



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Energía y Ambiente

**CARACTERIZACIÓN Y POSIBLES USOS DE LAS CENIZAS VOLANTES Y DE FONDO
PROCEDENTES DE UNA PLANTA PRODUCTORA DE ENERGÍA ELÉCTRICA A BASE DE
CARBÓN, GUATEMALA**

Ing. Ruben Adolfo Sierra García

Asesorado por la Mtra. Ingrid Lorena Benítez Pacheco

Guatemala, noviembre de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CARACTERIZACIÓN Y POSIBLES USOS DE LAS CENIZAS VOLANTES Y DE FONDO
PROCEDENTES DE UNA PLANTA PRODUCTORA DE ENERGÍA ELÉCTRICA A BASE DE
CARBÓN, GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

ING. RUBEN ADOLFO SIERRA GARCÍA

ASESORADO POR LA MTRA. INGRID LORENA BENÍTEZ PACHECO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN ENERGÍA Y AMBIENTE

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

| | |
|------------|--------------------------------------|
| DECANA | Ing. Aurelia Anabela Cordova Estrada |
| VOCAL I | Ing. José Francisco Gómez Rivera |
| VOCAL II | Ing. Mario Renato Escobedo Martínez |
| VOCAL III | Ing. José Milton de León Bran |
| VOCAL IV | Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente |
| VOCAL V | Br. Fernando José Paz González |
| SECRETARIO | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez |

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ LA DEFENSA DE TESIS

| | |
|------------|--------------------------------------|
| DECANA | Ing. Aurelia Anabela Córdoba Estrada |
| EXAMINADOR | Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí |
| EXAMINADOR | Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque |
| EXAMINADOR | Ing. Marvin Eduardo Mérida Cano |
| SECRETARIO | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez |

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

CARACTERIZACIÓN Y POSIBLES USOS DE LAS CENIZAS VOLANTES Y DE FONDO PROCEDENTES DE UNA PLANTA PRODUCTORA DE ENERGÍA ELÉCTRICA A BASE DE CARBÓN, GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha febrero 2015.

Ing. Ruben Adolfo Sierra García

DTG. 660.2021

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **CARACTERIZACIÓN Y POSIBLES USOS DE LAS CENIZAS VOLANTES Y DE FONDO PROCEDENTES DE UNA PLANTA PRODUCTORA DE ENERGÍA ELÉCTRICA A BASE DE CARBÓN, GUATEMALA**, presentado por el Ingeniero **Ruben Adolfo Sierra García**, estudiante de la **Maestría en Artes en Energía y Ambiente**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



ing. Arabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, noviembre de 2021.

AACE/cc



Guatemala, noviembre de 2021

LNG.EEP.OI.088.2021

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

“CARACTERIZACIÓN Y POSIBLES USOS DE LAS CENIZAS VOLANTES Y DE FONDO PROCEDENTES DE UNA PLANTA PRODUCTORA DE ENERGÍA ELÉCTRICA A BASE DE CARBÓN, GUATEMALA”

presentado por **Ruben Adolfo Sierra García** quien se identifica con carné **100021112** correspondiente al programa de **Maestría en artes en Energía y ambiente** ; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”


Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director



Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería



Guatemala, 04 de agosto 2021.

M.Sc. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Presente

M.Sc. Ingeniero Álvarez Cotí:

Por este medio informo que he revisado y aprobado el **INFORME FINAL** del trabajo de graduación titulado: **“Caracterización y posibles usos de las cenizas volantes y de fondo procedentes de una planta productora de energía eléctrica a base de carbón mineral, Guatemala”** del estudiante Ruben Adolfo Sierra García quien se identifica con número de carné 100021112 del programa de **Maestría en Energía y Ambiente**.

Con base en la evaluación realizada hago constar que he evaluado la calidad, validez, pertinencia y coherencia de los resultados obtenidos en el trabajo presentado y según lo establecido en el **Normativo de Tesis y Trabajos de Graduación aprobado por Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería Punto Sexto inciso 6.10 del Acta 04-2014 de sesión celebrada el 04 de febrero de 2014**. Por lo cual el trabajo evaluado cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.

Atentamente,

M.Sc. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador
Desarrollo Socio Ambiental y Energético
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería USAC



Guatemala, 19 de julio de 2021

Ingeniero M.Sc.
Edgar Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería USAC
Ciudad Universitaria, Zona 12

Distinguido Ingeniero Álvarez:

Respetuosamente me dirijo a usted para hacer de su conocimiento que como asesor de trabajo de graduación del estudiante Rubén Adolfo Sierra García, Carné número 100021112, cuyo título es "**CARACTERIZACIÓN Y POSIBLES USOS DE LAS CENIZAS VOLANTES Y DE FONDO PROCEDENTES DE UNA PLANTA PRODUCTORA DE ENERGÍA ELÉCTRICA A BASE DE CARBÓN, GUATEMALA**", para optar al grado académico de Maestro en Energía y Ambiente, he procedido a la revisión del mismo.

En tal sentido, en calidad de asesor doy mi anuencia y aprobación para que el estudiante Sierra García, continúe con los trámites correspondientes.

Sin otro particular, me es grato suscribirme de usted.

Atentamente,



M.Sc. Ingrid Lorena Benítez Pacheco
Maestra en Ciencia y Tecnología del Medio Ambiente.
Asesora Química
Maestría Ciencia y Tecnología
del Medio Ambiente
Colegiado No. 1974

ACTO QUE DEDICO A:

| | |
|----------------------------|---|
| Dios | Por la vida. |
| Mis padres | Por ser ese instrumento que marco mi vida, en especial a ti madre. |
| Mi esposa | Por apoyarme y estar a mi lado en este ciclo que estoy culminando. |
| Mi hijo | La gota de inspiración que me impulso a finalizar el presente trabajo de investigación. |
| Mis hermanos | Por ser el complemento de formación en mi vida y por tan buenos y gratos momentos. |
| Mis tíos Los García | Por ser una importante influencia en mi vida y en mi carrera. |
| A mi abuela Mary | Por su incomparable cariño. |
| Sexta cohorte | Por los buenos momentos vividos y compartidos en este aprendizaje. |

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Mi Alma Máter, por llenarme de conocimiento y sabiduría.

**Escuela de Estudios de
Postgrado - FIUSAC**

Por ser el trampolín de mi superación profesional.

**Mtra. Lic. Ingrid Lorena
Benítez Pacheco**

Por permitirse confiar y asesorar el presente trabajo de investigación y el consecuente apoyo y seguimiento para la realización del mismo, ¡muchas gracias!

**MSc. Ing. Juan Carlos
Fuentes Montepeque**

Por compartir sus conocimientos e influencia positiva para la finalización de este trabajo de graduación.

**Dr. Renato Giovanni
Ponciano Sandoval**

Por su insistencia, conocimiento, seguimiento y soporte durante el proceso de revisión. ¡Muchas gracias por tan alto nivel de profesionalismo!

| | | |
|----------|--|----|
| 2.4.1.3. | Propiedades químicas de las cenizas volantes | 15 |
| 2.4.2. | Cenizas de fondo (CF) | 17 |
| 2.4.3. | Escoria de caldera (BS)..... | 17 |
| 2.4.4. | Yeso de desulfuración de gases de combustión (FGD) | 19 |
| 2.4.5. | Cenizas de combustión de lecho fluidizado (FBC)..... | 19 |
| 2.4.6. | Cenosferas | 21 |
| 2.5. | Energía eléctrica y carbón mineral | 22 |
| 2.5.1. | Contexto internacional..... | 23 |
| 2.5.2. | Contexto nacional..... | 26 |
| 2.6. | Medio ambiente y carbón mineral | 29 |
| 2.6.1. | Uso del carbón y el ambiente | 29 |
| 2.6.2. | Eficacia de la combustión..... | 31 |
| 2.7. | Usos y aplicaciones del carbón mineral | 32 |
| 2.7.1. | Cenizas volantes en cemento | 32 |
| 2.7.2. | Cenizas volantes en hormigón | 33 |
| 2.7.3. | Materiales puzolánicos | 34 |
| 2.7.4. | Estabilización de suelos | 34 |
| 2.7.5. | Otros usos del carbón | 35 |
| 3. | MARCO METODOLÓGICO | 37 |
| 3.1. | Características del estudio | 37 |
| 3.1.1. | Enfoque | 37 |
| 3.1.2. | Alcance..... | 37 |
| 3.1.3. | Diseño | 38 |
| 3.2. | Unidad de análisis | 38 |
| 3.3. | Variables | 38 |

| | | |
|----------|---|----|
| 3.4. | Fases de la investigación | 39 |
| 3.4.1. | Fase 1 | 39 |
| 3.4.2. | Fase 2..... | 39 |
| 3.4.3. | Fase 3..... | 40 |
| 3.4.3.1. | Contenido de humedad (H)..... | 41 |
| 3.4.3.2. | Contenido de cenizas (Cz) | 41 |
| 3.4.3.3. | Materia volátil (Mv) | 42 |
| 3.4.3.4. | Carbono fijo (Cfx)..... | 42 |
| 3.4.3.5. | Pérdidas por ignición (LOI) y ratio del combustible (Rc)..... | 43 |
| 3.4.3.6. | Análisis químico..... | 43 |
| 3.4.3.7. | Tratamiento de datos | 44 |
| 3.4.4. | Fase 4..... | 45 |
| 3.4.5. | Fase 5..... | 45 |
| 4. | PRESENTACIÓN DE RESULTADOS..... | 47 |
| 4.1. | Análisis inmediato de las cenizas volantes y de fondo | 47 |
| 4.2. | Perdidas por calcinación o ignición | 49 |
| 4.3. | Análisis químico..... | 50 |
| 4.4. | Posibles usos de las cenizas volantes y de fondo | 52 |
| 5. | DISCUSIÓN DE RESULTADOS | 53 |
| 5.1. | Análisis inmediato de las cenizas volantes y de fondo | 53 |
| 5.2. | Pérdidas por calcinación o ignición (LOI) | 57 |
| 5.3. | Análisis químico..... | 59 |
| 5.4. | Posibles usos | 61 |
| 5.4.1. | Material puzolánico..... | 61 |
| 5.4.2. | Grava para capas base y sub-base | 62 |
| 5.4.3. | Terraplenes..... | 63 |

| | |
|-----------------------------------|----|
| 5.4.4. Extracción de sílice | 64 |
| CONCLUSIONES | 65 |
| RECOMENDACIONES | 67 |
| REFERENCIAS | 69 |
| APÉNDICES..... | 75 |
| ANEXOS..... | 87 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| | | |
|-----|--|----|
| 1. | Tipos de carbón..... | 7 |
| 2. | Diagrama de producción de CCPs de plantas eléctricas a base de carbón | 10 |
| 3. | Porcentaje de CCPs en EEUU. Período 2019..... | 11 |
| 4. | Producción de escoria de caldera BS..... | 18 |
| 5. | Producción de cenizas de tipo FBC..... | 20 |
| 6. | Demanda de carbón. Períodos 2000, 2017 y 2023 | 24 |
| 7. | Generación de electricidad por fuente. Sudeste Asiático 2000-2022 | 25 |
| 8. | Participación del carbón en la generación de energía para países europeos seleccionados, 2018..... | 26 |
| 9. | Generación por tipo de combustible, Guatemala 2019..... | 27 |
| 10. | Análisis de las cenizas volantes | 48 |
| 11. | Análisis de las cenizas de fondo | 48 |
| 12. | Perdidas por calcinación de cenizas volantes y de fondo | 49 |

TABLAS

| | | |
|------|---|----|
| I. | Clasificación de carbones por rango. Norma ASTM D388 | 8 |
| II. | Clasificación de las cenizas volantes. Norma ASTM C618 | 13 |
| III. | Comparativo entre composiciones químicas de las cenizas volantes y cemento Portland | 14 |
| IV. | Composición de las cenizas volantes según su tipo de carbón..... | 16 |

| | | |
|-------|---|----|
| V. | Tipos de CCPs, sus constituyentes y usos potenciales | 21 |
| VI. | Plantas de energía eléctrica que usan carbón, Guatemala..... | 27 |
| VII. | Propiedades fisicoquímicas de los combustibles fósiles utilizados en Guatemala..... | 28 |
| VIII. | Variables de estudio..... | 38 |
| IX. | Tratamiento estadístico para el análisis inmediato..... | 49 |
| X. | Promedio y tratamiento estadístico para LOI de las cenizas | 50 |
| XI. | Óxidos mayoritarios para las cenizas volantes | 50 |
| XII. | Óxidos mayoritarios para las cenizas de fondo..... | 51 |
| XIII. | Suma de óxidos principales $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ | 51 |
| XIV. | Relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ | 51 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Significado |
|------------------------------------|--|
| AMM | Agente del mercado mayorista |
| Al₂O₃ | Alúmina (Óxido de Aluminio) |
| As | Arsénico |
| ACAA | Asociación americana de cenizas del carbón |
| PRB | Barreras reactivas permeables |
| Cd | Cadmio |
| CaO | Cal (Óxido de Calcio) |
| BTU/lb | Capacidad calorífica en el sistema inglés |
| kJ/kg | Capacidad calorífica en el sistema internacional |
| CF | Ceniza de fondo |
| FBC | Ceniza de lecho fluidizado |
| CV | Ceniza volante |
| R | Coefficiente de variación |
| COGUANOR | Comisión guatemalteca de normas |
| CNEE | Comisión nacional de energía eléctrica |

| | |
|-----------------------|--|
| pH | Concentración de iones de hidrógeno |
| Cfx | Contenido de carbono fijo |
| Cz | Contenido de cenizas |
| Mv | Contenido de materia volátil |
| Cr | Cromo |
| σ | Desviación Estándar |
| CO₂ | Dióxido de Carbono |
| BS | Escoria de caldera |
| GWh | Gigavatio hora |
| °C | Grado Celsius |
| H | Humedad |
| WCI | Instituto mundial del carbón |
| INCYT | Instituto nacional de ciencia y tecnología |
| NCB | Junta nacional del carbón |
| kg | Kilogramo |
| MgO | Magnesia (Óxido de Magnesio) |
| MW | Megavatio |
| MWh | Megavatio hora |
| Ni | Níquel |

| | |
|------------------------------------|--|
| N₂ | Nitrógeno |
| SO_x | Óxidos de Azufre |
| Fe₂O₃ | Óxido de Hierro |
| NO_x | Óxidos de Nitrógeno |
| O₂ | Oxígeno |
| LOI | Pérdidas por calcinación o ignición |
| % | Porcentaje |
| ESP | Precipitadores electrostáticos |
| CCPs | Productos de la combustión del carbón |
| SiO₂ | Sílice (Óxido de Silicio) |
| ASTM | Sociedad americana de ensayos y materiales |

GLOSARIO

| | |
|------------------------------|--|
| Análisis Elemental | Es el análisis que se realiza bajo el punto de vista químico y proporciona su composición elemental: carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre y otras impurezas. |
| Análisis Inmediato | Este análisis proporciona los siguientes datos del tipo de carbón en cuestión: humedad, materia volátil, carbono fijo y cenizas. |
| Antracita | El carbón de más alto rango. Es un carbón más duro, brillante y negro que se utiliza principalmente para calefacción residencial y de espacios comerciales. |
| Carbón Bituminoso | Es un carbón denso, generalmente negro, a veces marrón oscuro, usado principalmente como combustible para generación de energía por medio de vapor en cantidades sustanciales, también utilizado para calor y aplicaciones de energía en la industria. |
| Carbón Sub-bituminoso | Carbón con rango de propiedades que va desde los lignitos hasta carbón bituminoso y se utilizan principalmente como combustible para generación de energía eléctrica por vapor. |

| | |
|------------------------------|---|
| Carbono Fijo (Cfx) | Residuo carbonoso, menos la ceniza, que permanece en el contenedor de prueba, una vez extraída la materia volátil al realizar el análisis inmediato de un combustible sólido. |
| Cenizas (Cz) | Es la materia incombustible residual que queda después de quemar el carbón completamente. |
| Cenizas de Fondo (CF) | Residuo transportado por los gases de combustión en un horno. Son parte del residuo no combustible de combustión en una caldera o el incinerador los cuales son depositados en el fondo de la caldera. |
| Cenizas Volantes (CV) | Las cenizas volantes son los residuos sólidos que se obtienen por precipitación electrostática o por captación mecánica de los polvos que acompañan a los gases de combustión de los quemadores de centrales termoeléctricas alimentadas por carbones pulverizados. |
| Factor de Planta | Representa el porcentaje de tiempo en el que la planta se encuentra generando energía. |
| Humedad | Se trata del agua presente en los poros del carbón. Se expresa en porcentaje. |

| | |
|-----------------------------|---|
| Inquemados | Se producen a partir de combustibles sólidos o líquidos, los cuales están formados mayoritariamente por partículas de carbono e hidrocarburos fraccionados. |
| Lignito | Es el carbón de menor rango y se utiliza únicamente como combustible para generación de energía eléctrica por vapor. |
| Materia Volátil (Mv) | Productos gaseosos desprendidos, o que pueden desprenderse, de un material sólido o líquido, y cuantificados por métodos definidos. |
| Pasivo Ambiental | Acumulación de daños no compensados que han sido producidos por alguna actividad hacia el medio ambiente. |
| Perdida por Ignición | La calcinación es el proceso de calentar una sustancia a temperatura elevada, (temperatura de descomposición), para provocar la descomposición térmica o un cambio de estado en su constitución física o química. |
| Puzolana | Materiales naturales o productos artificiales capaces de combinarse con la cal grasa, hidráulica o de hidrólisis de los cementos, a la temperatura ambiente y en presencia de agua, para formar compuestos hidráulicos de los constituyentes del <i>clinker</i> Portland. |

RESUMEN

La investigación presentada a continuación consistió en la caracterización de las cenizas volantes y de fondo procedentes de una planta generadora de energía eléctrica a base de carbón mineral con el fin de evaluar sus posibles usos, así como recomendaciones para una mejora en el proceso de combustión logrando mejoras significativas en el uso de la energía y la gestión de los residuos, evitando consecuentemente el potencial impacto al medio ambiente y a la salud humana.

