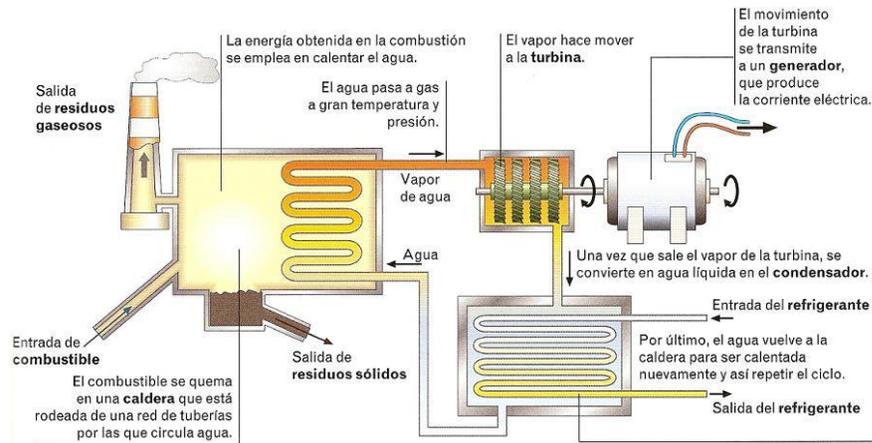


Figura 13. Sistema de generación de energía en una central termoeléctrica. Fuente: (Gil, 2014)

Aquí, se reduce el tamaño de la partícula del carbón a menos de 100 μm en un molino de carbón antes de agregarlo a la cámara de combustión, seguidamente el polvo de carbón se mezcla con aire y se rocían juntos en la cámara de combustión para incinerarlas con mayor facilidad, este proceso se evidencia en la Figura 14. Dado que los hornos de combustible pulverizado pueden mantener aproximadamente el 80% de las cenizas de carbón capturadas en los colectores electrostáticos o mecánicos de los gases de combustión como cenizas volantes de carbón, se utilizan ampliamente en términos prácticos ya que reduce la cantidad de material articulado arrojado al medio ambiente por las chimeneas después de la combustión. Después de la recolección, las cenizas volantes de carbón capturadas se transportan para su almacenamiento o uso posterior (Ju, Meng,

Han, Lin, & Jiang, On the state of the art of crystalline structure reconstruction of coal fly ash: A focus on zeolites, 2021).

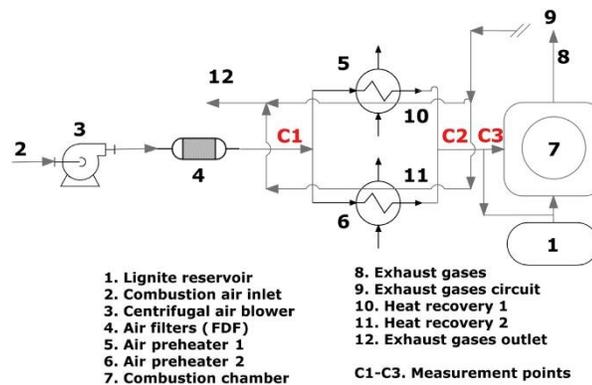


Figura 14. Diagrama de flujo del Sistema de combustión. Fuente: (Koroneos, Fokaidis, & Christoforou, 2014)

2.3. Cenizas volantes de carbón (CFA)

Inicialmente se aclaran algunos conceptos básicos, que ayudaran al lector a entrar en contexto y comprender algunos tópicos del tema, principalmente el concepto de Ceniza de Carbón (CA), Cenizas Volantes de Carbón (CFA), Cenizas de Fondo de Carbón (CBA) y Cenizas Volantes (FA) (Ju, Meng, Han, Lin, & Jiang, On the state of the art of crystalline structure reconstruction of coal fly ash: A focus on zeolites, 2021).

Cenizas de carbón es el nombre que recibe el conjunto de residuos que resultan de la combustión del carbón, uno de los principales derivados de esta quema son las cenizas volantes de carbón, esta es la fracción más liviana dentro de los residuos; por consiguiente, es atrapada en el colector de polvo de los gases de escape. Por otro lado, las cenizas de fondo de carbón, son el porcentaje restante de la incineración de este recurso

natural, estas son la parte más pesada del conjunto y en consecuencia son extraídas del fondo de la cámara de combustión. En otro orden de ideas, se considera cenizas volantes a todo a toda la fracción liviana producto de la combustión de cualquier fuente comburente, como la biomasa, los residuos sólidos municipales y el carbón (Ju, Meng, Han, Lin, & Jiang, On the state of the art of crystalline structure reconstruction of coal fly ash: A focus on zeolites, 2021).

ECOBA (European Coal Combustion Products Association) define específicamente a las cenizas volantes de carbón como cenizas volantes obtenidas por precipitación electrostática o mecánica de partículas similares al polvo de los gases de combustión de hornos encendidos con carbón o lignito a 1100-1400 ° C, que se llama PFA (cenizas de combustible pulverizadas) en el Reino Unido (Ju, Meng, Han, Lin, & Jiang, On the state of the art of crystalline structure reconstruction of coal fly ash: A focus on zeolites, 2021).

2.3.1. Características de las cenizas volantes de carbón

En busca de disminuir la cantidad de cenizas volantes de carbón acumuladas en vertederos se aptado por dar alguna aplicación a este residuo. Reconocer las principales características físico-químicas de las cenizas volantes de carbón es primordial, debido a que esto ayudará a que su utilización, reciclaje y reuso sean correctos. Para recomendar algunas aplicaciones se debe conocer la composición química, la morfología de la superficie, la cristalinidad y la distribución del tamaño de partículas de las cenizas volantes de carbón (Ju, Meng, Han, Lin, & Jiang, On the state of the art of crystalline structure reconstruction of coal fly ash: A focus on zeolites, 2021).

2.3.1.1. Composición química

Dado que se reconocen 316 minerales individuales y 188 grupos de minerales en las cenizas volantes, es uno de los materiales más complejos en términos de características, pero generalmente todas las cenizas volantes de carbón contienen altas cantidades de dióxido de silicio, óxido de aluminio y óxido de calcio, ya que estos son los principales minerales encontrados en las fuentes carbón (Bhatt, y otros, 2019,). Como ya se ha mencionado en algunos apartados de este texto, las cenizas volantes de carbón provienen de la incineración del carbón mineral. Este combustible fósil, se crea a partir de la coalificación de material orgánico vegetal, por consiguiente, se puede encontrar como turba, lignito, carbón bituminoso y antracita. Las cenizas volantes de lignito y carbón subbituminoso se identifican por contener mayor cantidad de óxido de calcio y magnesio y pequeños porcentajes de sílice y óxido de hierro, así como bajo contenido de carbono. Los constituyentes principales de las cenizas volantes de carbón bituminoso son sílice, alúmina, óxido de hierro y calcio, con diferentes cantidades de carbono. La antracita es poco empleada como carbón térmico, por lo que no es común encontrar cenizas volantes de este tipo de carbón. Cada una de estas etapas del carbón tiene diferentes propiedades térmicas y de combustión, lo que repercute en diferencias en la composición química y las propiedades de las cenizas volantes de carbón resultantes (Ju, Meng, Han, Lin, & Jiang, On the state of the art of crystalline structure reconstruction of coal fly ash: A focus on zeolites, 2021), lo anterior se puede evidenciar en la Tabla 4 .

Tabla 4. Composición química de las cenizas volantes producto de diferentes tipos de carbón. Fuente: (Ju, Meng, Han, Lin, & Jiang, On the state of the art of crystalline structure reconstruction of coal fly ash: A focus on zeolites, 2021)

Composición (%)	Bituminoso	Subbituminoso	Lignito	Antracita
SiO ₂	20-60	40-60	15-45	28-57
Al ₂ O ₃	5-35	20-30	10-25	18-36
Fe ₂ O ₃	10-40	4-10	4-15	3-16
CaO	1-12	5-30	15-40	1-27
MgO	0-5	1-6	3-10	1-4
SO ₃	0-4	0-2	0-10	0-9
Na ₂ O	0-4	0-2	0-6	0-1
K ₂ O	0-3	0-4	0-4	0-4
LOI	0-15	0-3	0-5	1-8

Nota: LOI hace referencia a la pérdida de ignición

Se puede observar en la tabla que los componentes principales de las cenizas volantes de carbón son el óxido de silicio, el óxido de aluminio y el óxido de hierro. Esos porcentajes varían en función del lugar de donde se extraiga el carbón, por ejemplo, en china el contenido de óxido de aluminio puede exceder el 50%.

Estudiantes del programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Pamplona caracterizaron física y químicamente las cenizas volantes de carbón de la central termoeléctrica Termotasajero SA ESP. Ubicada en el municipio de Zulia, Norte de Santander, Colombia. Encontraron mediante electroscopía de rayos X que los constituyentes principales de estas cenizas son el carbono (C) con 11,22%, oxígeno (O) con 54,25%, silicio (Si) con 14,65%, aluminio (Al) con 5,84 % y el hierro (Fe) con 14,03% (Pinzón Cuta, Jaimes Alvarado, & Ramón Valencia, 2019). Estos resultados están contenidos en la Tabla 5.

Tabla 5. Composición química de las cenizas volantes de la central termoeléctrica Termotasajero S.A. ESP. Fuente: (Pinzón Cuta, Jaimes Alvarado, & Ramón Valencia, 2019)

ELEMENTO	Cenizas
	MASA NORMAL (%)
Carbono	11,22
Oxigeno	54,25
Hierro	14,03
Aluminio	5,84
Silicio	14,65
Fosforo	--

2.3.1.2. Morfología superficial de las cenizas volantes de carbón

La morfología de las cenizas volantes de carbón está fuertemente ligada a la fuente de la cual proviene y se puede dividir en tres grupos, estas pueden ser el carbón poroso, el vidrio poroso o las perlas de vidrio; después de la combustión las formas que estos generan son similares a las que tenían antes de la combustión, generalmente esferas, aglomerados de forma irregular y estructuras porosas, esto se puede evidenciar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Dentro de una muestra específica de cenizas volantes de carbón se pueden encontrar fisonomías morfológicas variadas, es decir, forma, tamaño y color (Ju, Meng, Han, Lin, & Jiang, On the state of the art of crystalline structure reconstruction of coal fly ash: A focus on zeolites, 2021).

Las cenizas volantes con frecuencia se observan con forma esférica y hueca, a esto se le conoce como cenosfera, Estas últimas se obtienen gracias al contenido de silicio y aluminio, y el choque térmico que genera el enfriamiento rápido después de la combustión. Estas proporcionan propiedades interesantes al desecho, ya que al ser

huecas, propiedades como el tamaño de partícula y la densidad disminuyen (D. Eliche, J.A. Sandalio, S. Martínez, & L. Pérez, 2018).

También existen partículas con forma esférica sólida, tradicionalmente se les llama nanoesferas, estas aportan mayores propiedades físico-mecánicas a los materiales, en consecuencia, pueden ser empleadas como refuerzo en algunas matrices. Por otro lado, se han observado partículas amorfas, que tienen que ver con el grado del carbón, la temperatura de incineración. Esta última morfología es la que proporciona menores propiedades a los materiales, por consiguiente, en la industria se busca controlar los procesos de tal manera que se genere la menor cantidad de cenizas volantes de este tipo (Saikia, Hower, Islam, Sharma, & Das, 2021).

Algunas muestras generan superficies con alta porosidad, esta condición hace que incremente la cantidad de concentradores de esfuerzo, en consecuencia, se obtienen menores propiedades mecánicas y sus aplicaciones se limitan a la implementación de estas como materiales porosos para adsorción y catálisis (A.G.Castellanos, H.Mawson, V.Burke, & P.Prabhakar, 2017).

En la investigación hecha en la Universidad de Pamplona, emplearon imágenes de microscopía electrónica de barrido en muestras de cenizas volantes de carbón de la central termoeléctrica y en estas advierte la morfología de las cenizas, se observa la presencia de numerosas partículas esféricas de diferentes tamaños (cenosferas) y de superficie rugosa, esta última característica se debe a la presencia de hierro en su composición química y que las partículas en la imagen están parcialmente hidratadas.

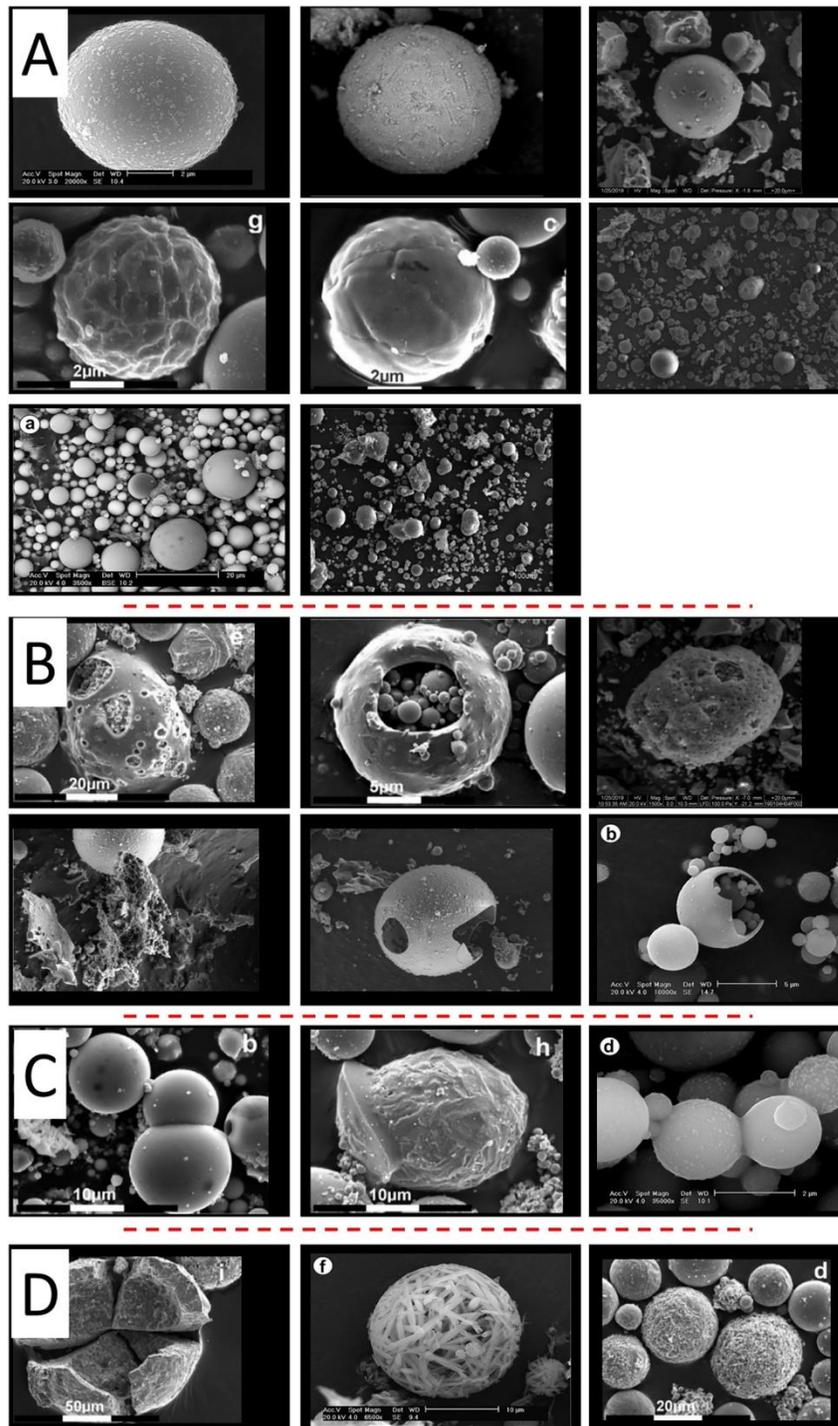


Figura 15. Partículas esféricas de cenizas volantes de carbón. Fuente: (Wang, Sun, Zhao, Yang, & Wang, 2020)

Por otro lado, se perciben en menor proporción algunas partículas de forma irregular vítrea, lo que indica la presencia inquemados de carbón (Pinzón Cuta, Jaimes Alvarado, & Ramón Valencia, 2019).