Se realizaron los muestreos de las cenizas volantes y de fondo, obteniéndose mediante análisis inmediato los porcentajes de carbono fijo, humedad, materia volátil y ceniza. Adicionalmente se determinó el porcentaje de inquemados (LOI por sus siglas en inglés) de las muestras para conocer la capacidad energética del quemador. Posteriormente se realizó la caracterización química de las muestras con la finalidad de conocer su composición y posibles usos.

Los resultados obtenidos a partir de los análisis descritos determinaron el rango del carbón del que provenían como Bituminoso, clasificándolas como cenizas silicoaluminosas clase F, puzolánicas no activas. Con dicha caracterización se determinaron los usos más idóneos al contexto nacional siendo estos; la elaboración de hormigón, uso como gravas de bases y sub-bases de suelos, aplicación en terraplenes y extracción de sílice.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

De acuerdo con datos del Administrador del Mercado Mayorista (AMM), la producción total de energía durante el 2019 fue de 13,368.76 GWh (AMM, 2019) correspondiendo al carbón mineral un 28.84 % de participación con una generación de 3,856.08 GWh versus los 1,237.92 GWh generados en el 2012 y que representaban el 14.22 % del uso del mismo (Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE), 2013), duplicando su utilización para generación de energía en un período de entre 7 y 8 años y consecuentemente el incremento de cenizas como subproducto del proceso.

- Descripción del problema

La presente investigación se desarrolló en una planta termoeléctrica a base de carbón mineral ubicada en el Departamento de Escuintla, la cual genera en promedio 83 MWh de energía.

Si por cada MW generado en una central térmica se consumen entre 15 y 19 toneladas en promedio de carbón y el total de peso de las cenizas producidas es aproximadamente el 30 % de la masa de carbón consumida (Rey, 2017), la producción promedio anual de cenizas se estima este entre 375 ton y 470 ton por año de las cuales el 70 % serán cenizas volantes y 30 % cenizas de fondo, por lo que determinar el posible uso de este subproducto permitirá reducir el impacto ambiental asociado a su disposición final.

- Delimitación del problema
 - La toma de muestras se realizó en las instalaciones de la central termoeléctrica al sur del país, los días domingos por un lapso de mes y medio (recolección de 6 muestras en duplicado por tipo de ceniza).
 - El desarrollo de la fase de análisis se realizó en el Laboratorio de Química Industrial de la Universidad de San Carlos de Guatemala la semana posterior a la recolecta del muestreo.

- Preguntas de investigación
 - Principal

¿Con qué tipo de valores o información obtenida de los análisis inmediatos, pérdidas por calcinación y análisis químicos de las cenizas, se podrá contar para su respectiva caracterización y consecuentemente su determinación y/o delimitación de su aprovechamiento industrial a fin de minimizar el impacto ambiental que estas pueden llegar a generar como subproductos de un proceso anterior?
 - Específicas
 - ¿Qué tipo de información arrojará el análisis inmediato que pueda apoyar a validar y/o determinar el tipo de carbón mineral del que provienen dichos subproductos del proceso de combustión de una central termoeléctrica?

- ¿Qué tipo de observación dará el análisis de pérdida por calcinación y cuál será su relación con la eficiencia del proceso de combustión?
- ¿Qué datos se podrán extraer del análisis químico de las cenizas a modo de lograr caracterizar las mismas?
- ¿Cuáles serán los usos posibles y de aprovechamiento de las cenizas estudiadas de acuerdo a los resultados obtenidos?

OBJETIVOS

General

Caracterizar las cenizas volantes y de fondo producidas por la generación de energía en la central termoeléctrica con el fin de determinar sus posibles usos y evaluar una mejora en el proceso de combustión.

Específicos

- Efectuar un análisis inmediato que incluya humedad, cenizas, materia volátil y carbono fijo para las cenizas volantes y de fondo.
- Determinar el porcentaje de pérdidas por calcinación (LOI) de las cenizas volantes y de fondo.
- Evaluar la composición de los óxidos mayoritarios mediante análisis químico por cada tipo de ceniza a estudiar.
- Determinar los posibles usos de la ceniza volante y de fondo basado en su análisis inmediato y químico.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

- Características del estudio.
 - Enfoque: de tipo mixto, utilizando análisis cuantitativo y cualitativo para el mismo.
 - Alcance: de tipo descriptivo-explicativo.
 - Diseño: del tipo no experimental.
 - Variables:
 - Humedad
 - Materia volátil
 - Cenizas
 - Carbono fijo
 - Pérdidas por calcinación
 - Óxidos mayoritarios

- Fases de la investigación.

La metodología que se propuso para dar respuesta a las interrogantes y consecuentemente los objetivos planteados en este estudio consistió en:

- Fase 1: revisión de literatura haciendo una recopilación de material bibliográfico que sirvió de soporte para el desarrollo de dicha investigación.

- Fase 2: muestreo en campo de las cenizas, obteniéndose las muestras necesarias para el respectivo análisis. Las cenizas de fondo

fueron recopiladas del sistema de recolección en la cercanía de la zona del horno de la caldera. Las cenizas volantes fueron recopiladas a la salida del sistema de precipitación de la chimenea.

- Fase 3: análisis de las muestras en el laboratorio de química industrial de la facultad de ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Se realizaron en duplicado para cada muestra de cenizas los análisis de humedad, porcentaje de cenizas, materia volátil, carbono fijo, inquemados, así como sus componentes mayoritarios.
- Fase 4: revisión y análisis de los resultados cuantitativos de los análisis de laboratorio para la interpretación y propuesta de la fase cualitativa sobre los usos posibles de las cenizas.
- Fase 5: interpretación, discusión y presentación de resultados.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación abordó, bajo la línea de investigación de tratamientos y estrategias en la gestión de residuos de la Maestría en Energía y Ambiente de la Escuela de Estudios de Postgrados de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, la problemática en la generación de residuos enfocándose en las cenizas producidas en una central termoeléctrica a base de carbón mineral.

El carbón mineral ha sido para la humanidad uno de los recursos energéticos no renovables más importantes para satisfacer sus necesidades, ya que la exploración y explotación de éste ha tenido consecuencias tanto en la evolución como en la modernización de la sociedad. La demanda creciente de electricidad de los países europeos ha llevado a la construcción de grandes centrales termoeléctricas de carbón. Las transformaciones físico-químicas que tienen lugar durante la combustión del carbón en una central termoeléctrica dan lugar a emisiones de elementos potencialmente tóxicos al medio ambiente circundante (Smith, 1987; Clarke y Sloss, 1992).

Las emisiones están constituidas por gases de combustión, acompañados de cenizas volantes que escapan a los sistemas de retención de partículas. A pesar de que los sistemas de retención de partículas tienen eficiencias muy altas (cerca de un 99.95 % para precipitadores electrostáticos), la cantidad de cenizas en valor absoluto que se emiten es alta, puesto que los consumos de carbón también lo son.

Si, por ejemplo, se analiza una central de 1000 MW con un consumo de 12000 toneladas de carbón sub-bituminoso al día con un contenido de un 25 % de cenizas y una producción de cenizas volantes de un 80 % del residuo total; entonces la producción de cenizas volantes se puede estimar en 2400 toneladas al día, de modo que, aunque se retuviera un 99.95 % de éstas, la central emitiría cerca de 1 tonelada al día de cenizas. Una vez en la atmósfera las cenizas volantes pueden ser transportadas y dispersadas según las condiciones atmosféricas a muy distinta escala (Mason, 1992).

Las cenizas volantes pueden alcanzar el suelo a distancias que van desde unos pocos a cientos de kilómetros dependiendo de su tamaño así como de la altura de la chimenea. Las partículas de las cenizas volantes son altamente contaminantes pues su alta área superficial permite su enriquecimiento en elementos traza, potencialmente tóxicos, que se fijan en éstas durante el proceso de enfriamiento de los gases de combustión (Klein et al., 1975; Coles et al., 1979).

Se considera que algunos compuestos de As, Cd, Cr y Ni son carcinógenos humanos, cuya vía principal de entrada al cuerpo es por inhalación (Que Hee et al., 1982). Además, mientras que las partículas más pequeñas son ligeramente mutágenas, las de mayor tamaño no lo son (Fisher et al., 1979).

Actualmente, China e India juntas producen aproximadamente 200 millones de toneladas de ceniza de carbón cada año, Rusia y los países europeos principalmente Polonia y la antigua Checoslovaquia, Rumania, Alemania, España y el Reino Unido, generan alrededor de 250 millones de toneladas de ceniza de carbón por año. El Banco Mundial ha advertido que

hacia el 2015, en la India se necesitará un metro cuadrado por persona para almacenar todas las cenizas volantes que se habrán producido.

Canadá, Estados Unidos y Alemania son pioneros a nivel mundial en la utilización de cenizas para la industria de la construcción, Colombia y México realizan estudios al respecto y ya han obtenido resultados alentadores.

En el contexto nacional, las carboneras San José de 133 MW, La Libertad de 13.36 MW, Las Palmas II y ESI con 84 MW están generando de manera efectiva al SNI (Sistema Nacional Interconectado) y *Jaguar Energy* de 300 MW se unió hace un par de años a la oferta nacional al iniciar operaciones en el 2016, cambiando con ello la matriz energética del país.

La presente investigación se basó en el monitoreo y caracterización de las cenizas volantes y de fondo producidas durante el proceso de combustión de una central termoeléctrica a base de carbón mineral, con el objetivo de determinar el aprovechamiento adecuado de estos subproductos logrando así reducir el impacto que generan como pasivo ambiental a largo plazo, así como recomendaciones para una mejora en el proceso de combustión de acuerdo a los resultados obtenidos.

Dicho estudio contiene los siguientes capítulos en los cuales se sintetizó todo el trabajo investigativo:

- Capítulo 1. Marco Referencial: revisión de los estudios e investigaciones previas que tienen relación con dicho trabajo.
- Capítulo 2. Marco Teórico: resumen y síntesis de la literatura que da soporte a la investigación.

- Capítulo 3. Marco Metodológico: todo el proceso de toma de muestras, ensayos y análisis para la obtención de resultados.
- Capítulo 4. Presentación de Resultados: datos estructurados obtenidos de los análisis de las muestras.
- Capítulo 5. Discusión de Resultados: análisis e interpretación de los resultados obtenidos que dan respuesta a las preguntas y objetivos planteados.

1. MARCO REFERENCIAL

1.1. Estudios previos

Tanto a nivel mundial y en la actualidad en el país la inclusión de carbón para la producción de energía eléctrica ha tomado suma importancia. Sin embargo, la generación de las cenizas del proceso de combustión conlleva a una serie de alteraciones medioambientales que de una u otra manera no son bien vistas a pesar de protocolos establecidos para la disposición de las mismas. A continuación se listan algunos trabajos de investigación que tratan sobre las cenizas, sus características fisicoquímicas y el uso de estas como materia prima en otros procesos.

J, Marta; I, Sánchez y M, Frías (1999), en el trabajo de investigación denominado “Estudio de las variaciones mineralógicas y morfológicas en cenizas volantes provocadas por fenómenos de lixiviación”, se utilizaron muestras de tres cenizas volantes con contenidos de 2 a 30 % en peso de CaO. “El estudio se centró en el seguimiento de los elementos más solubles, y en la formación de nuevas fases cristalinas secundarias, para el ensayo de lixiviación realizado” (Marta, Sánchez, & Frías, 1999, pág. 43). Los resultados arrojaron que el fenómeno de lixiviación para este estudio en particular, no genera valores que puedan extrapolarse a situaciones reales. Adicional, se pudo obtener una orientación de la solubilidad de algunos de los elementos tóxicos presentes (Marta, Sánchez, & Frías, 1999, pág. 43).

Cabielles Ondina, Miguel (2006), en su tesis doctoral denominada “Reutilización de inquemados de cenizas volantes como precursores para la

preparación de materiales grafiticos”, abordó el tema de estos subproductos de la combustión del carbón, preparándolos como:

materiales grafiticos que pudiesen ser utilizados en otro tipo de aplicaciones industriales, como una nueva vía de aprovechamiento de los mismos. En su investigación trabajo con muestras de cenizas volantes de 3 centrales españolas, de las cuales obtuvo contenidos altos de inquemados, los cuales fueron caracterizados y grafitizados. Con los resultados de estos análisis, logró establecer las relaciones entre la conductividad eléctrica y parámetros cristalinos y Raman de los materiales preparados a partir de los inquemados de las cenizas volantes (Cabielles, 2006, pág. 37).

González, Alexia; Arancibia, Nicolás; Jara, Alejandra; Mora, María y Navia, Rodrigo (2006), en el estudio de investigación denominado “Cenizas volantes y su aplicación como material de relleno en barreras reactivas permeables (PRB)”, establecieron como objetivos la caracterización de 3 cenizas volantes con la finalidad de su reutilización como material de relleno. “La caracterización de las cenizas volantes incluyó composición mineralógica y química, evaluándose mediante un prueba de lixiviación inorgánico, un fraccionamiento secuencial y un ensayo de remoción para las 3 muestras” (González, Arancibia, Jara, Mora, & Navia, 2006). “Se determinó en base a los resultados, que las mismas pueden ser reutilizadas como material de relleno en las PRB y para el caso de la muestra CV2, el test de lixiviación arrojó que ésta era un residuo peligroso” (González, Arancibia, Jara, Mora, & Navia, 2006).