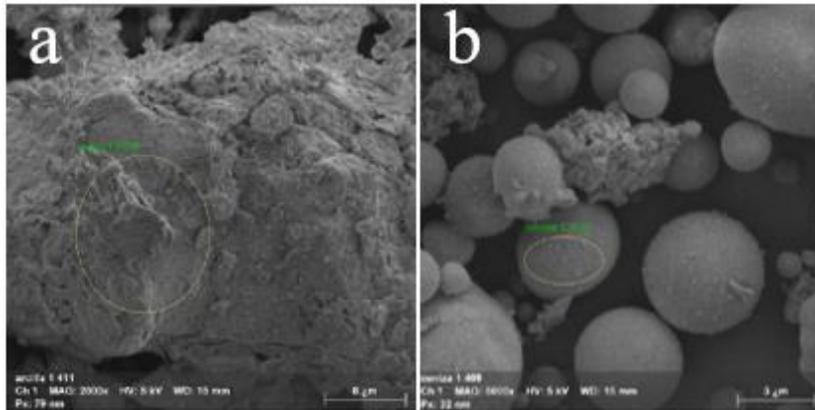


Figura 16. Microscopía electrónica de barrido de a) arcilla y b) cenizas volantes de carbón de la central termoeléctrica Termotasajero. Fuente: (Pinzón Cuta, Jaimes Alvarado, & Ramón Valencia, 2019)

2.3.1.3. Estructura cristalina

Las cenizas volantes de carbón se clasifican en tres matrices constituyentes: vidrio, mullita-cuarcita y espinela magnética, La cristalinidad (o tamaño de partícula) del material; es decir, la naturaleza amorfa o vítrea, es un parámetro crucial que define el potencial de reactividad las cenizas en el transporte y liberación de elementos tóxicos. Las fases inorgánicas de las cenizas volantes, como Ca, Na, Mg, K, Fe, S y C, están disponibles en abundancia, mientras que los elementos As, B, Mo, P y Se tienen una concentración extremadamente baja y están disponibles en la fase acuosa. sistema de cenizas volantes (Gollakota, Volli, & Shu, 2019). Además, las cenizas volantes de carbón

también comprenden una mezcla compleja de compuestos orgánicos como los hidrocarburos aromáticos policíclicos, compuestos cancerígenos, como los benzofluorantenos, y alquilnitrofluorrenones. Típicamente las cenizas volantes de carbón están compuestas por mullita, cuarzo, corindón y sílice amorfa. En la Tabla 6 se reúnen las composiciones químicas de cenizas volantes estudiadas por diferentes investigadores (Ju, Meng, Han, Lin, & Jiang, On the state of the art of crystalline structure reconstruction of coal fly ash: A focus on zeolites, 2021).

Tabla 6. Proporción de la fase mineral en las cenizas volantes de carbón. Fuente: (Ju, Meng, Han, Lin, & Jiang, On the state of the art of crystalline structure reconstruction of coal fly ash: A focus on zeolites, 2021)

<i>Fase mineral</i>	<i>Contenido (%)</i>								
Aluminosilicato amorfo	88	70	60-80	71	71	68	62.07	59	43.7
Cuarzo (SiO₂)	8	4.5	5-15	-	11	10	13.54	7	2.2
Mullita (3Al₂O₃ 2 SiO₂)	3	20.4	15-20	19	16	21	22.29	15	27.2
Hematites	-	-	-	-	-	-	1.56	-	-
Magnetita	-	3	-	-	-	-	-	14	-
Otros	1	2.2	-	-	-	-	0.54	5	-
Referencia	(Aldahri, Behin, Kazemian, & Rohani, 2016)	(Pan, y otros, 2020)	(Belviso, Cavalcante, & Fiore, 2010)	(Belviso, Cavalcante, & Fiore, Ultrasonic waves induce rapid zeolite synthesis in a seawater solution, 2013)		(Musyoka, y otros, 2012)	(Juan, Hernández, Andrés, & Ruiz, 2007)	(Inada, Tsujimoto, Eguchi, Enomoto, & Hojo, 2005)	

Las fases cristalinas en diferentes tipos de cenizas son comunes, principalmente mullita, cuarzo, corindón y contenido amorfo con diferentes proporciones.

Para las cenizas volantes estudiadas en la central termoeléctrica de Norte de Santander, se encontró empleando el ensayo de electoscopía de rayos X que su organización molecular es vítrea (amorfa) y en menor proporción algunas fases cristalinas (Pinzón Cuta, Jaimes Alvarado, & Ramón Valencia, 2019), véase la Figura 17.

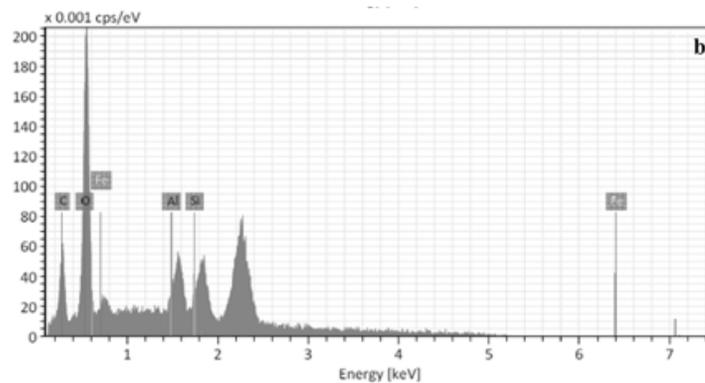


Figura 17. Electroscopía de difracción de rayos X (EDS) de las cenizas volantes de carbón. Fuente: (Pinzón Cuta, Jaimes Alvarado, & Ramón Valencia, 2019)

2.3.1.4. Propiedades físicas

Las cenizas volantes son básicamente partículas finas y su presentación física macrométrica es en forma de polvo, predominantemente de geometría esférica, ya sean sólidas (nanoesferas) o huecas(cenosferas), y en su mayoría de estructura micrométrica amorfa (vítrea). En general, la gravedad específica de las cenizas de carbón se está alrededor de 2,0, pero puede oscilar entre 1,6 y 3,1. Esta variación se debe a una

combinación de varios factores, como la forma de las partículas, la gradación y la composición química.

Según la distribución del tamaño partícula, los estudios revelaron que las cenizas volantes provenientes de carbones bituminosos y de antracita son excepcionalmente similares a los del limo (<0,075 mm), mientras que las partículas derivadas de fuentes subbituminosas y de lignito son más grandes en comparación con otros tipos (> 0,075 mm). Las cenizas volantes tienen una gran superficie específica y una baja densidad aparente. Su color puede variar desde naranja a rojo oscuro, marrón o de blanco a amarillo dependiendo de la cantidad de carbón y hierro sin quemar. En la se presenta un resumen de las propiedades físico-químicas de las cenizas volantes de carbón (Bhatt, y otros, 2019,).

Las cenizas volantes de carbón de Termotasajero presentan color gris oscuro a negro (Figura 18), debido a la alta presencia de inquemados de carbono, En general, las cenizas volantes provenientes de lignito o subbituminoso, habitualmente abarcan cantidades más bajas de contenido de carbono y trazas de calcio o cal y por lo tanto se observan color grisáceo (Pinzón Cuta, Jaimes Alvarado, & Ramón Valencia, 2019).

Tabla 7. Resumen de algunas propiedades físico-químicas de las cenizas volantes.

Fuente: (Gollakota, Volli, & Shu, 2019)

<i>Propiedad</i>	<i>Cenizas volantes</i>	<i>Referencia</i>
Densidad aparente (Kg/m³)	900-1300	(ENVIS, 2016)
Gravedad específica	1.6-2.6	

Plasticidad	No plastico	
Arcilla	Despreciable	
Índice de oleaje libre	Muy bajo	
Porosidad %	30-65	
Superficie (m²/g)	5	
Reactividad a la cal (MPa)	1-8	
pH	6-8	
Coefficiente de uniformidad %	3.1-10.7	
Tamaño de partícula extremo (mm)	0.001-0.1	
Absorción %	12.25	(Dash, Kar, Mukherjee, & Mustakim, 2016)
Densidad (Kg/m³)	1380	(Turner Fairbank Research Institute, 2016)
Contenido de humedad optimo %	45.5%	(Kim, Prezzi, & Salgado, 2005)

Por el contrario, las cenizas volantes producto de la combustión de carbón bituminoso y de antracita posee mayores residuos de carbono y parece más oscuro. Por otro, la distribución del tamaño de grano arroja que sus partículas tienen tamaños inferiores a 425 μm y superiores a 75 μm , y un alto porcentaje presentó dimensiones inferiores a diámetros característicos de arcilla y limos (Pinzón Cuta, Jaimes Alvarado, & Ramón Valencia, 2019).



Figura 18. Distribución del tamaño de partícula de las cenizas volantes de carbón.