Velásquez Vallejo, Leonardo Fabio; De la Cruz Morales, Fernando; Sánchez Morales, John Freddy y Marín Laverde, Mauricio Alberto (2007), en el trabajo de investigación realizado en la Escuela de Procesos y Energía de la

Universidad Nacional de Colombia, denominado “Remoción de carbón inquemado de las cenizas volantes producidas en el proceso de combustión de carbón”, realizaron análisis granulométrico para la separación física de las diversas muestras, aprovechando el proceso de tamizaje, para conseguir una mayor remoción de inquemados que validarían mediante análisis inmediato. “El porcentaje de inquemados recuperados fue de 60 %, 68.8 % y 70.9 % para cada muestra respectivamente, las cenizas resultantes que pasan la malla escogida fueron de 27.3 %, 34.8 % y 23.0 %” (Velásquez, De La Cruz, Sánchez, & Marín, 2007, pág. 107).

Martínez Rosales, Edgar Jacobo (2008), en su estudio de tesis denominado “Evaluación de la ceniza volante producida por la combustión de carbón, en la planta generadora San José *Power Station*, ubicada en el Departamento de Escuintla, Guatemala, para utilizarse como puzolana artificial”, evaluó las cenizas volantes producidas en dicha central eléctrica, con la finalidad de demostrar su uso tanto como puzolana artificial como aditivo en cementos mezclados. Sus resultados resaltan que “la ceniza volante evaluada no cumplió con lo indicado en la norma ASTM C-618, por lo que su uso como puzolana es limitado, tampoco lo hicieron el índice de actividad de resistencia con cemento Portland” (Martínez, 2008, pág. 33).

A la fecha, ésta investigación representa la única documentada en relación al tema de las cenizas volantes y su posible uso a nivel nacional, enfocándose siempre en su aplicación en la industria del cemento y la construcción.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Carbón mineral: origen y composición

El carbón es una masa estratificada y compacta de materia vegetal que sufre un proceso de degradación al aumentar la presión y la temperatura, combinando así sus propiedades químicas y físicas como resultado de acción geológica (León, 2006). De acuerdo al Instituto Mundial del Carbón (WCI por sus siglas en inglés), se define como “una roca combustible, sedimentaria y de origen orgánico, compuesta principalmente por carbono, hidrógeno y oxígeno” (WCI, 2005, pág. 2).

El origen y formación proviene de los procesos geológicos que se dan en la corteza terrestre, los sedimentos y depósitos de lodos que se encuentran en las profundidades, pasan a transformarse en turbas y posteriormente en carbón (WCI, 2005). Esta formación inicio en el denominado período carbonífero en donde la turba pasa a convertirse en lignito. Al aumentar su madurez, el lignito pasa a transformarse en los denominados carbones sub-bituminosos por efectos del tiempo, la presión y la temperatura (WCI, 2005).

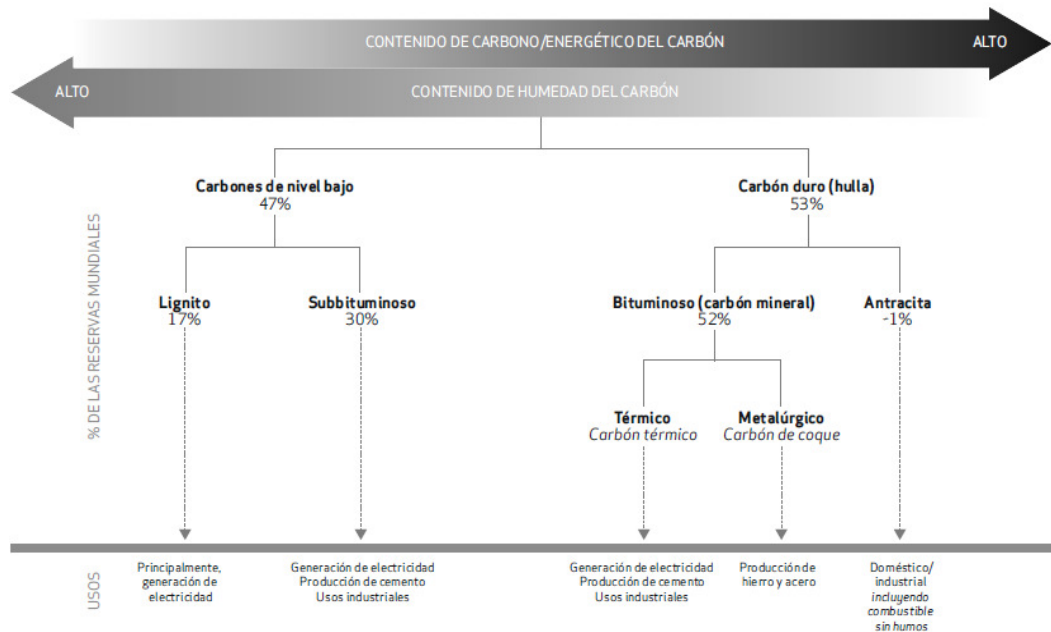
Con el tiempo (háblese de millones de años) surgieron cambios físico-químicos hasta formarse los carbones bituminosos o carbones minerales, adicional al sumarse el incremento de su respectiva madurez orgánica, finalmente se obtiene la formación de la antracita (WCI, 2005).

2.2. Tipos de carbón mineral

De acuerdo al instituto Mundial del Carbón los tipos de carbón están ligados a:

el índice de cambio sufrido por un carbón al madurar desde la turba hasta la antracita, conocido como carbonificación, tiene una gran importancia en las propiedades físicas y químicas, y se denomina nivel del carbón. Los carbones de rango bajo, como el lignito y los carbones sub-bituminosos son normalmente más blandos y desmenuzables, con un aspecto más mate y terroso. Se caracterizan por niveles de humedad altos y bajo contenido en carbono, por lo que su contenido energético también es bajo. Los carbones de nivel alto suelen ser más duros y resistentes, y a menudo tienen un color más negro y vítreo. Contienen más carbono, menos humedad y producen más energía. La antracita se encuentra en el rango superior de la escala de categorías y tiene un contenido superior de carbono y energía, y un nivel inferior de humedad (WCI, 2005, pág. 2).

Figura 1. Tipos de carbón



Fuente: (WCI, 2005, pág. 4).

2.3. Clasificación del carbón

El análisis inmediato de materia volátil y carbono fijo, el valor calorífico o bien el análisis final de carbono, hidrógeno y oxígeno, son los métodos más utilizados y más conocidos para la clasificación de los carbones, que van desde la turba a la antracita (León, 2006).

Debido a la diversidad de los depósitos de carbón a nivel mundial, las condiciones propias del lugar del que es extraído, las diversas variedades del mismo, del tipo de uso o proceso en el que será utilizado, entre otros; existen una serie de sistemas de clasificación se los cuales se destacan los siguientes:

2.3.1. Sistemas de clasificación

Entre los diversos sistemas de clasificación, a continuación se detallan tres de los más importantes.

2.3.1.1. Clasificación de carbones por rango

La clasificación más usual es la de la Sociedad Americana de Ensayos y Materiales (ASTM por sus siglas en inglés) y es el método utilizado en Estados Unidos y otros países que considera el contenido de carbono fijo determinado en base seca libre de materia mineral de los carbones de alto rango en tanto que los de bajo rango son caracterizados por el poder calorífico sobre base húmeda y libre de materia mineral (Santurio, 2002).

Tabla I. **Clasificación de carbones por rango. Norma ASTM D388**

| Tipo | Clase | C.F % | M.V % | Poder Calorífico BTU/Lb | Carácter Aglomerante | |
|---------------------|-------------------|---------|---------|-------------------------|--|--------------------------|
| I. Antracita | 1. Meta antracita | / 98 | ≤ 2 | | Carbones no aglomerantes | |
| | 2. Antracita | 92 - 98 | 2 - 8 | | | |
| | 3. Semi antracita | 86 - 92 | 8 - 14 | | | |
| II. Bituminoso | 1. Bajo volátil | 78 - 86 | 14 - 22 | | / 14000 13000 - 14000 11500 - 13000 10500 - 11500 | Carbones aglomerantes |
| | 2. Medio volátil | 69 - 78 | 22 - 31 | | | |
| | 3. Alto volátil A | < 69 | > 31 | | | |
| | 4. Alto volátil B | | | | | |
| | 5. Alto volátil C | | | | | |
| III. Sub bituminoso | 1. Clase A | | | 10500 - 11500 | | |
| | 2. Clase B | | | 9500 - 10500 | | |
| | 3. Clase C | | | 8300 - 9500 | | |
| IV. Lignítico | 1. Clase A | | | 6300 - 8300 | | Carbones no aglomerantes |
| | 2. Clase B | | | < 6300 | | |

Notas: • Los contenidos de carbono fijo (CF) y materias volátiles (MV) se determinan sobre muestras secas, libres de otras materias minerales. • El poder calorífico se determina sobre muestras con humedad natural inherente. Los carbones de más de 69% CF se clasifican según el contenido de carbono fijo, sin tener en cuenta su valor calorífico.

Fuente: (León, 2006, pág. 96).

2.3.1.2. Junta nacional del carbón (NCB)

La Junta Nacional del Carbón o *National Coal Bord* (por sus siglas en inglés NCB), es utilizada únicamente para carbones del tipo bituminoso y antracitas y mezclas de ambos. Está basada en el rango y es de tipo comercial utilizándose parámetros de contenido en materia volátil, aptitud para coquización mediante ensayo Gray-King (Santurio, 2002). Su clasificación se basa utilizando letras de la A hasta la G basados en las características de aspecto y consistencia arrojados por el ensayo.

2.3.1.3. Clasificación internacional

Este tipo de clasificación es más utilizada en Europa y es denominado como *International Classification of Hard Coals by Type* y la *International Classification of Brown Coals*. Este sistema de clasificación de hullas o *hard coals*, incluye una agrupación estadística en la que aparecen los carbones que tienen mismas características generales (Santurio, 2002). Como lo hace notar Santurio en su trabajo de investigación:

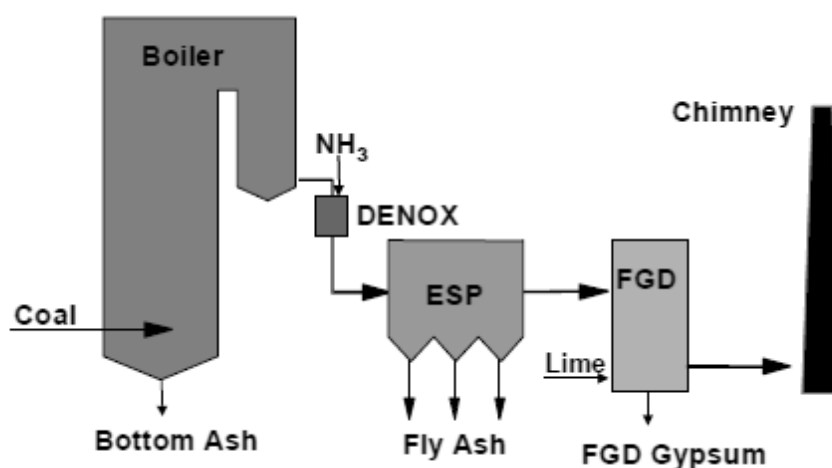
En esta clasificación del carbón se utiliza un código numérico de tres cifras. La primera indica la clase de carbón, la segunda el grupo y la tercera el subgrupo. Las nueve clases de hullas, basadas en su contenido en materia volátil (base seca sin ceniza) y valor térmico (base húmeda sin ceniza) se dividen, de acuerdo con sus propiedades aglomerantes, en cuatro grupos. Estas propiedades se pueden determinar mediante el *Índice de hinchamiento al crisol* o *Índice de Roga*. Los grupos del carbón se subdividen a su vez en subgrupos, de acuerdo con sus propiedades coquizantes. Para su determinación se puede aplicar la *prueba de Audibert-Arnu* o la de coquizado de *Gray-King* (Santurio, 2002, pág. 11).

La clasificación internacional de lignitos (*Brown coals*) se refiere a carbones que contienen menos de 23,865 kJ/kg (10,260 Btu/lb) sobre base húmeda sin ceniza. Las seis clases de lignitos se dividen en grupos de acuerdo con su rendimiento en la producción de alquitrán (base seca y limpia). Esta agrupación indica los valores de estos carbones de bajo rango como combustibles y como materia prima para aplicaciones químicas. Los lignitos con alto contenido de alquitrán se utilizan, generalmente, como materia prima en la industria química, en lugar de ser empleados como combustibles (Santurio, 2002, pág. 11).

2.4. Productos de la combustión del carbón (CCPs)

Los productos de la combustión del carbón (CCPs por sus siglas en inglés), son más comúnmente llamados cenizas de carbón, siendo este último muy general en términos de proceso y características.

Figura 2. Diagrama de producción de CCPs de plantas eléctricas a base de carbón



Fuente: (ECOBA_EURELECTRIC , 2011, pág. 10).

Los CCPs de acuerdo a la Asociación Americana de Cenizas del Carbón (ACAA por sus siglas en inglés) son materiales sólidos que se producen cuando el carbón se quema para generar electricidad (ACAA, 2020), siendo estos:

- Cenizas volantes o Fly ash
- Cenizas de fondo o Bottom ash
- Escoria de caldera o Boiler slag
- Yeso de desulfuración de gases de combustión
- Cenizas de combustión de lecho fluidizado y
- Cenosferas

Figura 3. **Porcentaje de CCPs en EEUU. Período 2019**



Fuente: (ACAA, 2020, pág. 6).

2.4.1. Cenizas volantes (CV)

Son sustancias en polvo producidas por la combustión de carbón pulverizado en las calderas de plantas generadoras. Este material es capturado por dispositivos de partículas de control de emisiones, como precipitadores electrostáticos o filtros de mangas de tela (ACAA, 2020).

La *American Society for Testing and Material* (ASTM) define dos clases de cenizas volantes según su composición química, para fines benéficos. La ceniza volante tipo F es el resultado de la combustión de la antracita o el carbón bituminoso, mientras que las cenizas volantes del tipo C son resultado de la quema del lignito o carbón sub-bituminoso (Grijalba, 2010, pág. 29).

2.4.1.1. Clasificación de las cenizas volantes

Los factores principales a tomar en cuenta para clasificar las cenizas volantes son: la composición química del tipo de carbón y del método de combustión (Caballero & Médico, 2013). “Éstas se componen principalmente por sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3), óxido férrico (Fe_2O_3), cal (CaO), carbón sin quemar y en menor proporción (aprox. 5 % en peso): magnesia (MgO), óxido de azufre (SO_3), alcalinos (Na_2O y K_2O y otros elementos trazas)” (Caballero & Médico, 2013).

Las centrales termoeléctricas utilizan dos sistemas de combustión del carbón: carbón pulverizado (método convencional) y combustión en lecho fluidizado. En el primer método, el carbón es molido a un tamaño muy fino antes de la combustión. Las cenizas volantes que se originan por este

método están clasificadas por la ASTM C618 en dos tipos: clase C y clase F” (Caballero & Médico, 2013, págs. 1-2).

Tabla II. **Clasificación de las cenizas volantes. Norma ASTM C618**

| | SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | Humedad | Pérdidas a la incineración (LOI) |
|---|--|---------|--------|---------|----------------------------------|
| <i>Clase F</i> Puzolánicas | 70% mín | < 15 % | 5% máx | 3% máx | 6% máx |
| <i>Clase C</i> Puzolánicas y cementicias | 50% mín | 15 - 30 | 5% máx | 3% máx | 6% máx |

Fuente: (Caballero & Médico, 2013, pág. 2).

- Cenizas clase F

Las cenizas volantes de clase F se producen a partir de la combustión de carbón bituminoso o antracita, son altamente puzolánicas. Pueden contener hasta un 18 % de óxido de calcio (CaO) (ACAA, 2020). Alternativamente, “la adición de un activador químico como (agua) a una ceniza de Clase F puede conducir a la formación de un geopolímero” (Sahu, 2010). Entre las características principales de los beneficios que este tipo de cenizas puede ofrecer, Canals en su estudio de investigación indica:

Modera eficientemente el calor de hidratación del hormigón durante el curado y, por lo tanto, se considera como un material cementicio para el hormigón en masa y para mezclas de alta resistencia. Además proporciona una gran resistencia a los sulfatos y, por ello, se recomienda para usos donde el hormigón estará expuesto a iones de sulfato en suelos y a aguas subterráneas (Canals, 2007, pág. 9).