Fuente: (Pinzón Cuta, Jaimes Alvarado, & Ramón Valencia, 2019)

En la Tabla 8 se pueden observar los porcentajes detallados de los tamaños de partícula de las cenizas volantes de carbón de la central termoelectrica Termotasajero.

Tabla 8. Gradación del tamaño de partícula de las cenizas volantes de Termotasajero.

Fuente: (Pinzón Cuta, Jaimes Alvarado, & Ramón Valencia, 2019)

Tamaño de partícula	(% pasa)
9,5	100
4,75	100
2,36	100
0,85	100
0,425	98,73
0,25	94,32
0,18	88,16
0,15	80,25
0,106	48,67
0,075	40,52

2.3.2. Soluciones a los contaminantes generados por las cenizas volantes de carbón

El impacto ambiental producido por la generación y acumulación de cenizas volantes de carbón es bastante alto, por tal razón se han buscado soluciones que permitan mitigar los efectos sobre el medio ambiente. La medida más significativa para reducir la cantidad de cenizas vertidas al ambiente es agregarlas a los materiales de construcción debido a sus propiedades puzolánicas (Abbas, Saleem, Kazmi, & Munir, 2017) (Ju, Meng, Han, Lin, & Jiang, On the state of the art of crystalline structure reconstruction of coal fly ash: A focus on zeolites, 2021). La industria de este sector que mayor uso le ha dado a este residuo ha sido la cementera, ya que pueden sustituir parcial o totalmente al Clinker, por consiguiente, se han convertido en una materia prima o aditivo importante en la fabricación de cemento Portland ordinario. En diferentes investigaciones se ha encontrado que debido al tamaño y la naturaleza morfológica de las cenizas volantes de carbón, la matriz queda con pequeños agujeros causados porque las partículas de cenizas no ocupan su volumen. Como resultado se obtienen morteros, vigas, columnas, etc. Con menor densidad, pero que a su vez adquieren menor resistencia mecánica. En consecuencia, la ASTM en Estados Unidos y las directrices europeas dan estrictos lineamientos para su implementación (Gollakota, Volli, & Shu, 2019).

Otra aplicación importante que han dado a las cenizas volantes de carbón es la elaboración de materiales microporosos, mesoporosos o zeolitas debido a su similitud en la composición química. La transformación de cenizas volantes en zeolita tiene diferentes ventajas. frecuentemente, el área de superficie específica aumenta después de convertir

las cenizas volantes en zeolita, lo que las hace más eficientes en la eliminación de iones metálicos. Sin embargo, la presencia de grandes porcentajes de compuestos potencialmente tóxicos provenientes del carbón han ocasionado problemas en la síntesis de zeolitas (Gollakota, Volli, & Shu, 2019). Los métodos más empleados para convertir las cenizas volantes en zeolitas son el tratamiento hidrotermal que consiste en la combinación de diferentes soluciones, temperatura y presión para obtener el Si y el Al, cabe resaltar que existen problemáticas relacionadas con este proceso, debido a que también se extraen algunos elementos indeseados (metales pesados o tóxicos) que posteriormente son llevados al medio ambiente. Por otro lado, está el método denominado fusión alcalina seguida de cristalización hidrotermal, durante este proceso, un cuarzo α inactivo y mullita en la ceniza volante reaccionan con un reactivo alcalino (generalmente NaOH en forma de polvo) a una temperatura alta (550-600 ° C) y posteriormente se hace un proceso hidrotermal clásico. En la Tabla 9 se muestran las principales ventajas y desventajas de estos métodos (Szerement, Szatanik-Kloc, Jarosz, Bajda, & Mierzwa-Hersztek, 2021).

Tabla 9. Ventajas y desventajas de los métodos clásicos de hidrotermal. Fuente:

(Szerement, Szatanik-Kloc, Jarosz, Bajda, & Mierzwa-Hersztek, 2021)

<i>Método</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
Método hidrotermal	Menor temperatura de reacción Menor consumo de energía	Mas desperdicio, relativamente lento, Baja conversión
Método de fusión	Velocidad de reacción más rápida y pureza del producto final, Menos desperdicio	Alta temperatura, Relativamente caro

La utilización de las cenizas volantes de carbón en el campo de la geotecnia abarca en términos generales el uso de estas en muchas aplicaciones, tales como lechada, material de relleno de asfalto, sub-grado de estabilización, por supuesto base de pavimento, relleno de ingeniería general, relleno estructural, enmienda del suelo, y de relleno. Las cenizas volantes de carbón se utilizan como estabilizador del suelo debido a su capacidad para reducir la afinidad del suelo para absorber agua y así prevenir la hinchazón. Para suelos con un alto contenido de montmorillonita, la hinchazón puede causar problemas graves; tienden a expandirse cuando están mojadas y encogerse cuando están secas, lo que ejerce presión y da como resultado pavimentos, pisos de sótanos, caminos de entrada, tuberías y cimientos agrietados. Al agregar cenizas volantes al suelo se modifica su mineralogía debido a la reacción puzolánica, lo que hace que el suelo sea más granular, permitiendo que el agua se infiltre con mayor facilidad y la retención de líquidos sea menor (Gollakota, Volli, & Shu, 2019).

Otra aplicación importante está ligada al empleo de las cenizas volantes de carbón como acondicionadores del suelo, modificadores y como aditivo en los fertilizantes. Esto ha repercutido en efectos positivos para el sector agroindustrial; lo que se ha conseguido es que la fertilidad del suelo incremente y por consiguiente el rendimiento de los cultivos también lo haga. Los residuos del carbón mejoran la infiltración, la conductividad hidráulica y la superficie específica del suelo, por otro lado, regula el pH y da cationes importantes como magnesio, potasio y calcio; en consecuencia, incrementa la

disponibilidad de nutrientes para los cultivos (Szerement, Szatanik-Kloc, Jarosz, Bajda, & Mierzwa-Hersztek, 2021).

Las características de adsorción de las cenizas volantes de carbón, específicamente las cenosferas, se estudian mediante la realización de experimentos de adsorción cinética e isotérmica. Se ha encontrado que estas pueden eliminar metales pesados del suelo, la eficiencia con la que lo hagan depende del tiempo de contacto, el pH inicial, concentración de iones absorbidos, el efecto de los iones existentes, la temperatura y la dosis agregada (Szerement, Szatanik-Kloc, Jarosz, Bajda, & Mierzwa-Hersztek, 2021).

Las cenizas volantes de carbón también se han utilizado para la bioremediación del agua, ya que se ha comprobado que estas eliminan el NH_4^+ , Hg^{2+} , Mn^{2+} , Se , Zn^{2+} , Cu^{2+} , Cd^{2+} y Pb^{2+} de soluciones acuosas, por otro lado, la combustión de combustibles fósiles, la actividad volcánica, las plantas de fertilización y la industria petroquímica ocasionan grandes cantidades de gases peligrosos, como dióxido de carbono, dióxido de azufre, sulfuro de hidrógeno, óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles. Controlar y reducir efectivamente las emisiones de contaminantes atmosféricos son trascendentales para salvaguardar la salud humana y el medio ambiente. Los adsorbentes sólidos tradicionales que se utilizan para disminuir la contaminación debida a sustancias gaseosas no han sido eficientes y su regeneración es deficiente. Como posible reemplazo surgen las zeolitas basadas en cenizas volantes debido a su porosidad mixta y alta heterogeneidad superficial (Szerement, Szatanik-Kloc, Jarosz, Bajda, & Mierzwa-Hersztek, 2021).

Dado que la producción de cemento tiene alto consumo de energía, alto impacto ambiental y costos elevados; se ha buscado un material que lo reemplace y reduzca esas problemáticas. Una de las soluciones más viables que se ha encontrado en los últimos años es reemplazar al cemento portland por puzolanas (Si y Al). Como se vio en el apartado Introducción 2.3.1.1 y en la Tabla 4 el silicio y el aluminio son los principales constituyentes de las cenizas volantes de carbón. Estas puzolanas extraídas de las cenizas volantes de carbón se denominan geopolímeros y se han convertido en una de las líneas de investigación en las cenizas volantes de carbón (Gollakota, Volli, & Shu, 2019).

Los geopolímeros son inorgánicos, presentan estructura molecular desorganizada, en comparación con los cementos tradicionales exhiben mejor resistencia térmica, calor hidratación, permeabilidad, reacción álcali-agregado, resistencia al ataque de sulfatos y corrosión, por otro lado, su resistencia a la compresión es mucho más alta y además mejor conductividad térmica. Lo que los convierte en una solución viable y duradera.