- Cenizas clase C

Las cenizas volantes de clase C se producen a partir de la combustión de carbón sub-bituminoso o lignito, son de carácter puzolánico y autocementantes. Tienen un contenido de CaO superior al 18 % (ACAA, 2020). En contacto con agua se endurecerán y ganarán fuerza a medida transcurre el tiempo.

Estas cenizas, a diferencia de las denominadas como clase F, no requieren de algún tipo de activador y son llamadas autocementantes clase C. Los contenidos de álcali y sulfato (SO₄) son generalmente más altos (Sahu, 2010). Sobre los beneficios de estas, Canals indica:

Se utiliza en aquellos casos en los que se requiera altas resistencias iniciales, como por ejemplo en hormigón pretensado. También se prefiere en estabilización de suelos, ya que la clase C puede no requerir a adición de cal (Canals, 2007, pág. 10).

Tabla III. **Comparativo entre composiciones químicas de las cenizas volantes y cemento Portland**

| <i>Componente químico</i> | <i>Cenizas volantes (clase F)</i> | <i>Cenizas volantes (clase C)</i> | <i>Cemento Portland</i> |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| SiO | 54.90 | 39.90 | 22.60 |
| Al ₂ O ₃ | 25.80 | 16.70 | 4.30 |
| Fe ₂ O ₃ | 6.90 | 5.80 | 2.40 |
| CaO | 8.70 | 24.30 | 64.40 |
| MgO | 1.80 | 4.60 | 2.10 |
| SO ₃ | 0.60 | 3.30 | 2.30 |
| Na ₂ O & K ₂ O | 0.60 | 1.30 | 0.60 |

Fuente: (Canals, 2007, pág. 10).

2.4.1.2. Propiedades físicas de las cenizas volantes

La mayoría de las cenizas volantes son amorfas (naturaleza vítrea) que consisten en partículas finas y pulverulentas que son predominantemente de forma esférica, sólidas o huecas. La gravedad específica de las cenizas volantes suele oscilar entre 2.1 a 3.0 mientras que su área de superficie específica (medida por el método de permeabilidad al aire de Blaine) puede oscilar entre 170 y 1000 m²/kg (Sahu, 2010).

El color de las mismas está ligado a la cantidad de carbón inquemado que puedan generar y pueden variar en el tono, pasando de bronceado, a gris o a negro, dependiendo de la cantidad de carbón inquemado en la ceniza. Cuanto más claro sea el color de las cenizas volantes, menor será el contenido de carbono. “El lignito o las cenizas volantes sub-bituminosas suelen ser de un color tostado claro a pulido, lo que indica cantidades relativamente bajas de carbono, así como la presencia de algo de cal o calcio. Las cenizas volantes bituminosas suelen tener un tono de gris, y los tonos más claros de gris generalmente indican una mayor calidad de ceniza” (Sahu, 2010, pág. 22).

2.4.1.3. Propiedades químicas de las cenizas volantes

Las propiedades químicas de las cenizas volantes están influenciadas en gran medida por el tipo de carbón utilizado y las técnicas de manipulación y almacenamiento. Los cuatro tipos o rangos de carbón son antracita, bituminoso, sub-bituminoso y lignito (Sahu, 2010).

Los componentes principales de las cenizas volantes de carbón bituminoso son sílice, alúmina, óxido de hierro, óxidos de calcio y carbono, este último medido por pérdida por ignición (*LOI* por sus siglas en inglés), la cual es

una medida de la cantidad de carbono inquemado que queda en las cenizas volantes y es una de las propiedades químicas más importantes de las cenizas volantes, especialmente como indicador de idoneidad para su uso como reemplazo del cemento en el concreto (Sahu, 2010).

Tabla IV. **Composición de las cenizas volantes según su tipo de carbón**

| Componente | Bituminoso | Sub-bituminoso | Lignito |
|--------------------------------|-------------------|-----------------------|----------------|
| SiO ₂ | 20-60 | 40-60 | 15-45 |
| Al ₂ O ₃ | 5-35 | 20-30 | 10-25 |
| Fe ₂ O ₃ | 10-40 | 4-10 | 4-15 |
| CaO | 1-12 | 5-30 | 15-40 |
| MgO | 0-5 | 1-6 | 3-10 |
| SO ₃ | 0-4 | 0-2 | 0-10 |
| Na ₂ O | 0-4 | 0-2 | 0-6 |
| K ₂ O | 0-3 | 0-4 | 0-4 |
| LOI | 0-15 | 0-3 | 0-5 |

Fuente: (Sahu, 2010, pág. 24).

Más allá del hormigón las cenizas volantes se utilizan en muchas otras aplicaciones, tales como (ACAA, 2020):

- Componente en productos de hormigón y lechada
- Materia prima en la producción de cemento
- Material de relleno para aplicaciones estructurales y terraplenes
- Ingrediente en la estabilización y/o solidificación de residuos
- Ingrediente en la modificación y/o estabilización del suelo
- Componente de relleno fluido
- Componente en bases, sub-bases y pavimento de carreteras

2.4.2. Cenizas de fondo (CF)

Representan un 20 % del subproducto de la quema de carbón de una central termoeléctrica. Físicamente, la ceniza de fondo es de color gris a negro, angular, porosa, y varía en tamaño desde arena hasta grava fina. Estas propiedades físicas dependen de la fuente y el tipo de carbón del que se deriva, así como las condiciones de funcionamiento en la planta en la que se quemó (ACAA, 2020).

Para ambas cenizas (volantes y de fondo), la composición química es similar, pero normalmente contiene mayores cantidades de carbono. Tienden a ser más inerte, menos puzolánico, sus partículas son más grandes y fusionadas que las de las cenizas volantes, esto hace que sean menos adecuados para uso como aglutinante en cemento o productos de hormigón (ACAA, 2020).

La ceniza de fondo se usa comúnmente en aplicaciones a granel, no encapsuladas, incluyendo lo siguiente (ACAA, 2020):

- Material de relleno para aplicaciones estructurales, terraplenes y relleno para muros de contención, estribos y zanjas
- Agregado en bases de carreteras, sub-bases y pavimento asfáltico
- Materia prima en la producción de cemento
- Como agregado en productos de hormigón ligero

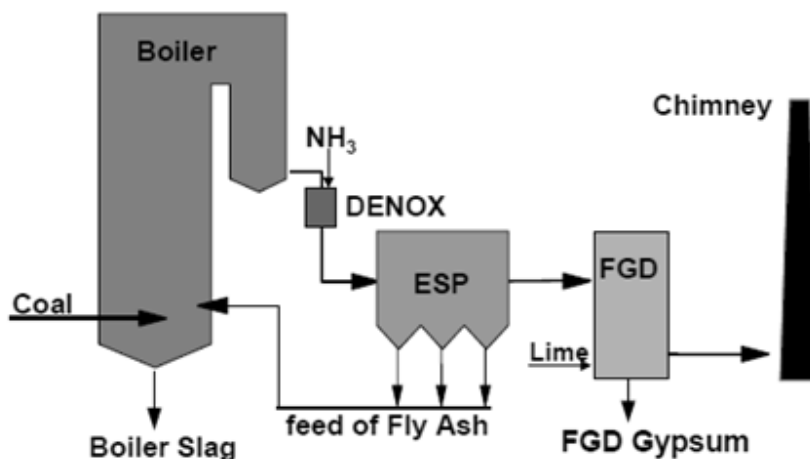
2.4.3. Escoria de caldera (BS)

La escoria de caldera se produce en calderas de fondo húmedo, que quemen carbón pulverizado o triturado. Químicamente, la escoria de caldera

comprende predominantemente sílice, alúmina, y hierro, con cantidades más pequeñas de calcio, magnesio y sulfatos (ACAA, 2020).

Físicamente, la escoria de caldera está formada por partículas duras, negras y angulares con una apariencia lisa y vidriosa y uniforme en tamaño. Las partículas de escoria son duraderas, resistentes al desgaste y tienen una gran demanda en una amplia gama de aplicaciones de uso final (ACAA, 2020).

Figura 4. **Producción de escoria de caldera BS**



Fuente: (ECOBA_EURELECTRIC, 2011, pág. 16).

Además de las aplicaciones de voladura y techado, la escoria de caldera comúnmente es utilizada para (ACAA, 2020):

- Relleno mineral en asfalto
- Material de relleno para aplicaciones estructurales y terraplenes
- Materia prima en productos de hormigón
- Material de control de tracción en nieve y hielo

2.4.4. Yeso de desulfuración de gases de combustión (FGD)

El yeso de desulfuración de gases de combustión (FGD) es un producto sintético generado por la eliminación de azufre de los gases de combustión de termoeléctricas de carbón a través de dispositivos de control de emisiones, llamados comúnmente depuradores (ACAA, 2020).

A diferencia de los CCPs anteriores, este no es una ceniza. El yeso de desulfuración tiene la misma fórmula química que el yeso natural: sulfato de calcio dihidrato, con la diferencia que cuenta con un mayor pureza (típicamente por encima del 90 %) (ACAA, 2020).

Físicamente, el yeso de desulfuración tiene características de esparcimiento más deseables que yeso natural y que es útil en varias de sus aplicaciones de uso final, como (ACAA, 2020):

- Material de relleno para aplicaciones estructurales y terraplenes
- Materia prima en la producción de cemento
- Ingrediente en la estabilización y / o solidificación de residuos
- Como enmienda del suelo o relleno estructural
- Paneles de yeso

2.4.5. Cenizas de combustión de lecho fluidizado (FBC)

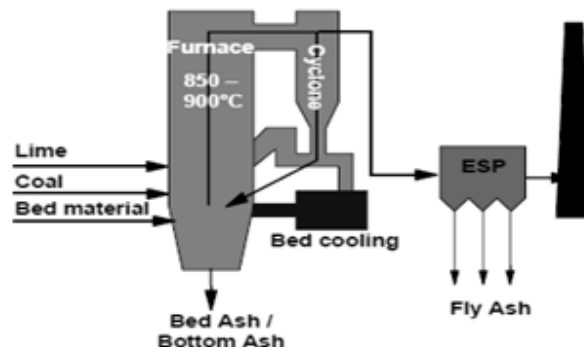
Estas se generan a partir de un tipo de caldera que utiliza antracita y residuos de carbón bituminoso como combustible principal para generar electricidad (ACAA, 2020).

“Las partículas están suspendidas en un lecho fluidizado de ceniza caliente y otros materiales particulados (arena, piedra caliza, etc.) a través de los cuales los chorros de aire se inyectan para proporcionar el oxígeno necesario para la combustión” (ACAA, 2020, pág. 9).

“La presencia de cal, alúmina y sulfato de calcio en las cenizas le dan propiedades cementosas cuando se mezcla con agua, el elevado contenido de alcalinidad y azufre las hacen inadecuadas para su uso como reemplazo del cemento en concreto” (ACAA, 2020). Por otro lado, el elevado pH las hace altamente efectivas para mitigar y neutralizar materiales ácidos. Dicho esto, las cenizas de lecho fluidizado se utilizan en (ACAA, 2020):

- Gestión de residuos / lodos
- Estabilización / modificación de suelos
- Restauración y control de suelos
- Recuperación de superficies de minas abandonadas
- Reducción de drenajes ácidos de minas

Figura 5. **Producción de cenizas de tipo FBC**



Fuente: (ECOBA_EURELECTRIC, 2011, pág. 17).

2.4.6. Cenosferas

Son esferas pequeñas, ligeras, inertes y huecas formadas durante el proceso de combustión del carbón siguiendo una fusión parcial de partículas de ceniza con liberación simultánea de gases (O_2 , N_2 , CO_2 , etc.) (ACAA, 2020).

Se recolectan de embalses de superficie húmeda tras la eliminación de cenizas volantes, de fondo y/o escorias de calderas dado al valor su gravedad específica, menor que la del agua (ACAA, 2020).

Son muy valoradas por la industria debido a su resistencia, baja densidad, buena capacidad térmica y eléctrica y tolerancia a los agentes químicos y a las altas temperaturas. Debido a estos atributos, son útiles en rellenos para una amplia variedad de materiales como: hormigón, pintura, plásticos y metal (ACAA, 2020, pág. 10).

Tabla V. **Tipos de CCPs, sus constituyentes y usos potenciales**

| Tipo | Componentes mayoritarios | Mejor uso / Áreas potenciales |
|--------------------|--|---|
| Ceniza Volante | Si, Al, Fe, Ca (CaO, MgO, SiO ₂ , K ₂ O, Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃) | Reemplazo de cemento en concreto / lechada, relleno estructural, relleno fluido, estabilización de residuos, mina a cielo abierto recuperación, estabilización de suelos, basado en carreteras, mineral relleno, fuente de Si y Ca. |
| Escoria de Caldera | Si, Al, Fe, Ca (CaO, MgO, SiO ₂ , K ₂ O, Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃) | Granallado, gránulos para techos, control de nieve y hielo, relleno mineral, relleno de construcción, filtración de agua, medio de drenaje. |
| Ceniza de Fondo | Si, Al, Fe, Ca, S, (CaSO ₄ , CaO, CaSO ₃ , MgO, SiO ₂ , K ₂ O, Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃) | Bloques de hormigón, subbase de carreteras, control de nieve y hielo, relleno estructural, estabilización de residuos, lecho de tuberías, fabricación de cemento, encalado, Si, fuente de Ca y S. |

Continuación tabla V.

| | | |
|-----------------------|---|--|
| Yeso de Desulfuración | Si, Al, Fe, Ca, S, (CaSO ₄ , CaO, CaSO ₃ , MgO, SiO ₂ , K ₂ O, Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃) | Tabla yeso, base / subbase de carretera estabilizada, estructural relleno, recuperación de mina a cielo abierto, mina subterránea, inyección, almohadilla para ganado, revestimiento de baja permeabilidad, agregado sintético, estabilización de lodos. |
| de Lecho Fluidizado | Si, Al, Fe, Ca, S, (CaSO ₄ , CaO, Quartz, gypsum) | Fertilizante de liberación lenta, material encalado. |

Fuente: (Seshadri, Bolan, & Raidu, 2010, pág. 384).

2.5. Energía eléctrica y carbón mineral

El principal candidato para reemplazar al petróleo sigue siendo el carbón mineral el cual se considera abundante y con amplia distribución geográfica, lo que le da ventaja a largo plazo frente a otros combustibles. Entre los años 50s y 70s, el carbón representaba en el abastecimiento mundial de energía tan solo un 20 % anual (León, 2006). Posterior, con la primera crisis del petróleo (1973-1974), su contribución aumento y en el periodo 1973-1983, el consumo de carbón a nivel mundial se situaba en 26 %, luego se estancó, debido a la recesión económica (León, 2006).

Según algunos cálculos el consumo mundial de carbón ha estado creciendo más rápido que la utilización de cualquier otra fuente de energía, incluyendo el petróleo, el gas natural, la hidroeléctrica y la nuclear. En el año 2003 el consumo mundial del carbón creció en 6.9 % frente a un 2.1 % del petróleo (León, 2006, pág. 93).