La muestra cómo se están empleando las cenizas volantes de carbón en diferentes aplicaciones en el mundo (Koshy, Dondrob, Hu, Wen, & Meegoda, 2019) (Gollakota, Volli, & Shu, 2019).

De los resultados obtenidos de la investigación hecha a las cenizas volantes de carbón de la central termoeléctrica se encontró que se pueden emplear como reforzantes de materiales de construcción como ladrillos cocidos y no cocidos, tejas y azulejos y adicionalmente como refuerzo del concreto. Del estudio de las propiedades físicas-químicas se determinó que son similares a las propiedades de las arcillas de la región y por consiguiente serían un buen sustituyente; adicionalmente, se observó que las

propiedades mecánicas de los materiales disminuyen a medida que incrementa la cantidad de cenizas volantes y en consecuencia se recomienda utilizar hasta un 20% en peso de la masa total, con estas proporciones se consiguen estructuras más livianas y con resistencia a la compresión tal que cumplan con la NTC (Pinzón Cuta, Jaimes Alvarado, & Ramón Valencia, 2019).

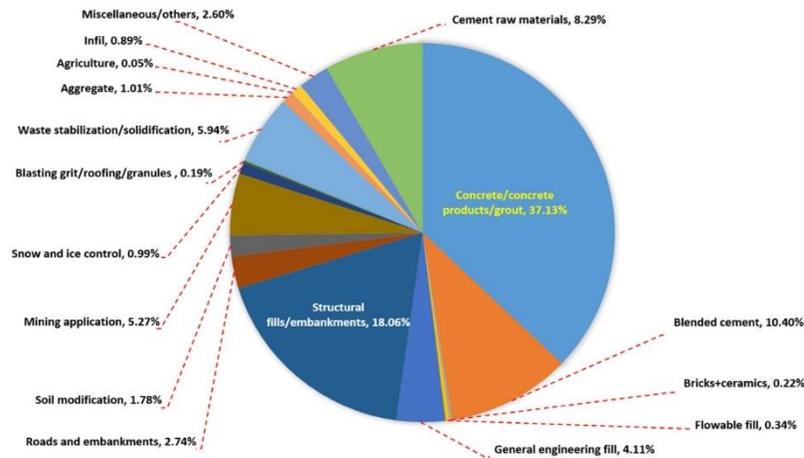


Figura 19. Utilización porcentual potencial de las cenizas volantes de carbón. Fuente: (Gollakota, Volli, & Shu, 2019)

2.3.3. Efectos de las cenizas volantes de carbón

En la actualidad, las cenizas volantes de carbón se almacenan en vertederos, mono-rellenos (vertederos en los que solo se eliminan las cenizas volantes de carbón) y estanques o se elimina por apilamiento simple (Valeeva, y otros, 2019). Sin embargo, estos métodos de eliminación no son amigables con el medio ambiente debido a la lixiviabilidad, radiactividad y toxicidad, causando contaminación grave en el suelo, las fuentes naturales de agua y el aire.

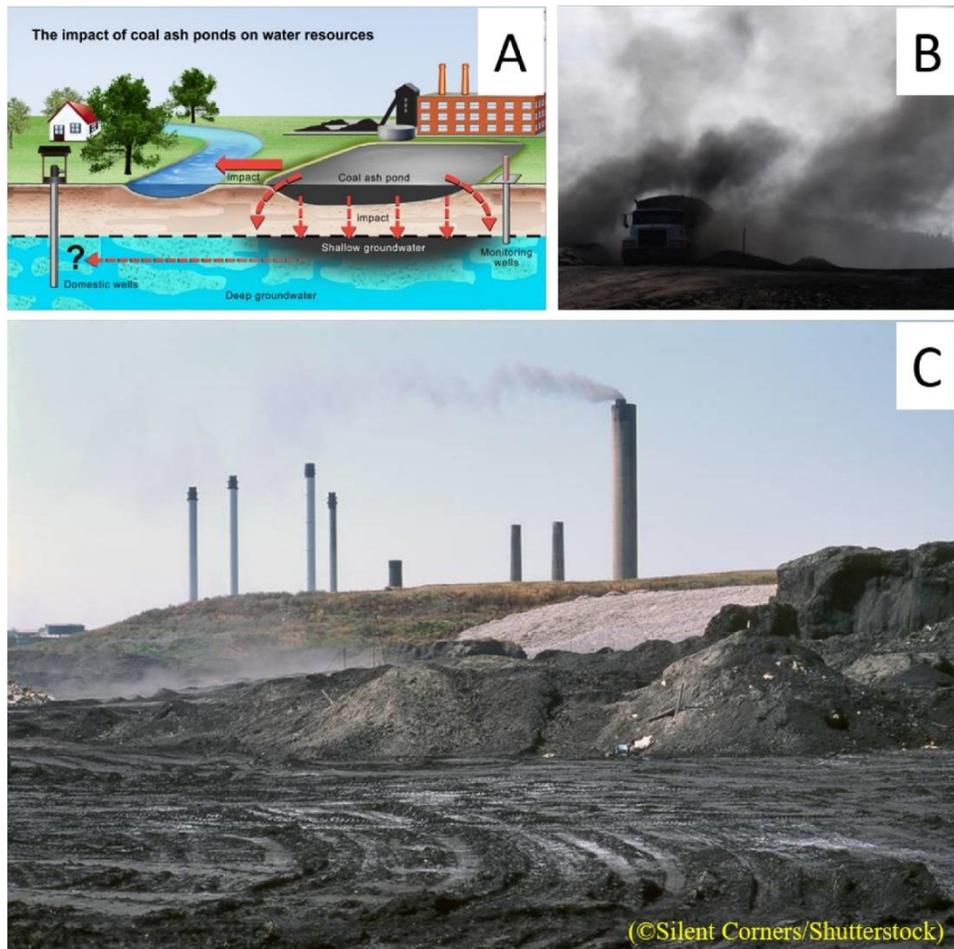


Figura 20. Efectos del CFA en el suelo, el agua, el aire y las tierras agrícolas fértiles.

Fuente: (Wang, Sun, Zhao, Yang, & Wang, 2020)

Debido a una cantidad tan grande de emisiones, el reciclaje de cenizas volantes de carbón se ha promovido en las industrias del cemento y la ingeniería civil, entre otras. En 2001, se logró una tasa de reciclaje del 81,4% en Japón (Centro de Energía del Carbón de Japón, 2008). Sin embargo, la cantidad de CFA reutilizado es aún menor que la cantidad generada (con solo <30% reutilizado (Jayaranjan, Hullebusch, & Annachhatre, 2014)). Aproximadamente 1,7 millones de toneladas de cenizas volantes de carbón todavía se depositan en vertederos en un sitio de disposición final de tipo control. Por lo tanto, los

métodos para la reutilización de las cenizas volantes de carbón solo pueden aliviar la presión de la producción excesiva en términos de presión ambiental, y la contaminación sigue siendo inevitable en la actualidad.

Se han encontrado trazas de metales pesados como As, Pb, Se, Hg y Cr en el carbón crudo; estos se hospedan en los minerales de carbón del tipo pirita y marcasita. Durante la combustión del carbón estos oligoelementos pueden volatilizarse total o parcialmente y convirtiéndose en un riesgo porque pueden ser expulsados por los gases de combustión o precipitarse en las cenizas residuales (Wang, Sun, Zhao, Yang, & Wang, 2020).

2.3.3.1. Efectos en el cuerpo humano.

Las emisiones de mercurio en la combustión de carbón a gran escala han sido objeto de regulaciones de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA). Después de más de una década de examen de los datos de emisiones, la emisión de regulaciones en 2005 y la anulación de esas regulaciones por parte del Tribunal de Circuito de los EE. UU. Del Distrito de Columbia en febrero de 2008, la EPA emitió los Estándares de mercurio y sustancias tóxicas del aire (MATS) (Agencia de Protección Ambiental, 2012) y la Norma de contaminación del aire entre estados (CSAPR) (Ambiental, 2013). Las reglas MATS (Oficina del Registro Federal, 2015) limitan las emisiones de Hg a 50×10^{-6} libras. Hg / MMBtu ($21,5 \times 10^{-6}$ kg Hg / MJ) para las unidades generadoras de carbón existentes en el este de los Estados Unidos. La última regla se refirió específicamente a la reducción de las emisiones de SO₂ y NO_x para las centrales eléctricas en el este de los Estados Unidos; la reducción de los límites de

emisiones de SO₂ requirió que la mayoría de las centrales eléctricas de carbón existentes en el este de los EE. UU. instalaran nuevos equipos o mejoraran los existentes para la desulfuración de gases de combustión (FGD).