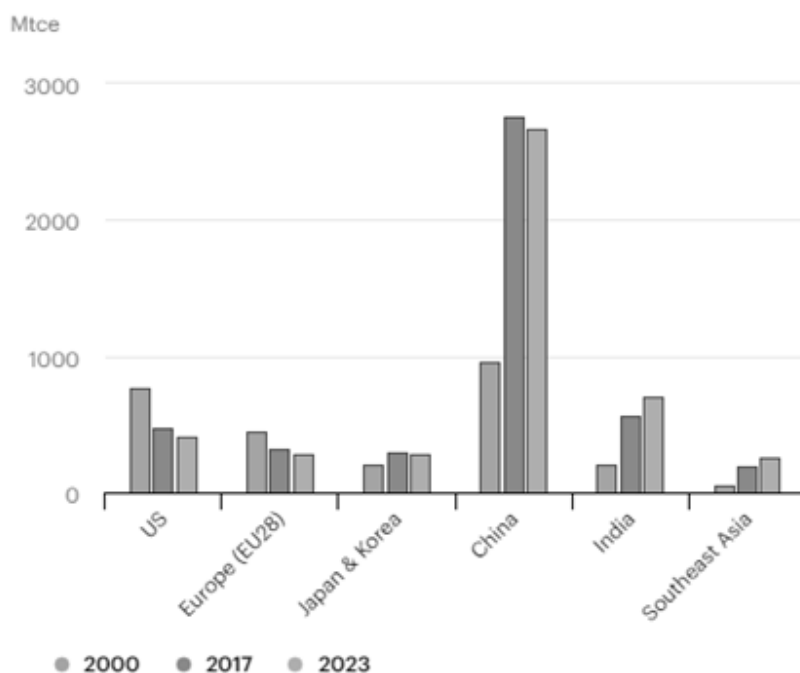
2.5.1. Contexto internacional

De acuerdo al Instituto Mundial del Carbón (WCI), se consumen cerca de 4,050 Mt/año, jugando un papel vital en la generación de electricidad, con un 39 % de la electricidad producida en el mundo y creciendo a una tasa de 1.5 % por año durante el período 2002-2030 (WCI, 2005).

China, por ejemplo, ha conectado a la red eléctrica a más de 700 millones de personas durante los últimos 15 años, representando 99 % de su electrificación, del cual el 77 % de es producida en centrales eléctricas de combustión de carbón (WCI, 2005, pág. 22).

El carbón en China representa el 14 % de la energía primaria mundial, la más grande del mundo, afectando los precios del carbón, el gas y la electricidad en todo el mundo, colocándolos en el centro del escenario energético mundial (IEA, 2018).

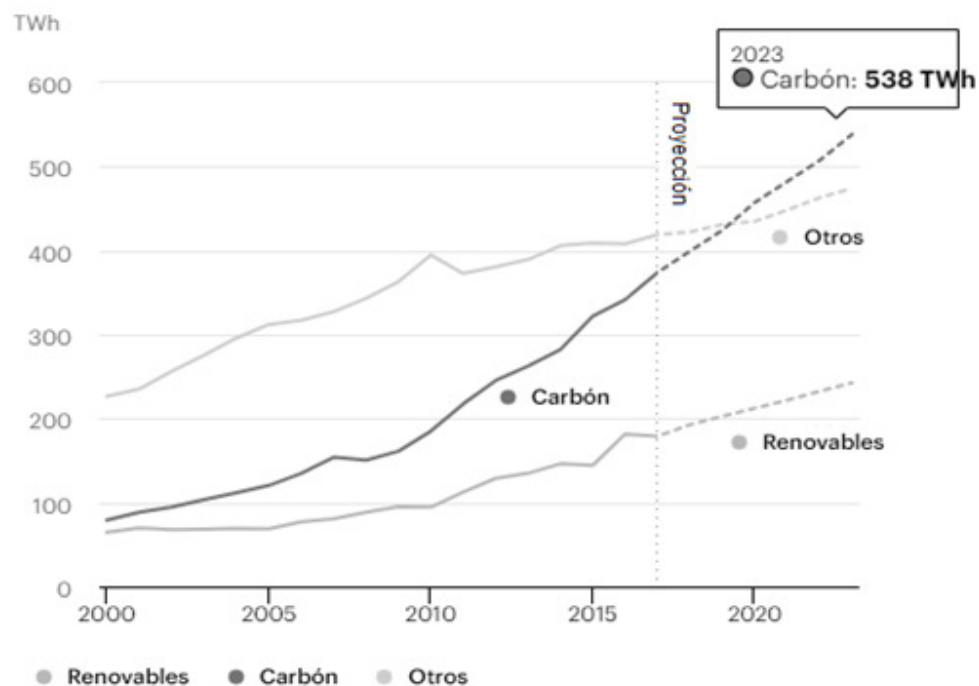
Figura 6. **Demanda de carbón. Períodos 2000, 2017 y 2023**



Fuente: IEA, Demanda de carbón en países / regiones seleccionados en 2000, 2017 y 2023, IEA, París <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/coal-demand-in-selected-countries-regions- en 2000-2017 y 2023>.

Por su parte, India experimentará un aumento en la demanda de energía de más del 5 % a expensas que su economía crezca más del 8 % anual hasta 2023 (IEA, 2018), colocándolo como el país con mayor crecimiento en consumo de carbón hacia el 2023. El sudeste de Asia será el segundo motor de crecimiento para dicho período; Indonesia, Pakistán, Bangladesh, Filipinas y Vietnam con más de 800 millones de personas, su demanda será el principal impulsor del crecimiento de uso de carbón (IEA, 2018).

Figura 7. **Generación de electricidad por fuente. Sudeste Asiático 2000-2022**

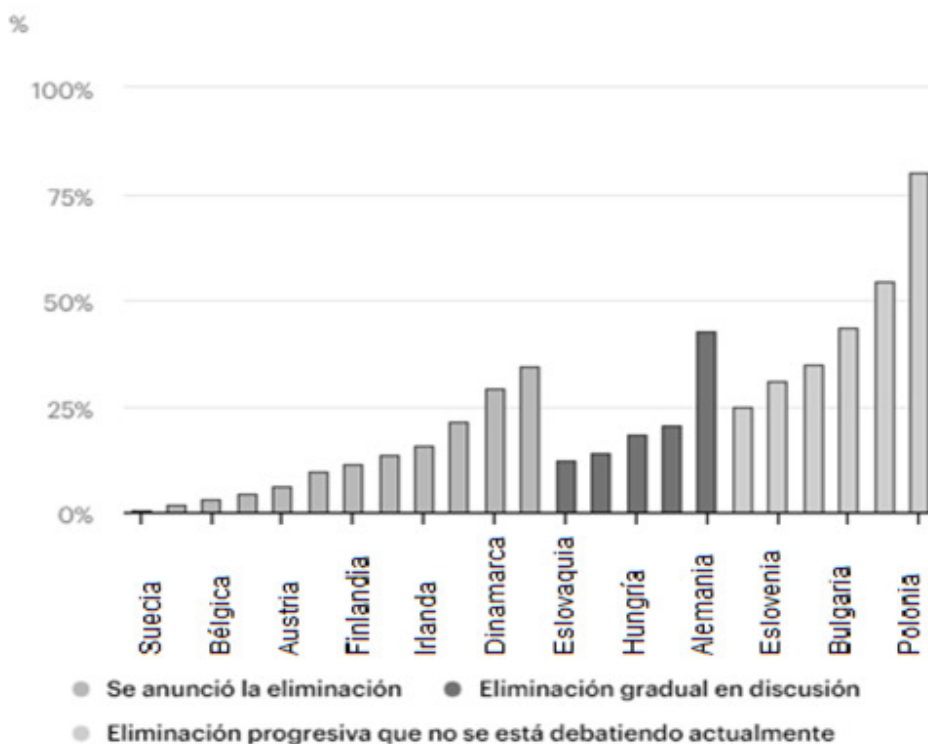


Fuente: IEA, *Generación de electricidad por fuente en el sudeste asiático, 2000-2022*, IEA, París <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/electricity-generation-by-source-in-southeast-asia-2000-2022>.

Por su parte, Europa Occidental está acelerando la salida del uso del carbón mediante políticas vinculadas al cambio climático y la contaminación del aire, así como por la expansión del uso de energías renovables, afectando la demanda del mismo (IEA, 2018).

En contra parte, la mayoría de los países de Europa del Este no han anunciado políticas de eliminación, ejecutando nuevas centrales eléctricas de carbón en Polonia, Grecia y Los Balcanes (IEA, 2018).

Figura 8. **Participación del carbón en la generación de energía para países europeos seleccionados, 2018**



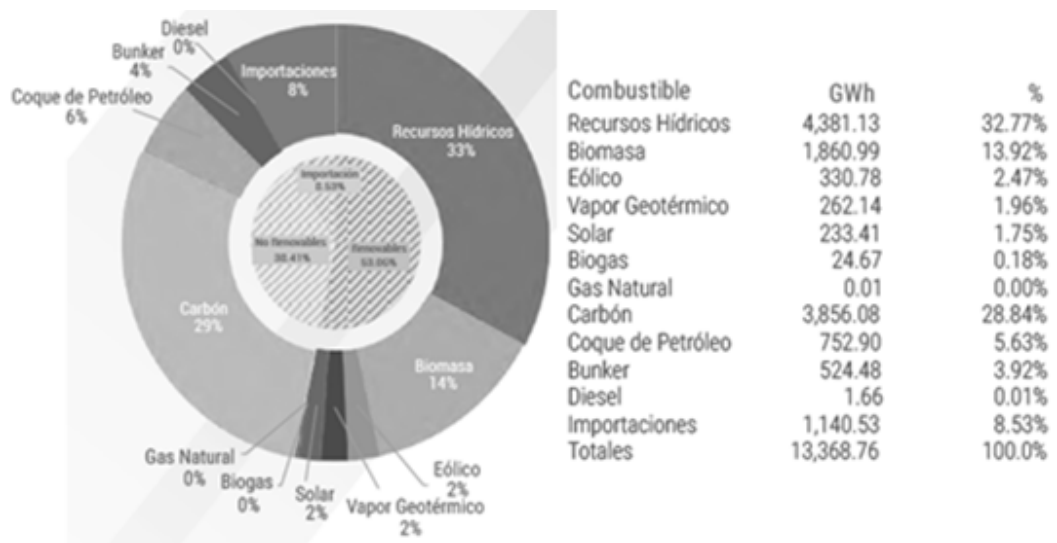
Fuente: IEA, *participación del carbón en la generación de energía para países europeos seleccionados, 2018*, IEA, París <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/coins-share-in-power-generation-for-selected-european-paises-2018>.

2.5.2. Contexto nacional

De acuerdo con datos del Administrador del Mercado Mayorista (AMM), la producción total de energía durante el 2019 fue de 13,368.76 (AMM, 2019) correspondiendo al carbón mineral un 28.84 % de participación con una generación de 3,856.08 GWh únicamente por debajo del recurso hídrico con 33 % de participación. Desde el 2012 al 2019, se ha tenido un incremento

aproximado de 2.14 % anual sobre el uso del carbón en el país, convirtiéndolo en un actor importante en el sector energético.

Figura 9. **Generación por tipo de combustible, Guatemala 2019**



Fuente: (AMM, 2019, pág. 7).

A nivel nacional, la mayoría de plantas térmicas que funcionan con base en combustibles fósiles están en los departamentos de Escuintla y Guatemala, siendo el carbón el más utilizado, seguido por el búnker y el diésel (INCYT, 2018).

Tabla VI. **Plantas de energía eléctrica que usan carbón, Guatemala**

| Planta | No | Placa (MW) | Potencia efectiva (MW) | Generación Anual (GW) | Factor de planta (%) | Área |
|-------------------|----|------------|------------------------|-----------------------|----------------------|-----------|
| Turbinas de vapor | | 585 | 530 | 2,172 | | |
| San José | 1 | 139 | 137.3 | 1,042 | 86 | Escuintla |
| La Libertad | 1 | 20 | 17.4 | 80.9 | 46 | Guatemala |

Continuación tabla VI.

| | | | | | | |
|----------------------|---|------|-------|-------|----|-----------|
| | 2 | 83 | 76.3 | 298.3 | 41 | Escuintla |
| Las Palmas II | | | | | | |
| Generadora Costa Sur | 1 | 30.2 | 30 | 171.7 | 65 | Escuintla |
| <i>Jaguar Energy</i> | 2 | 300 | 265.8 | 575.2 | 22 | Escuintla |

Fuente: (INCYT, 2018, pág. 85).

En Guatemala, la tecnología predominante para la combustión son las calderas acuatubulares con una eficiencia de 35 % y el carbón utilizado para la generación de electricidad es la hulla bituminosa, importada de Colombia, la cual posee menos cantidad de carbón y un poder calorífico más bajo que la antracita, pero con un costo más bajo (INCYT, 2018, pág. 84).

Desde 2008 se ha incrementado la potencia de placa de plantas de carbón, llegando a los 580 MW en 2015. La planta Jaguar Energy es la más grande, con 300 MW de potencia de placa. La generación con carbón aportó 2,172 GWh en 2016 (AMM, 2019).

Tabla VII. **Propiedades fisicoquímicas de los combustibles fósiles utilizados en Guatemala**

| Combustible | Poder Calorífico | | Densidad |
|----------------------------------|------------------|-------|---------------------|
| | BTU/Gal | MJ/kg | |
| Carbón (Hulla bituminosa) | | 27 | |
| Búnker C (<i>Fuel Oil</i> No.6) | 150,000 | 42.6 | 7.998-8.108 lbs/gal |
| Diésel | 142,200 | 43.1 | 0.832 kg/l |

(INCYT, 2018, pág. 86).

2.6. Medio ambiente y carbón mineral

“El consumo de energía tiene un impacto significativo para el medio ambiente, y minimizar el impacto negativo es una prioridad global, equilibrándolo con las prioridades de desarrollo económico y social” (WCI, 2005, pág. 27).

La quema de carbón libera enormes cantidades de gases venenosos como los óxidos de azufre y nitrógeno, se liberan metano y también enormes cantidades de material particulado (Naeem, 2019).

Estos gases (gases de efecto invernadero) se descargan directamente a la atmósfera, lo que eventualmente da como resultado la formación de smog e incluso lluvia ácida con la consecuencia de daños al medio ambiente y a la vida humana. Estas consecuencias destruyen la vida humana, la vegetación natural y también causan un daño inmenso a la vida acuática. El calentamiento global es causado por la liberación de gases de efecto invernadero como el metano, el monóxido de carbono y el dióxido de carbono (Naeem, 2019, pág. 13).

2.6.1. Uso del carbón y el ambiente

“El consumo global de energía provoca diferentes problemas medioambientales. En el caso del carbón, la liberación de contaminantes, como óxidos de azufre y nitrógeno (SO_x y NO_x), diferentes partículas de elementos pesados, como el mercurio” (WCI, 2005, pág. 29) y subproductos con poco aprovechamiento pero con gran potencial (como por ejemplo las cenizas), han supuesto un desafío (WCI, 2005).

Entre las diferentes metodologías existentes para abordar la problemática medioambiental se citan las siguientes, aclarando que dependerán del nivel de desarrollo económico del país en el que se apliquen de acuerdo al Instituto Mundial del Carbón y que “no necesariamente las más avanzadas y caras sean las más adecuadas en países en desarrollo” (WCI, 2005, pág. 31).

- Reducción de emisión de partículas

Las emisiones de partículas, como la ceniza, ha sido uno de los efectos colaterales más visibles de la combustión de carbón. Pueden afectar a la visibilidad en la zona, provocar problemas de polvo y afectar a los sistemas respiratorios de la gente, así como la contaminación del manto freático por acción del lixiviado de las pilas de excedentes” (WCI, 2005, pág. 31).

- Limpieza del carbón

La preparación del carbón, conocida también como limpieza del carbón, es esencial para que la industria reduzca los niveles de azufre y materias minerales contaminantes del mismo, eleven su calidad y minimicen hasta en un 50 % el contenido de cenizas que de acuerdo con el WCI. “La limpieza del carbón también ayuda a mejorar la eficacia de las centrales eléctricas de combustión de carbón, lo que lleva a una reducción en las emisiones de dióxido de carbono” (WCI, 2005, pág. 31).