Cuando el carbón se quema, el material particulado y los metales pesados (HM) pueden ser inhalados por humanos, lo que puede aumentar la morbilidad respiratoria y cardiovascular y, en ocasiones, puede causar enfermedades graves (Munawer, 2018). Con las regulaciones ambientales cada vez más estrictas en China, la mayoría de las plantas de energía han actualizado sus dispositivos de control de la contaminación del aire (APCD) para capturar más contaminantes del aire. Para el año de 2015, el 91,2% de las calderas de servicios públicos en las centrales eléctricas han instalado desulfuración de gases de combustión (FGD) para controlar emisión de dióxido de azufre (Zhao, y otros).

En algunos países las autoridades ambientales van aún más lejos, como sucedió recientemente en Israel, donde el Ministerio de Protección Ambiental anunció en 2008 que las cenizas volantes de carbón eran simplemente “desechos radiactivos”. En vista de esto, algunos en la industria del hormigón, especialmente en aquellos países donde una parte significativa de la electricidad se produce a partir del carbón, y donde el problema de la utilización de los productos de combustión del carbón es agudo, creen que las nuevas regulaciones serían muy perjudiciales para el uso de cenizas volantes en hormigón (Kovler, Perevalov, Steiner, & Metzger).

3. Conclusiones

- Reconocer las propiedades físicas, químicas y morfológicas de las cenizas volantes de carbón permite orientar investigaciones futuras que tengan como fin la utilización de este residuo como materia prima o refuerzo, se encontró que sus principales aplicaciones tienen que ver con su actividad puzolánica, morfología y tamaño de partícula. Además, se halló que muchas de estas propiedades están directamente relacionadas con la fuente de donde provengan (tipo de carbón), las temperaturas de incineración y el proceso que se implemente para la combustión del carbón.

- A pesar de que las cenizas volantes de carbón provocan alto impacto ambiental, pueden ser implementadas como refuerzo en algunos materiales, especialmente cerámicos para reducir la cantidad de residuos arrojados al medio ambiente. Es primordial aprovechar sus propiedades físicas, químicas y morfológicas para lograr mezclas adecuadas con otros materiales y de esa manera reducir la huella de carbón.

- Las zeolitas presentes en la composición química de las cenizas volantes de carbón, pueden ser utilizadas eficientemente en el tratamiento del suelo. La gradación de este último es mejorada evitando fenómenos como la expansión y por otro lado se logran mejoras en la infiltración, pH y nutrientes. Por consiguiente, sectores como la construcción y la agricultura se verían beneficiados.

- El tratamiento de las cenizas volantes de carbón con el fin de eliminar minerales, sustancias o elementos tóxicos es primordial, ya que su aprovechamiento en aplicaciones relacionadas con la bioremediación del suelo, el agua y el aire sería efectivo. De esta manera un residuo que es altamente contaminante, peligroso para el medio ambiente, la salud humana y los ecosistemas circundantes, pasaría a ser un material que impacta positivamente a cada uno de los componentes físicos (bióticos y abióticos), y económicos y culturales.

Lista de referencias

- Caenn, R., Darley, H., & Gray, G. (2017). Chapter 13 - Drilling Fluid Components. En R. Caenn, H. Darley, & G. R. Gray (Edits.), *Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids (Seventh Edition)* (págs. 537-595). Gulf Professional Publishing. doi:doi.org/10.1016/B978-0-12-804751-4.00013-4.
- Forť, J., Šál, J., Ševčík, R., Doleželová, M., Keppert, M., Jerman, M., . . . Černý, R. (2021). Biomass fly ash as an alternative to coal fly ash in blended cements: Functional aspects. *Construction and Building Materials*, 271. doi:doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121544.
- Ju, T., Meng, Y., Han, S., Lin, L., & Jiang, J. (2021). On the state of the art of crystalline structure reconstruction of coal fly ash: A focus on zeolites. *Chemosphere*, 283. doi:doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131010.
- Nithyanandam, K., Shoaei, P., & Pitchumani, R. (2021). Technoeconomic analysis of thermoelectric power plant condensers with nonwetting surfaces. *Energy*, 227(120450). doi:doi.org/10.1016/j.energy.2021.120450.
- Pan, J., Nie, T., Hassas, B., Rezaee, M., Wen, Z., & Zhou, C. (2020). Recovery of rare earth elements from coal fly ash by integrated physical separation and acid leaching. *Chemosphere*, 248. doi:doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126112.
- Vargas, E., Villamizar, D., Neves, M., & Nunes, M. (2021). Pelletized biomass fly ash for FAME production: Optimization of a continuous process. *Fuel*, 293. doi:doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120425.
- A.G.Castellanos, H.Mawson, V.Burke, & P.Prabhakar. (2017). Fly-ash cenosphere/clay blended composites for impact resistant tiles. *Construction and Building Materials*, 307-313.
- Abbas, S., Saleem, M. A., Kazmi, S. M., & Munir, M. J. (2017). Production of sustainable clay bricks using waste fly ash: Mechanical and durability properties. *Journal of Building Engineering*, 14, 7-14. doi:10.1016/j.job.2017.09.008.
- Agencia de Protección Ambiental. (2012). Estándares de mercurio y sustancias tóxicas del aire (MATS). Obtenido de <https://www3.epa.gov/airquality/powerplanttoxics/basic.html>
- Akinyemi, S., Bohórquez, F., Islam, N., Saikia, B., Sampaio, C., Crissien, T., & Silva, L. (2021). Petrography and geochemistry of exported Colombian coals: Implications

- from correlation and regression analyses. *Energy Geoscience*, 2(3), 201-210.
doi:doi.org/10.1016/j.engeos.2020.12.003
- Aldahri, T., Behin, J., Kazemian, H., & Rohani, S. (2016). Synthesis of zeolite Na-P from coal fly ash by thermo-sonochemical treatment. *Fuel*, 182, 494-501.
doi:doi.org/10.1016/j.fuel.2016.06.019.
- Ambiental, A. d. (2013). Regla de contaminación del aire entre estados (CSAPR).
Obtenido de <https://www.epa.gov/crossstaterule>
- Askeland, D., Fulay, P., & Wright, W. (2013). *Ciencia e ingeniería de materiales*.
México D.F.: Cengage learning.
- Bakalár, T., Pavolová, H., Hajduová, Z., Lacko, R., & Kyšela, K. (2021). Metal recovery from municipal solid waste incineration fly ash as a tool of circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 302. doi:doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126977.
- Baker, I. (2018). Graphite. In: Fifty Materials That Make the World. *Springer, Cham*.
doi:10.1007/978-3-319-78766-4_16
- Belviso, C. (2018). State-of-the-art applications of fly ash from coal and biomass: A focus on zeolite synthesis processes and issues. *Progress in Energy and Combustion Science*, 65, 109-135. doi:doi.org/10.1016/j.peccs.2017.10.004.
- Belviso, C., Cavalcante, F., & Fiore, S. (2010). Synthesis of zeolite from Italian coal fly ash: Differences in crystallization temperature using seawater instead of distilled water. *Waste Management*, 30(5), 839-847.
doi:doi.org/10.1016/j.wasman.2009.11.015
- Belviso, C., Cavalcante, F., & Fiore, S. (2013). Ultrasonic waves induce rapid zeolite synthesis in a seawater solution. *Ultrasonics Sonochemistry*, 20(1), 32-36.
doi:doi.org/10.1016/j.ultsonch.2012.06.004.
- Bhatt, A., Priyadarshini, S., Mohanakrishnan, A. A., Abri, A., Sattler, M., & Techapaphawit, S. (2019). Physical, chemical, and geotechnical properties of coal fly ash: A global review. *Case Studies in Construction Materials*, Volume 11, e00263. doi:10.1016/j.cscm.2019.e00263.
- Bogdanowicz, R. (2015). *Chapter 8 - Advancements in Diamond-Like Carbon Coatings*. (A. Hamdy Makhlof, & D. Scharnweber, Edits.) Butterworth-Heinemann.
doi:doi.org/10.1016/B978-0-12-799947-0.00008-0.
- Centro de Energía del Carbón de Japón. (2008). *Base de datos de cenizas de carbón*.
Obtenido de Google Académico:

<https://scholar.google.com/scholar?q=Coal%20ash%20database.%20Japan%20Coal%20Energy%20Center,%20Tokyo,%20Japan;%202008>.

- Corona-Esquivel, R., Tritlla, J., Benavides-Muñoz, M., Piedad-Sánchez, N., & Ferrusquía-Villafranca, I. (2006). Geología, estructura y composición de los principales yacimientos de carbón mineral en México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 58(1), 141-160. doi:doi.org/10.18268/bsgm2006v58n1a5
- D. Eliche, Q., J.A. Sandalio, P., S. Martínez, M., & L. Pérez, V. J. (2018). Investigation of use of coal fly ash in eco-friendly construction materials: fired clay bricks and silica-calcareous non fired bricks. *Ceramics International*, 4400-4412.
- Dash, S., Kar, B., Mukherjee, P., & Mustakim, S. (2016). A comparison among the physico-chemical-mechanical of three potential aggregates fabricated from fly ash. *J. Civ. Environ*, 6. doi:10.4172/2165-784X.1000243
- De Rossi, A., Simão, L., Ribeiro, M., Hotza, D., & Moreira, R. (2020). Study of cure conditions effect on the properties of wood biomass fly ash geopolymers. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(4). doi:doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.05.047.
- Elmrabet, R., Harfi, A. E., & Youbi, M. E. (2019). Study of properties of fly ash cements. *Materials Today: Proceedings*, 13(3), 850-856. doi:10.1016/j.matpr.2019.04.048.
- ENVIS. (2016). Propertis of Fly Ash. *WWW Document*. Obtenido de <http://cbrienvic.nic.in/Database/properties.html>
- Esmeray, E., & Atis, M. (2019). Utilization of sewage sludge, oven slag and fly ash in clay brick production. *Construction and Building Materials*, 194, 110-121. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.10.231.
- Galimberti, M., Agnelli, S., & Cipolletti, V. (2017). 11 - Hybrid filler systems in rubber nanocomposites. En S. Thomas, & H. J. Maria (Edits.), *Progress in Rubber Nanocomposites* (págs. 349-414). Woodhead Publishing. doi:10.1016/B978-0-08-100409-8.00011-5.
- Gamarra Quintero, J. S., Díaz Gonzalez, C., & Pacheco Sandoval, L. (2021). Exergoeconomic analysis of a simulated system of biomass gasification-based power generation with surplus syngas storage in a rural zone in Colombia. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 44(101075). doi:doi.org/10.1016/j.seta.2021.101075.

- Gan, Q., Xu, J., Peng, S., Yan, F., Wang, R., & Cai, G. (2021). Effects of heating temperature on pore structure evolution of briquette coals. *Fuel*, 296. doi:doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120651
- Gil, I. d. (03 de Noviembre de 2014). *Blog de tecnologia IES José Arencibia Gil*. Obtenido de <https://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/ecoblog/fsancac/2014/11/03/central-termoelectrica-esquemas/>
- Gollakota, A., Volli, V., & Shu, C.-M. (2019). Progressive utilisation prospects of coal fly ash: A review. *Science of The Total Environment*, 672, 951-989. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.03.337.
- Gómez Rojas, O., Blandón, A., Perea, C., & Mastalerz, M. (2020). Petrographic characterization, variations in chemistry, and paleoenvironmental interpretation of Colombian coals. *International Journal of Coal Geology*, 227. doi:doi.org/10.1016/j.coal.2020.103516
- Holtrop, F., Visscher, K., Jupp, A., & Slootweg, J. (2020). Chapter Three - Steric attraction: A force to be reckoned with. En I. Williams, & N. Williams (Edits.), *Advances in Physical Organic Chemistry* (págs. 119-141). Academic Press. doi:doi.org/10.1016/bs.apoc.2020.08.001.
- Huang, Q., Talan, D., Henao Restrepo, J., Restrepo Baena, O., Kecojevic, V., & Noble, A. (2019). Characterization study of rare earths, yttrium, and scandium from various Colombian coal samples and non-coal lithologies. *International Journal of Coal Geology*, 209, 14-26. doi:doi.org/10.1016/j.coal.2019.04.008.
- Inada, M., Tsujimoto, H., Eguchi, Y., Enomoto, N., & Hojo, J. (2005). Microwave-assisted zeolite synthesis from coal fly ash in hydrothermal process. *Fuel*, 84(12-13), 1482-1486.
- Jayaranjan, M. L., Hullebusch, E. D., & Annachhatre, A. P. (Abril de 2014). Reuse options for coal fired power plant bottom ash and fly ash. *13*, 467-486. doi:https://doi.org/10.1007/s11157-014-9336-4
- Ju, T., Meng, Y., Han, S., Lin, L., & Jiang, J. (2021). On the state of the art of crystalline structure reconstruction of coal fly ash: A focus on zeolites. *Chemosphere*, 283(131010). doi:10.1016/j.chemosphere.2021.131010.
- Ju, T., Meng, Y., Han, S., Lin, L., & Jiang, J. (2021). On the state of the art of crystalline structure reconstruction of coal fly ash: A focus on zeolites. *Chemosphere*, 283(131010). doi:doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131010.

- Juan, R., Hernández, S., Andrés, J., & Ruiz, C. (2007). Synthesis of granular zeolitic materials with high cation exchange capacity from agglomerated coal fly ash. *Fuel*, 86(12–13), 1811-1821. doi:doi.org/10.1016/j.fuel.2007.01.011.
- Kim, B., Prezzi, M., & Salgado, R. (2005). Geotechnical properties of fly and bottom ash mixtures for use in highway embankments. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, 131, 914-924. doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:7(914)
- Koroneos, C., Fokaides, P., & Christoforou, E. (2014). Exergy analysis of a 300 MW lignite thermoelectric power plant. *Energy*, 75, 304-311. doi:doi.org/10.1016/j.energy.2014.07.079.
- Koshy, N., Dondrob, K., Hu, L., Wen, Q., & Meegoda, J. N. (2019). Synthesis and characterization of geopolymers derived from coal gangue, fly ash and red mud. *Construction and Building Materials*, 206, 287-296. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.02.076.
- Kovler, K., Perevalov, A., Steiner, V., & Metzger, L. (s.f.). Radon exhalation of cementitious materials made with coal fly ash: Part 1 - Scientific background and testing of the cement and fly ash emanation. 82, 321-334. doi:10.1016/j.jenvrad.2005.02.004
- Kumar, P., Sharma, S., & Kandpal, B. (2020). Synthesis and mechanical characterization of biomass fly ash strengthened aluminium matrix composites. *Materials Today: Proceedings*, 26(2), 266-272. doi:doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.236.
- León Delgado, E. (2006). La importancia del carbón mineral en el desarrollo. *Revista Del Instituto De Investigación De La Facultad De Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica Y Geográfica*, 9(18), 91-97. doi:doi.org/10.15381/iigeo.v9i18.579
- Li, C., Zhou, Y., Tian, Y., Zhao, Y., Wang, K., Li, G., & Chai, Y. (2019). Preparation and characterization of mullite whisker reinforced ceramics made from coal fly ash. *Ceramics International*, 45(5), 5613-5616. doi:10.1016/j.ceramint.2018.12.021.
- Lieberman, R. N., Knop, Y., Izquierdo, M., Palmerola, N. M., Rosa, J. d., Cohen, H., . . . Querol, X. (2018). Potential of hazardous waste encapsulation in concrete with coal fly ash and bivalve shells. *Journal of Cleaner Production*, 185, 870-881. doi:10.1016/j.jclepro.2018.03.079.
- Lin, T., Zhang, Y.-Q., Zhang, L., & Klappenberger, F. (2018). On-Surface Chemistry of Alkyne Derivatives. En K. Wandelt (Ed.), *Encyclopedia of Interfacial Chemistry* (págs. 324-334). Elsevier. doi:doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.13087-2.