- Precipitadores electrostáticos y filtros de tejido

Para el control de las partículas generadas en el proceso de combustión, son utilizados los filtros de tejidos (o cámaras de sacos) y los precipitadores electrostáticos (ESP). De acuerdo con datos del Instituto Mundial del Carbón, ambos pueden llegar a eliminar el 99,5 % de las emisiones de partículas (WCI, 2005).

“En los precipitadores electrostáticos, los gases cargados con partículas pasan entre varias bandejas de recogida, donde un campo eléctrico crea una carga en las partículas” (WCI, 2005, pág. 31). Con ello se logra que las partículas se depositen en las bandejas para su acumulación, recolecta y respectiva eliminación (WCI, 2005).

Los filtros de tejido, suponen un enfoque alternativo y recogen las partículas de los gases de las chimeneas mediante un tamiz de tejido ligero. El uso de equipos de control de partículas tiene un gran impacto en el rendimiento medioambiental de las centrales eléctricas de combustión de carbón” (WCI, 2005, pág. 31).

2.6.2. Eficacia de la combustión

Quando se habla de eficacia de combustión, nos referimos a la reducción de emisiones de CO₂ que se pueden dar en dicho proceso. “La eficacia térmica es una medida de eficacia de conversión del combustible para los procesos de generación de electricidad. Cuanto mayor sean los niveles de eficacia, mayor será la energía producida a partir del combustible” (WCI, 2005, pág. 33).

2.7. Usos y aplicaciones del carbón mineral

En la actualidad existen múltiples usos otorgados a los residuos de la combustión generados en las centrales termoeléctricas. El uso de mayor éxito está ligado al campo de los conglomerantes hidráulicos y en general en los de materiales de construcción (cementos, ladrillos comunes, áridos ligeros, prefabricados de hormigón, etc.). Otros usos son: relleno de pavimentos, puzolana para la estabilización del suelo, rellenos de tierras, acondicionador para la agricultura, auxiliar para la fabricación de lodos industriales por vacío, conglomerantes para el tratamiento de aguas industriales entre otros (García, 2003).

2.7.1. Cenizas volantes en cemento

Las cenizas volantes son utilizadas comúnmente como un sustituto de cemento portland o como *clinker* para producción de cemento portland (ACAA, 2020). Sustituir parte del cemento portland por ceniza volante trae consigo un beneficio económico, ya que el precio de esta última es menor que el del cemento. Por otro lado, la ceniza volante, obtenida de la quema del carbón utilizado como combustible en la generación de energía eléctrica, es considerada como un contaminante, de manera que su utilización tiene beneficios ambientales (Salazar, 2009).

Para la producción de cemento, existen dos aplicaciones principales para las cenizas: primero como materia prima para producir *Clinker* como componente principal del cemento Portland, y segundo como aditivo puzolánico. La ceniza reacciona con el hidróxido de calcio liberado por la hidratación del cemento Portland, produciendo hidratos de silicatos de calcio e hidratos de aluminato de calcio (Muñoz Adams, 2018).

Además, algunas cenizas volantes con grandes cantidades de calcio mostrarán un comportamiento cementoso por la reacción con el agua para producir hidratos en ausencia de una fuente de hidróxido de calcio. Estas reacciones puzolánicas son beneficiosas para el concreto en el sentido de mejorar la calidad de la fase aglutinante, mejorando la resistencia a largo plazo y reduciendo la permeabilidad (Muñoz Adams, 2018).

El rol de la ceniza en el concreto está fuertemente influenciado por sus propiedades físicas, químicas y mineralógicas. Las composiciones químicas y mineralógicas dependen de la composición del carbón y los tipos de éste (antracita, bituminoso, sub-bituminoso y lignito) (Muñoz Adams, 2018).

2.7.2. Cenizas volantes en hormigón

Las cenizas volantes se pueden adicionar al hormigón de tres formas diferentes:

- Adición activa incorporada directamente en la mezcladora.
- Adición inerte, es decir, como elemento sustituto o complementario de las fracciones finas de los áridos, cuando éstos son deficitarios en ellas.
- Molida conjuntamente con el clínquer en la preparación de cementos.

Se ha visto que la sustitución parcial del cemento portland con ceniza volante en cantidades del orden de hasta 50 % conduce a tener concretos con mejor desempeño en cuanto a su durabilidad (Salazar, 2009).

El uso de las cenizas volantes en cemento Portland de hormigón tiene múltiples beneficios y mejora el rendimiento del hormigón, tanto en su estado fresco como solidificado. El uso de cenizas volantes en el hormigón mejora la

trabajabilidad del hormigón plástico, y la firmeza y durabilidad del hormigón solidificado. Cuando se agrega ceniza volante al hormigón el monto de cemento de Portland se puede reducir (ACAA, 2020).

2.7.3. Materiales puzolánicos

Las puzolanas son aquellos materiales de composición rica en SiO_2 , similares a las cenizas volcánicas utilizadas por los romanos. Los materiales puzolánicos son así llamados por la interacción química con los productos de hidratación del cemento, principalmente Ca(OH)_2 ; la reacción que describe tal proceso es llamada “reacción puzolánica”.

La generación de más silicatos de calcio hidratados y la eliminación del CH producido por el cemento explican el incremento en las propiedades mecánicas de cementos reemplazados. Además de la composición química de las puzolanas, sus características físicas, como tamaño de partícula y morfología, influyen también considerablemente en las propiedades del cemento sub-sustituido.

2.7.4. Estabilización de suelos

Las cenizas volantes tradicionales se caracterizan por su bajo contenido de cal y alto contenido de sílice, por lo que su utilización como estabilizador de suelos requiere la adición de un agente activador rico en cal. El agente activador provee la cal necesaria para que se produzca la reacción puzolánica, mientras que la ceniza provee los compuestos puzolánicos, sílice y alúmina.

Es así como las mezclas cal-ceniza volante pueden ser usadas para estabilizar suelos gruesos o suelos finos no arcillosos. Normalmente se utiliza cal o cemento como agente activador.

2.7.5. Otros usos del carbón

Otros usuarios importantes del carbón son las refinerías de alúmina, los fabricantes de papel y las industrias químicas y farmacéuticas. Algunos productos químicos pueden producirse a partir de subproductos del carbón. La masa de carbón refinada se utiliza en la fabricación de productos químicos como la creosota, la naftalina, el fenol y el benceno.

El gas de amoníaco recuperado de los hornos de coque se utiliza para fabricar sales de amoníaco, ácido nítrico y fertilizantes agrícolas. Miles de productos diferentes tienen al carbón o alguno de sus subproductos como componentes: jabón, aspirinas, disolventes, tintes, plásticos y fibras, como el rayón y el nailon.

- El carbón también es parte esencial de la producción de productos especializados:
- Carbono activo: utilizado en filtros de agua y aire, así como en máquinas de diálisis.
- Fibra de carbono: un material de refuerzo extremadamente resistente y ligero utilizado en construcción, bicicletas de montaña y raquetas de tenis.
- Metal de silicio: utilizado para fabricar silicios y silanos, que a su vez se utilizan para la fabricación de lubricantes, repelentes de agua, resinas, cosméticos, champú y pasta de dientes.

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Características del estudio

Las características bajo las cuáles se enfoca el presente estudio se detallan en la parte de su enfoque, alcance y diseño.

3.1.1. Enfoque

El enfoque del presente estudio es de tipo mixto, ya que se utilizó análisis cuantitativo para la determinación respectiva de los análisis inmediatos y químicos de las cenizas volantes y de fondo y posteriormente se utilizó análisis cualitativo basándose en los datos obtenidos de la parte cuantitativa y cotejada con otros estudios realizados de acuerdo a la literatura referenciada.

3.1.2. Alcance

El alcance del mismo es de tipo descriptivo-explicativo. Descriptivo puesto que se caracterizó las cenizas generadas por la central termoeléctrica, sometiendo las mismas a una serie de análisis que midieron su humedad, porcentaje de cenizas, inquemados, carbono fijo así como la composición de sus elementos mayoritarios. Explicativo dado a que una vez recolectados y analizados los datos obtenidos de los análisis de laboratorio, se explicó utilizando dichos datos como soporte, los usos posibles para cada tipo de ceniza.

3.1.3. Diseño

El diseño adoptado para este estudio es del tipo no experimental, a pesar de haberse realizado pruebas en laboratorio, las cenizas se analizaron sin ninguna manipulación de sus variables y/o tratamiento previo.

3.2. Unidad de análisis

Se tomó como población de estudio las plantas generadoras de energía a base de carbón mineral y como muestra la operación de una planta generadora. Por razones de confidencialidad, se omite indicar el nombre de la planta generadora que proporciono las cenizas para su estudio.

3.3. Variables

Las variables en estudio se describen a continuación:

Tabla VIII. **Variables de estudio**

| Objetivo Específico | Indicadores | Actividad | Resultados Esperados |
|--|---|--|--|
| Realizar un análisis inmediato para las cenizas volantes y de fondo. | % Humedad % Materia Volátil % Cenizas % Carbono Fijo | Análisis Inmediato bajo norma ASTM D-3172. | Caracterización del tipo de carbón para las cenizas volantes y de fondo. |
| Determinar el porcentaje de Inquemados de las cenizas volantes y de fondo. | % LOI (pérdida por calcinación) | Ensayos bajo norma ASTM. | Propuesta de mejora del quemador (eficiencia energética). |

Continuación tabla VIII.

| | | | |
|---|--|--|--|
| Evaluar la composición de los óxidos mayoritarios mediante análisis químico por cada tipo de ceniza a estudiar. | % SiO ₂ % Al ₂ O ₃ % Fe ₂ O ₃ % CaO % MgO | Ensayos químicos de las cenizas bajo norma COGUANOR. | Tipo y clase de cenizas volantes y de fondo (caracterización). |
| Determinar los posibles usos de la ceniza volante y de fondo basado en su análisis inmediato y químico. | Resultados cuantitativos. | Revisión y análisis de resultados con apoyo en estudios previos. | Posibles usos y/o aplicaciones. |

Fuente: elaboración propia.

3.4. Fases de la investigación

La metodología que se propuso para dar respuesta a las interrogantes y consecuentemente los objetivos planteados en este estudio consistió en:

3.4.1. Fase 1

Se revisó la literatura haciendo una recopilación de material bibliográfico que sirvió de soporte para el desarrollo de dicha investigación.

3.4.2. Fase 2

Muestreo en campo de las cenizas, con lo cual se obtuvieron las muestras necesarias para el respectivo análisis. Las cenizas de fondo fueron recopiladas del sistema de recolección en la cercanía de la zona del horno de la caldera. Las cenizas volantes fueron recopiladas a la salida del sistema de precipitación

de la chimenea. Se utilizó la Norma COGUANOR NGO 41 044, la cual establece el muestreo y los métodos de ensayo para las cenizas volantes del carbón y para las puzolanas naturales calcinadas o no, las cuales se emplean como aditivo mineral al concreto de cemento *Portlan* (Comisión Guatemalteca de Normas COGUANOR, 1987).

Las muestras fueron tomadas *in situ* y bajo la especificación de la Norma COGUANOR NGO 41 044:87 (Comisión Guatemalteca de Normas COGUANOR, 1987) utilizando el método individual que consistió en tomar una muestra de 2 kilogramos (Kg) por tipo de ceniza, realizando un total de 2 muestreos por un período de 6 semanas totalizando 12 muestras. Las cenizas de fondo fueron recopiladas del sistema de recolección en la cercanía de la zona del horno de la caldera. Las cenizas volantes fueron recopiladas a la salida del sistema de precipitación de la chimenea, ambas muestras recolectadas previo a su disposición final en el área asignada. Luego las muestras se trasladaron al Laboratorio Química Industrial del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala (CII-USAC), para su preparación, análisis y evaluación. Las muestras se almacenaron bajo condiciones controladas de humedad para prevenir y/o minimizar la alteración de los constituyentes originales.

3.4.3. Fase 3

Análisis de las muestras en el laboratorio de química industrial de la facultad de ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Se realizaron en duplicado para cada muestra de cenizas los análisis de humedad, cenizas, materia volátil, carbono fijo, inquemados, así como sus componentes mayoritarios, todos ellos en datos porcentuales de acuerdo a las normas utilizadas.

Se realizó el análisis inmediato bajo norma ASTM D-3172 (American Society of Testing Material -ASTM-, 2007) para la determinación del contenido de humedad, cenizas, materia volátil y carbono fijo (por diferencia de los 3 anteriores) de las muestras de carbón mineral.

3.4.3.1. Contenido de humedad (H)

Se colocó 0.5 g de la muestra en un crisol tarado previamente, luego se tomaron los datos de peso. Las muestras se colocaron en un horno durante 2 horas a 105 °C (ASTM., D-3174). Al obtener los pesos finales de la muestra se procedió a determinar el contenido de humedad mediante siguiente ecuación:

$$\% H = \frac{\text{Masa muestra después del calentamiento (g)}}{\text{Masa original de la muestra (g)}} \times 100 = \frac{M_2 - M_3}{M_2 - M_1} \times 100 \quad (1)$$

Dónde:

H = contenido de humedad (%)

M₁ = masa del crisol vacío (g)

M₂ = masa del crisol (g) + masa muestra previo a calentamiento (g)

M₃ = masa del crisol (g) + masa del residuo final (g)

3.4.3.2. Contenido de cenizas (Cz)

Se colocó 0.5 g en un crisol previamente tarado, luego la muestra fue colocada en un horno de mufla a una temperatura de 750°C durante 2 horas, posteriormente la muestra fue puesta en un desecador hasta alcanzar el equilibrio, pesándose y anotando el peso final (ASTM., D-3174).

El porcentaje de contenido de cenizas se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$\% Cz = \frac{\text{Masa del residuo después de combustión (g)}}{\text{Masa original de la muestra (g)}} \times 100 = \frac{M_3 - M_1}{M_2 - M_1} \times 100 \quad (2)$$

Dónde:

Cz = contenido de cenizas (%)

M₁ = masa del crisol vacío (g)

M₂ = masa del crisol (g) + masa muestra previo a calentamiento (g)

M₃ = masa del crisol (g) + masa del residuo final (g)

3.4.3.3. Materia volátil (Mv)

Se calentó 0.5 g de la muestra a 950°C durante 10 minutos en un crisol previamente tarado. La muestra fue calentada en un horno de mufla parcialmente cerrada. Posterior, el crisol y su contenido se enfriaron en desecadores (ASTM., D-3175). Se registró la diferencia de peso y se calculó la materia volátil con la siguiente ecuación:

$$\% Mv = \frac{M_2 - M_3}{M_2 - M_1} \times 100 \quad (3)$$

Dónde:

Mv = materia volátil (%)

M₁ = masa del crisol vacío (g)

M₂ = masa del crisol (g) + masa muestra previo al calentamiento (g)

M₃ = masa del crisol (g) + masa del residuo después de calentar (g)

3.4.3.4. Carbono fijo (Cfx)

El carbono fijo se determinó por la diferencia entre el 100 % y la suma de los 3 parámetros anteriores mediante la ecuación siguiente:

$$\% Cfx = 100 - (\%H + \%Cz + \%Mv) \quad (4)$$

Dónde:

Cfx = carbono fijo (%)

Mv = materia volátil (%)

Cz = contenido de ceniza (%)

H = contenido de humedad (%)

3.4.3.5. Pérdidas por ignición (LOI) y ratio del combustible (Rc)

La pérdida por ignición también conocida como pérdida por calcinación de una puzolana, se determinó por el calentamiento de la muestra como se indica en la Norma COGUANOR NGO 41 003:H18.

El ratio del combustible (Rc) se determinó de la relación que existe entre el carbono fijo y la material volátil (Cf_x / Mv).

3.4.3.6. Análisis químico

La composición química de elementos mayoritarios se determina en porcentajes de contenido de sus óxidos mayoritarios: aluminio, hierro, calcio, sílice y magnesio en base a lo indicado en los siguientes puntos.