- Liu, X., Jin, Z., Jing, Y., Fan, P., Qi, Z., Bao, W., . . . Dong, L. (1 de Junio de 2021). Review of the characteristics and graded utilisation of coal gasification slag. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. doi:doi.org/10.1016/j.cjche.2021.05.007.
- Luo, Y., Ma, S., Liu, C., Zhao, Z., Zheng, S., & Wang, X. (2017). Effect of particle size and alkali activation on coal fly ash and their role in sintered ceramic tiles. *Journal of the European Ceramic Society*, 37(4), 1847-1856. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2016.11.032.
- Miao, G., Li, Z., Meng, Q., Li, J., & Yang, Y. (2021). Experimental research on the emission of higher molecular weight gases during coal oxidation. *Fuel*, 300. doi:doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120906.
- Moreira, F., Guerreiro, J., Brandão, L., & Sales, M. (2015). 1 - Synthesis of molecular biomimetics. En *Biomimetic Technologies* (págs. 3-31). In Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials. doi:doi.org/10.1016/B978-0-08-100249-0.00001-X
- Munawer, M. E. (2018). Human health and environmental impacts of coal combustion and post-combustion wastes. *17*, 87-96.
- Musyoka, N., Petrik, L., Balfour, G., Ndungu, P., Gitari, W., & Hums, E. (2012). Synthesis of zeolites from coal fly ash: Application of a statistical experimental design. *Chemical Intermediates*, 38(2), 471-486.
- Pinzón Cuta, C. H., Jaimes Alvarado, Y. D., & Ramón Valencia, B. (2019). *Desarrollo de materiales compuestos de arcilla con cenizas volantes de la combustion del carbon de la central térmica Termotasajero*. Pamplona.
- Pohanish, R. P. (2017). *Sittig's Handbook of Toxic and Hazardous Chemicals and Carcinogens*.
- Rakhi, R. (2019). 16 - Preparation and properties of manipulated carbon nanotube composites and applications. En A. Khan, M. Jawaid, Inamuddin, & A. Asiri (Edits.), *Nanocarbon and its Composites* (págs. 489-520). Woodhead Publishing. doi:doi.org/10.1016/B978-0-08-102509-3.00016-X.
- Raza, J., Khoja, A., Naqvi, S., Mehran, M., Shakir, S., Liaquat, R., . . . Ali, G. (2021). Methane decomposition for hydrogen production over biomass fly ash-based CeO₂ nanowires promoted cobalt catalyst. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5). doi:doi.org/10.1016/j.jece.2021.105816.

- Ren, J., Hu, L., Dong, Z., Tang, L., Xing, F., & Liu, J. (2021). Effect of silica fume on the mechanical property and hydration characteristic of alkali-activated municipal solid waste incinerator (MSWI) fly ash. *Journal of Cleaner Production*, 295. doi:doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126317.
- Ripp, C., Hambitzer, G., Zinck, L., & Borck, M. (2009). SECONDARY BATTERIES – LITHIUM RECHARGEABLE SYSTEMS – LITHIUM-ION | Inorganic Electrolyte Batteries. En C. Ripp, G. Hambitzer, L. Zinck, M. Borck, & J. Garche (Ed.), *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources* (págs. 383-392). Elsevier. doi:doi.org/10.1016/B978-044452745-5.00192-1.
- Sagastume Gutiérrez, A., Cabello Eras, J., Hens, L., & Vandecasteele, C. (2020). The energy potential of agriculture, agroindustrial, livestock, and slaughterhouse biomass wastes through direct combustion and anaerobic digestion. The case of Colombia. *Journal of Cleaner Production*, 269. doi:doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122317.
- Saikia, B., Hower, J., Islam, N., Sharma, A., & Das, P. (2021). Geochemistry and petrology of coal and coal fly ash from a thermal power plant in India. *Fuel*, 291(120122). doi:doi.org/10.1016/j.fuel.2020.120122.
- Sengupta, J. (2018). Chapter 9 - Carbon Nanotube Fabrication at Industrial Scale: Opportunities and Challenges. En C. Hussain (Ed.), *Handbook of Nanomaterials for Industrial Applications* (págs. 172-194). Elsevier. doi:doi.org/10.1016/B978-0-12-813351-4.00010-9.
- Shen, Y., Hu, Y., Wang, M., Bao, W., Chang, L., & Xie, K. (2021). Speciation and thermal transformation of sulfur forms in high-sulfur coal and its utilization in coal-blending coking process: A review. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. doi:doi.org/10.1016/j.cjche.2021.04.007.
- Sun, J., Zhou, H., Jiang, H., Zhang, W., & Mao, L. (2021). Recycling municipal solid waste incineration fly ash in fired bricks: An evaluation of physical-mechanical and environmental properties. *Construction and Building Materials*, 294. doi:doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123476.
- Szerement, J., Szatanik-Kloc, A., Jarosz, R., Bajda, T., & Mierzwa-Hersztek, M. (2021). Contemporary applications of natural and synthetic zeolites from fly ash in agriculture and environmental protection. *Journal of Cleaner Production*, 311. doi:10.1016/j.jclepro.2021.127461.
- Teixeira, E., Camões, A., Branco, F., Aguiar, J., & Fangueiro, R. (2019). Recycling of biomass and coal fly ash as cement replacement material and its effect on

- hydration and carbonation of concrete. *Waste Management*, 94, 39-48.
doi:doi.org/10.1016/j.wasman.2019.05.044.
- Thomas, S., & Hanna, J. M. (2017). Progress in Rubber Nanocomposites. *Composites Science and Engineering*. doi:https://doi.org/10.1016/C2014-0-03997-4
- Tian, X., Rao, F., Li, C., Ge, W., Ortiz Lara, N., Song, S., & Xia, L. (2021). Solidification of municipal solid waste incineration fly ash and immobilization of heavy metals using waste glass in alkaline activation system. *Chemosphere*. doi:doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131240.
- Turner Fairbank Research Institute. (2016). A Report on User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction.
- Valeeva, D., Kunilovab, I., Alpatovc, A., Mikhailovad, A., Goldberge, M., & Kondratiev, A. (Mayo de 2019). Complex utilisation of ekibastuz brown coal fly ash: Iron & carbon separation and aluminum extraction. 218.
- Vargas, E., Ospina, L., Neves, M., Tarelho, L., & Nunes, M. (2021). Optimization of FAME production from blends of waste cooking oil and refined palm oil using biomass fly ash as a catalyst. *Renewable Energy*, 163, 1637-1647.
doi:doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.030.
- Verma, D., & Goh, K. (2019). Chapter 11 - Functionalized Graphene-Based Nanocomposites for Energy Applications. En M. Jawaid, R. Bouhfid, & A. Kacem Qaiss (Edits.), *Functionalized Graphene Nanocomposites and their Derivatives* (págs. 219-243). Elsevier. doi:doi.org/10.1016/B978-0-12-814548-7.00011-8.
- Viswanathan, P., & Ramaraj, R. (2019). Chapter 2 - Functionalized Graphene Nanocomposites for Electrochemical Sensors. En A. Pandikumar, & P. Rameshkumar (Edits.), *Graphene-Based Electrochemical Sensors for Biomolecules* (págs. 43-65). Elsevier. doi:doi.org/10.1016/B978-0-12-815394-9.00002-9.
- Wandelt, K. (2018). *Encyclopedia of Interfacial Chemistry Surface Science and Electrochemistry*. Elsevier.
- Wang, N., Sun, X., Zhao, Q., Yang, Y., & Wang, P. (2020). Leachability and adverse effects of coal fly ash: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 396.
doi:10.1016/j.jhazmat.2020.122725.
- Wei, H., Zhang, Y., Cui, J., Han, L., & Li, Z. (2019). Engineering and environmental evaluation of silty clay modified by waste fly ash and oil shale ash as a road

- subgrade material. *Construction and Building Materials*, 196, 204-213. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.11.060.
- Yang, J., Su, Y., He, X., Tan, H., Jiang, Y., Zeng, L., & Strnadel, B. (2018). Pore structure evaluation of cementing composites blended with coal by-products: Calcined coal gangue and coal fly ash. *Fuel Processing Technology*, 181, 75-90. doi:10.1016/j.fuproc.2018.09.013.
- Zhao, S., Duan, Y., Li, Y., Liu, M., Lu, J., Ding, Y., . . . Du, M. (s.f.). Emission characteristic and transformation mechanism of hazardous trace elements in a coal-fired power plant. 214, 597-606. doi:10.1016/j.fuel.2017.09.093
- Zhou, E., Zhang, Y., Zhao, Y., Tian, Q., Chen, Z., lv, G., . . . Duan, C. (2021). Influence of bubbles on the segregated stability of fine coal in a vibrated dense medium gas–solid fluidized bed. *Particuology*. doi:doi.org/10.1016/j.partic.2021.03.018.