- Determinación del óxido de aluminio y óxido de hierro

Una ceniza volante es básicamente un vidrio de silicato que contiene sílice, alúmina, hierro y calcio. Mientras que como componentes menores tiene magnesio, potasio, azufre, carbono y sodio. Por tanto el contenido de estos componentes es vital para su utilización como una puzolana artificial.

Para la determinación de estos componentes se empleó la Norma COGUANOR NGO 41 003:H12 Y NGO 41 003:H13.

- Determinación del óxido de calcio

Según la Norma ASTM C 618, una ceniza volante se puede clasificar como clase F o C, según las características físicas, químicas y mecánicas que presenten. Los materiales de clase F son comúnmente cenizas volantes con bajo contenido de calcio (menor al 10 por ciento) y un contenido de carbono menor que 5 por ciento, aunque, puede contener hasta un 10 por ciento. Las cenizas de clase C presentan alto contenido de calcio (entre 10 % y 30 %) y contenidos de carbono menor que 2 %. Este componente se determinó según lo descrito en la Norma COGUANOR NGO 41 003:H15.

- Determinación del óxido de magnesio

El óxido de magnesio, potasio, azufre, carbono y sodio pertenecen al grupo de componentes menores de una ceniza volante. Para su determinación se empleó la Norma COGUANOR NGO 41 003:H12.

3.4.3.7. Tratamiento de datos

Para la técnica de análisis de la información, se usó la desviación estándar como medida de la determinación del grado de variabilidad del conjunto de datos estudiados, así como su coeficiente de variación cuantificando porcentualmente la variabilidad de los valores experimentales según cada tratamiento experimental aplicado, corroborando así la calidad de los mismos.

- Determinación de la Desviación Estándar

$$\sigma = \sqrt{\sum \frac{(xi - X)^2}{n - 1}} \quad (5)$$

Dónde:

σ = desviación estándar (muestra)

xi = valor obtenido de cada corrida

X = promedio o media respectiva de cada rango

n = número total de muestras

- Determinación del Coeficiente de Variación

$$r = \frac{\sigma}{X} \quad (6)$$

Dónde:

r = coeficiente de variación (%)

σ = desviación estándar

X = promedio o media respectiva de cada rango

3.4.4. Fase 4

Revisión y análisis de los resultados cuantitativos de los análisis de laboratorio para la interpretación y propuesta de la fase cualitativa sobre los usos posibles de las cenizas.

3.4.5. Fase 5

Interpretación, discusión y presentación de los resultados obtenidos.

4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

La metodología utilizada para la obtención de los datos de las muestras analizadas consistió en el análisis inmediato de las cenizas del carbón, logrando con ello la determinación del rango del carbón al que pertenecen.

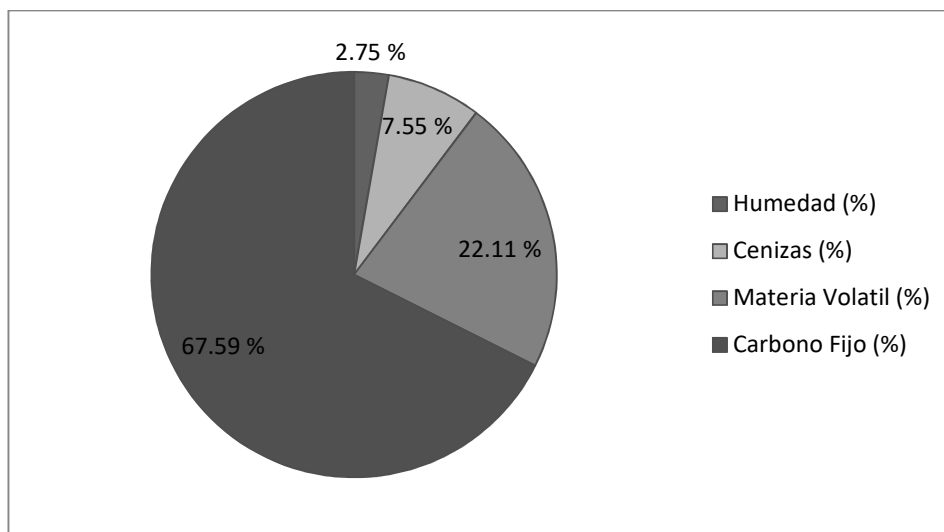
Adicional se calcularon los porcentajes de Inquemados con la finalidad de evaluar y recomendar mejoras al proceso de combustión. Se realizó el respectivo análisis químico para la caracterización respectiva.

Por último, con la determinación de su composición química mayoritaria y los valores del análisis inmediato se delimitaron las propuestas de uso que mejor se acoplan a la realidad nacional.

4.1. Análisis inmediato de las cenizas volantes y de fondo

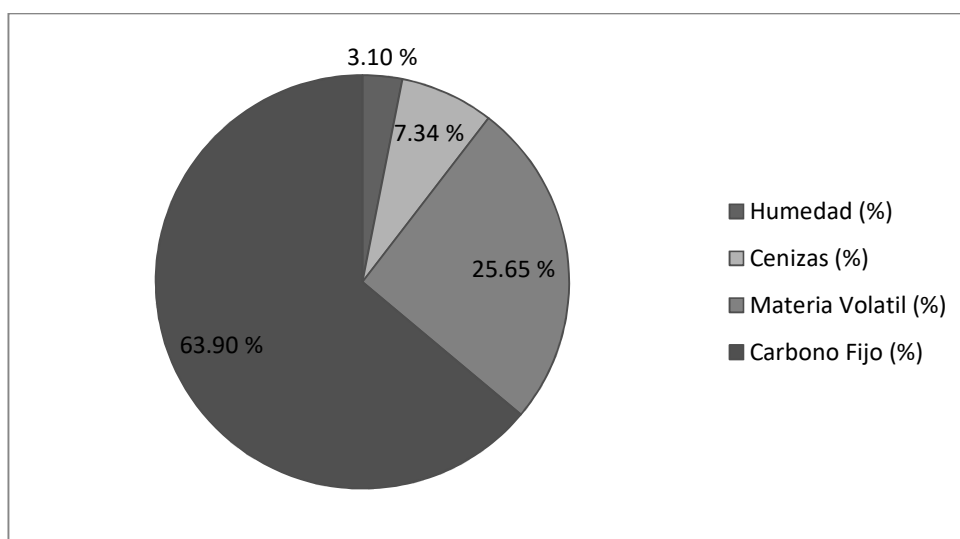
Los resultados se presentan en las figuras 10 y 11 para las cenizas volantes y de fondo respectivamente. Los resultados son presentados como promedio porcentual para cada una de las composiciones, determinándose el contenido de humedad, materia volátil, cenizas y carbono fijo, como se muestra a continuación:

Figura 10. **Análisis de las cenizas volantes**



Fuente: elaboración propia.

Figura 11. **Análisis de las cenizas de fondo**



Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. Tratamiento estadístico para el análisis inmediato

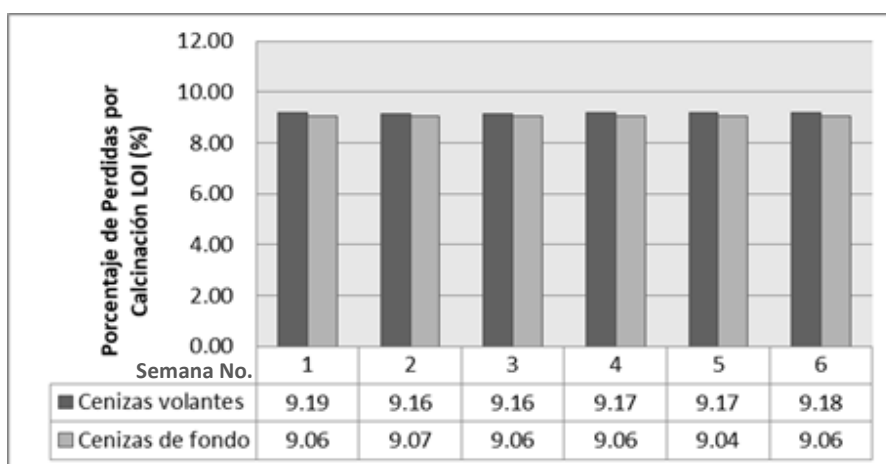
| Tipo de Ceniza | Parámetro Estadístico | Humedad | Materia volátil | Cenizas | Carbono fijo |
|----------------|-----------------------|---------------|-----------------|---------------|---------------|
| Volante | Promedio | 2.75 | 22.11 | 7.55 | 67.59 |
| | Desviación Estándar | 0.18 | 0.81 | 0.37 | 1.06 |
| | Coeficiente Variación | 6.37 % | 3.67 % | 4.90 % | 1.56 % |
| de Fondo | Promedio | 3.1 | 25.65 | 7.34 | 63.9 |
| | Desviación Estándar | 0.06 | 0.22 | 0.16 | 0.25 |
| | Coeficiente Variación | 2.04 % | 0.87 % | 2.22 % | 0.39 % |

Fuente: elaboración propia utilizando Microsoft Excel 2017.

4.2. Pérdidas por calcinación o ignición

Se realizó la pérdida por calcinación, denominada como *loss on ignition* (LOI), para ambos tipos de cenizas. Los resultados obtenidos se presentan como promedio de los datos analizados, detallándose a continuación:

Figura 12. Pérdidas por calcinación de cenizas volantes y de fondo



Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Promedio y tratamiento estadístico para LOI de las cenizas**

| Tipo de Ceniza | Promedio LOI (%) | Desviación | Coefficiente de Variación (%) |
|----------------|------------------|------------|-------------------------------|
| Volantes | 9.17 % | 0.040 | 0.43 % |
| de Fondo | 9.06 % | 0.037 | 0.41 % |

Fuente: elaboración propia utilizando Microsoft Excel 2017.

4.3. Análisis químico

La caracterización química se realizó mediante digestión ácida de las cenizas volantes y de fondo, obteniéndose los resultados de los óxidos mayoritarios correspondientes a sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3), óxido de hierro (Fe_2O_3), cal (CaO), magnesia (MgO) y la suma de sus óxidos ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) en términos de porcentaje en peso. Los resultados respectivos son presentados en las tablas IX, X y XII como se detalla a continuación:

Tabla XI. **Óxidos mayoritarios para las cenizas volantes**

| Tipo de Ceniza | SiO_2 (%) | Al_2O_3 (%) | Fe_2O_3 (%) | CaO (%) | MgO (%) |
|-------------------------------|--------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------|------------------|
| Volantes (%) | 52.99 | 23.23 | 8.32 | 2.28 | 1.4 |
| Desviación Estándar | 0.89 | 0.641 | 0.222 | 0.054 | 0.037 |
| Coefficiente de Variación (%) | 1.68 | 2.76 | 2.67 | 2.37 | 2.63 |

Fuente: elaboración propia utilizando Microsoft Excel 2017.

Tabla XII. **Óxidos mayoritarios para las cenizas de fondo**

| Tipo de Ceniza | SiO₂ (%) | Al₂O₃ (%) | Fe₂O₃ (%) | CaO (%) | MgO (%) |
|-------------------------------|----------------------------|--|--|----------------|----------------|
| De Fondo (%) | 51.92 | 23.08 | 8.09 | 2.65 | 1.78 |
| Desviación Estándar | 0.351 | 0.548 | 0.066 | 0.185 | 0.204 |
| Coefficiente de Variación (%) | 0.68 | 2.37 | 0.82 | 6.97 | 11.48 |

Fuente: elaboración propia utilizando Microsoft Excel 2017.

Tabla XIII. **Suma de óxidos principales SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃**

| | Ceniza Volante (%) | Ceniza de Fondo (%) |
|--|---------------------------|----------------------------|
| SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ | 84.54 | 83.09 |
| Desviación Estándar | 1.022 | 0.738 |
| Coefficiente de Variación (%) | 1.21 | 0.89 |

Fuente: elaboración propia utilizando Microsoft Excel 2017.

Tabla XIV. **Relación SiO₂/Al₂O₃**

| Óxidos | Ceniza Volante (%) | Ceniza de Fondo (%) |
|---|---------------------------|----------------------------|
| SiO ₂ | 51.46 | 51.92 |
| Al ₂ O ₃ | 23.74 | 23.08 |
| Relación SiO ₂ /Al ₂ O ₃ | 2.17 | 2.25 |

Fuente: elaboración propia.

4.4. Posibles usos de las cenizas volantes y de fondo

En base a los resultados obtenidos tanto para los análisis inmediatos como los análisis químicos se establecieron 4 posibles usos, los cuales se detallan a continuación:

- Material puzolánico con fuerte enfoque en la elaboración de hormigón.
- Gravas para capas base y sub-bases de suelos.
- Terraplenes.
- Extracción de Sílice.

En la siguiente sección, se discute y explica cómo y por qué se eligieron estos posibles usos como mejor alternativa.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Hay que tomar en cuenta que en nuestra región y más aún a nivel país, el acceso a este tipo de información e investigación es limitada por no decir nula, hay que ubicarse en investigaciones realizadas en Norteamérica y Europa para entender sobre la dinámica del tema y lograr asimilar y tropicalizar los resultados a lo que el país requiere y/o necesita.

Definitivamente aplicaciones existen para este subproducto que pueden ser adaptadas al entorno nacional pero como se discutirá más adelante, serán necesarios estudios complementarios y pruebas en campo que confirmen la viabilidad y aplicabilidad de los mismos y que puedan generar beneficio socio-económicos para el país.

Por último, un punto importante a aclarar respecto al presente estudio es, que a pesar de haber realizado y hecho los análisis tanto para las cenizas volantes como las de fondo, en la discusión se generalizaron y englobaron como un solo tipo de cenizas, tomando como base lo indicado por García-Fraile en su estudio sobre caracterización de cenizas de centrales térmicas, indicando que “se da una particular importancia a las cenizas volantes, ya que por sí solas constituyen el mayor porcentaje (aproximadamente el 80 % de los residuos originados a partir del carbón pulverizado)” (García-Fraile, 2015, pág. 70).

5.1. Análisis inmediato de las cenizas volantes y de fondo

Los resultados obtenidos del análisis inmediato de las cenizas volantes y de fondo han sido presentados en las figuras 10 y 11 de la sección de

resultados mostrando los porcentajes de humedad, materia volátil, cenizas y carbono fijo de las mismas.

Con el análisis inmediato de las cenizas podemos deducir el tipo de carbón original utilizado así como información de las características de su combustión. Tomando como base los resultados obtenidos, tanto de las cenizas volantes como las de fondo se comportan muy similar con valores de 2.75 % y 3.10 % para el caso de la humedad; 7.55 % y 7.34 % para el caso de las cenizas; 22.11 % y 25.65 % para la materia volátil y 67.59 % y 63.90 % para el carbono fijo, respectivamente. Estos resultados concuerdan con lo expuesto por García-Fraile en donde se hace concordancia en que las propiedades fisicoquímicas de ambos tipos de cenizas son muy similares.

Sin embargo cabe mencionar que aspectos como la porosidad, área superficial, densidades, capacidades de absorción del agua, granulometría, entre otros, todas propiedades físicas no analizadas para este estudio, arrojan diferencias significativas para la comparación entre ambas (García-Fraile, 2015), recomendando ampliar estudios y análisis relacionados a estos aspectos para tener una comparación directa entre cenizas volantes y de fondo de una misma fuente.

Con respecto al contenido de humedad, la misma se encuentra cerca del límite aceptado por la ASTM C618 con un valor no mayor del 3 %, acá es clave resaltar como detalla García-Fraile en su tesis de master, “el contenido de humedad depende de la forma en que éstas se depositen después de abandonar los filtros y precipitadores. Cuando se quieren aprovechar estas cenizas, deben recogerse a la salida de los filtros, a fin de que su contenido de agua sea mínimo” (García-Fraile, 2015, pág. 25) y en el caso de nuestra investigación, ambas cenizas se recolectaron y conservaron bajo condiciones

que minimizaron el contacto directo con el ambiente por largos períodos de tiempo, obteniendo resultados idóneos de acuerdo a la norma con valores de 2.75 % y 3.10 % para las cenizas volantes y de fondo respectivamente, esta última con una leve variación que se explica por lo anteriormente descrito.

De los cuatro parámetros analizados, los valores de carbono fijo (Cfx) y materia volátil (Mv) son los que nos ayudan a determinar la clasificación de rango del carbón del que provienen y que de acuerdo a la norma ASTM C618, el rango de carbón al que pertenecen estas cenizas es del tipo Bituminoso (ver tabla II).

Con respecto al valor de las cenizas, la literatura revela que el alto contenido de cenizas también es un indicio de un bajo grado de carbonización y, por lo tanto, de inmadurez del carbón (García-Fraile, 2015). Cuanto menor sea el contenido de cenizas de un carbón, mejor será su aplicación como fuente de combustible fósil (Wassiepe, 1992) por lo que al obtener valores de 7.55 % para las cenizas volantes y 7.34 % para las cenizas de fondo, claramente se identifica que el carbón utilizado posee una buena madurez, congruente con el rango de carbón del que provienen.

Con respecto al contenido de materia volátil (Mv), de acuerdo a Schoebert, ambos valores se relacionan con la parte carbonosa del carbón y su comportamiento de combustión. “Los carbones con alto contenido de materia volátil suelen ser fáciles de encender pero arden rápidamente, tienen una llama grande y, a menudo, humeante. En contra parte, un alto contenido de carbono fijo indica carbón que puede ser difícil de encender pero quema más lentamente” (Schoebert, 2013, pág. 297). Y como se observa en los resultados, los datos son coherentes con lo indicado por Schoebert, al confirmarse valores altos en contenido en carbono fijo de 67.59 % y 63.90 % para las cenizas

volantes y de fondo respectivamente versus valores bajos de materia volátil de 22.11 % para las cenizas volantes y 25.65 % para las cenizas de fondo. El carbono fijo es una medida de la calidad, valor calorífico y rango del carbón utilizado, en nuestro caso concuerdan con el tipo de rango determinado de acuerdo a la ASTM, carbón bituminoso.

Como se ha observado, los valores entre ambos tipos de cenizas en el caso del análisis inmediato arrojan valores muy similares y como bien se menciona en la literatura, al ser las cenizas volantes el mayor volumen generado por el proceso de combustión de las centrales termoeléctricas, el enfoque será en las mismas. En el caso de las cenizas de fondo estas constituyen en promedio entre un 15 - 20 % de los subproductos generados.

“Este tipo de materiales, dadas sus propiedades físicas y mayor granulometría, tienen usos más limitados que las cenizas volantes. Es muy frecuente su utilización en fabricación de cemento, como áridos en rellenos industriales, en hormigón, bases de carreteras, lechadas, etc.” (García-Fraile, 2015, pág. 26). Dado a lo anterior, lo recomendable es realizar estudios a nivel de propiedades físicas de estas cenizas para abordar y analizar puntualmente los valores que se obtendrían de las mismas.

Para finalizar, la tabla IX muestra los valores referentes al análisis estadístico realizado a las muestras. Como se aprecia en la misma los valores de desviación estándar tanto para las cenizas volantes como las de fondo, son bajos para cada tratamiento realizado (humedad, cenizas, materia volátil y carbono fijo), consecuentemente con una dispersión baja respecto a la media, recordemos que:

“la desviación estándar le ayuda a conocer de qué manera se agrupan o distribuyen un conjunto de datos con respecto a su media. En casi todos los conjuntos de datos, la mayoría de los valores observados quedan dentro de un intervalo de más menos una desviación estándar por encima y por debajo de la media. Por esa razón, conocer la media y la desviación estándar ayuda a definir por lo menos dónde se agrupa la mayoría de los valores de los datos” (Levine, Krehbiel, & Berenson, 2006, pág. 83).

Adicional, los valores correspondientes a los coeficientes de variación no superan el 10 %, siendo para las cenizas volantes del 6.37 %, 3.67 %, 4.90 % y 1.56 % para la humedad, material volátil, cenizas y carbono fijo respectivamente; y en el caso de las cenizas de fondo, los valores obtenidos, en el mismo orden fueron de 2.04 %, 0.87 %, 2.22 % y 0.39 %, demostrando que hay homogeneidad y poca variabilidad en los datos.

5.2. Pérdidas por calcinación o ignición (LOI)

Cuando las cenizas son expuestas a temperaturas por encima a los 900 °C, por un lado pueden incrementar su peso por acción a la oxidación del azufre y el hierro que contienen, pero por otro lado, sufren pérdida de peso debido al agua combinada en sus arcillas residuales y a la presencia de carbonatos que contienen, a esta combinación de factores se le denomina pérdida por calcinación (García-Fraile, 2015, pág. 27).

Los resultados obtenidos del análisis de pérdidas por calcinación son de 9.17 % para las cenizas volantes y de 9.06 % para las cenizas de fondo, valores que de acuerdo a la ASTM están por encima del rango ideal establecido para cenizas provenientes de carbones tipo bituminoso que corresponde al 6 %, sin embargo, la misma norma da la pauta de poder ser utilizadas hasta un rango de

12 % siempre y cuando cumplan con los parámetros establecidos en el proceso en que sean utilizadas.

Como lo indica García-Fraile, los valores altos en pérdidas por calcinación se deben a partículas carbonosas resultantes de la combustión incompleta de partículas de carbón, llamados inquemados (García-Fraile, 2015), indicativo de ineficiencia en el proceso de combustión. Sin embargo, los valores obtenidos no son un fuerte indicio de ineficiencia dado que los resultados obtenidos no son catalogados como altos (hablamos del 9 % en promedio).

Adicional, ese desfase que se tiene entre el valor ideal de acuerdo a norma versus los valores obtenidos, puede explicarse por la descomposición térmica de las especies inorgánicas (García-Fraile, 2015), debido a que los análisis no fueron efectuados inmediatamente al recoger las muestras, lo que provocó alteración física de las mismas (manipulación, ambiente, contaminación, etc.) y dando como resultado un desfase sobre el valor ideal.

Por último, para soportar el uso de las mismas con el valor de 9 % obtenido, que de acuerdo a norma ASTM está fuera del rango, pero no prohibido, nos apoyamos en las recomendaciones del centro de estudios y experimentación de obras públicas del Gobierno de España (CEDEX), en donde se hace ver que “el contenido de inquemados arriba del 10 % resulta perjudicial para la actividad puzolánica y para la resistencia adquirida, debido a que el carbón tiende a adherirse a las partículas, cubriendo su superficie y reduciendo así la superficie específica” (Centro de estudios y experimentación de obras públicas (CEDEX), Ministerio de Fomento, 2021).

En el tratamiento de datos, los valores de desviación estándar y del coeficiente de correlación fueron de 0.039 % y 0.43 % para las cenizas volantes y de 0.037 % y 0.41 % para las cenizas de fondo, valores que demuestran la poca variabilidad en la obtención de los datos y una alta homogeneidad en los mismos.

5.3. Análisis químico

Las cenizas se componen principalmente de sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3), óxido férrico (Fe_2O_3), cal (CaO) y óxido de magnesio (MgO), carbón sin quemar y en menor proporción (5 %) elementos trazas (Caballero & Médico, 2013), estos últimos no forman parte del presente estudio, puesto que el enfoque está en el potencial de aplicación que está ligado a los elementos mayoritarios, y no a los posibles impactos ambientales que pudiesen causar a consecuencia de sus elementos trazas.

Basándonos en la procedencia de las cenizas de acuerdo al tipo de carbón y a los resultados de su composición química, las cenizas volantes se clasifican de acuerdo a la Norma ASTM C618 en: cenizas silicoaluminosas, denominadas también puzolánicas no activas, con contenidos de CaO menores al 15 % (clase F) y sumatoria de sus óxidos principales con valor mínimo del 70 % (Caballero & Médico, 2013). Y en cenizas sulfocálcicas con altos contenidos de CaO mayores al 15 % (clase C), llamadas hidráulicas o activas y con valores mínimos de sus óxidos principales del 50 % (Caballero & Médico, 2013).

Los resultados obtenidos para el análisis químico de las cenizas se muestran en las tablas XI y XII expresados en porcentaje de óxidos mayoritarios. Con contenidos de CaO que van de 2.28 % y 2.65 % para las cenizas volantes y de fondo, contenido de MgO de 1.4 % y 1.78 % y suma de

sus óxidos principales ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) que arrojan valores 84.54 % y 83.09 % respectivamente, identificándolas como cenizas silicoaluminosas clase F en concordancia con lo que indica la norma ASTM C618. Adicional, estos análisis corroboran los datos obtenidos en el análisis inmediato, puesto que “las cenizas volantes tipo F son el resultado de la combustión de la antracita o el carbón bituminoso” (Grijalba, 2010, pág. 55), validando el rango de carbón como bituminoso.

Otro dato importante que arrojó el estudio es el valor de la relación entre la sílice y la alúmina ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$), los cuales se aprecian en la tabla XIV, siendo estos de 2.17 y 2.25 para las cenizas volantes y de fondo respectivamente, un fuerte indicio para su uso en la extracción de sílice. Este dato es confirmado por García-Fraile quien confirma que a mayor relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ mayor es la probabilidad de extracción de sílice (García-Fraile, 2015), como uno de los posibles usos del mismo.

Finalmente, la variabilidad de estos datos es pequeña como se muestra en las tablas XI, XII y XIII de las secciones de resultados, adicional, la mayoría de los análisis de los óxidos mayoritarios de ambas cenizas se encuentran por debajo del 10 % que indica una variabilidad muy baja. En el caso del MgO para las cenizas de fondo se obtuvo un valor de 11.48 %, que lo categoriza como baja variabilidad.

Se concluye que la investigación presenta datos homogéneos dentro de cada uno de los tratamientos realizados y por ende las variaciones no fueron muy marcadas y/o que indicarán variación extra que afecte a los análisis citados.

5.4. Posibles usos

En la literatura estudiada y utilizada de base para esta investigación, nos hemos topado un sinnúmero de usos y aplicaciones muy enfocadas en la industria de la construcción y mayormente utilizando las cenizas volantes. Tomando de base los resultados de los análisis descritos y apoyándonos en estudios previos, se proponen los siguientes usos tropicalizándolos a las necesidades del país dando una alternativa con usos medioambientalmente sostenibles.

5.4.1. Material puzolánico

Al tener un carácter puzolánico, las cenizas en cuestión tienen la capacidad de formar aglomerados hidráulicos al combinarse con cal (CaO), como lo indica García-Fraile en su trabajo de investigación:

los cementos a partir de cenizas volantes tienen un poder de retención de agua excepcional y un elevado poder aglomerante. Además este modo de reutilización de las cenizas volantes agrega una etiqueta verde a la construcción, porque esta técnica permite reducir la emisión de CO_2 que se generaría al producir la fracción de cemento sustituido por las cenizas volantes, al mismo tiempo que se reduce el consumo de materias primas naturales (García-Fraile, 2015, pág. 17).

Las cenizas con mayor comportamiento puzolánico son las silicoaluminosas, como es nuestro caso, en comparación con la mayoría de las puzolanas naturales y artificiales, lo que las convierte en excelente material para su uso en hormigón, gracias a la propiedad y capacidad de reaccionar con el hidróxido de cálcico (Ca(OH)_2) que se da en la reacción de hidratación del cemento portland.

Otros estudios como el de Jones y McCarthy, titulado “Utilización de cenizas volantes de carbón con bajo contenido de cal sin procesar en concreto espumado”, se hace énfasis en que las cenizas volantes de carbón bajas en cal (CaO) sin procesar también se pueden utilizar con éxito en el hormigón como material sustituto de la arena (Jones & McCarthy, 2005). El mismo McCarthy confirma que valores de LOI altos y consistencia gruesa, son más adecuados para estas aplicaciones.

Por último, para utilizar cenizas volantes en cemento, el contenido de SiO_2 debe ser superior al 25 % y la suma de SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 debe ser mayor al 70 %. Además, el álcali y el MgO por ejemplo, deben ser inferiores al 5 % en peso de acuerdo a Solís-Guzmán y Leiva (Solís-Guzmán, Leiva, Marrero, & Carcía, 2011).

5.4.2. Grava para capas base y sub-base

Al obtener cenizas del tipo silicoaluminosas, “existe potencial para usarlas en la fabricación de grava al realizar mezclas de cenizas en conjunto con cal y agua en proporciones establecidas para que la mezcla consiga resistencias similares a los construidos con conglomerantes hidráulicos como el cemento” (García-Fraile, 2015, pág. 76).

Las bases y sub-bases realizadas con grava-ceniza-cal presentan notables ventajas como lo indica García-Fraile, haciéndose resaltar: 1) la gran facilidad de compactación a causa del efecto lubricante de los granos de ceniza, 2) el endurecimiento lento con bajas rigideces a corto plazo, 3) la reducción del agrietamiento ocasionado por asientos diferenciales y retracciones térmicas, producidos fundamentalmente a corto plazo y por último, la posibilidad de apertura al tráfico inmediatamente después de ser compactada.

En este caso, el uso de cenizas disminuye la necesidad de materias primas como áridos y otros recursos con lo que se alarga la vida útil de las correspondientes explotaciones (García-Fraile, 2015, pág. 76).

“También se refuerza su uso, siempre como bases, para la construcción de carreteras mezcladas con cemento (2–10 % en peso) y que además se pueden utilizar de manera muy eficaz como material base en la construcción de carreteras” (Lav, Lav, & Ahmet, 2006).

5.4.3. Terraplenes

Las cenizas del tipo silicoaluminosas, como son las analizadas en este estudio, son consideradas como solución técnica para la construcción de terraplenes puesto que presentan ventajas sobre los terraplenes convencionales debido a que como material compactado, “su peso unitario es un 70-80 % menor que el de la mayoría de los suelos, adicional a su buena capacidad de soporte y sus propiedades de auto-endurecimiento” (García-Fraile, 2015, pág. 77).

La mezcla de cenizas volantes y cenizas de fondo pueden ser aditivos útiles en suelos blandos para mejorar sus propiedades de ingeniería como resistencia, capacidad de carga y para disminuir el desplazamiento (Rifai, Yasufuku, & Omine, 2012).

Una desventaja clara al respecto que se debe tomar en cuenta más en nuestro país que suele ser afectado por inundaciones, es que este tipo de uso no se recomienda para zonas inundables, a menos que se agregue un material impermeable que minimice el riesgo de alteración debido a su propiedad hidrofílica.

5.4.4. Extracción de sílice

Los valores elevados de las concentraciones de SiO_2 (sílice) que se han obtenido de los análisis químicos, con valores de 52.99 % y 51.92 % para las cenizas volantes y de fondo respectivamente más la relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (sílice/alúmina) de cada una con valores de 2.28 para las cenizas volantes y 2.25 para las cenizas de fondo, las convierten en materiales óptimos para el proceso de extracción de sílice (Si).

Al aprovechar la extracción de sílice dado los altos contenidos de la misma, se puede lograr su aprovechamiento en cerámicas a base de vidrio. Es claro el ejemplo que pone Peng en su estudio, indicando que:

Las vitrocerámicas poseen propiedades mecánicas únicas, como resistencia a la abrasión, alta resistencia mecánica y estabilidad para una amplia gama de opciones de uso. Las cerámicas de vidrio a base de cenizas volantes se probaron en cuanto a propiedades físicas y mecánicas, coeficiente de expansión térmica, densidad, dureza y resistencia a la flexión, con resultados muy positivos que aseguraran una amplia gama de aplicaciones en la industria de la construcción (Peng & Hu, 2004, pág. 1975).

Tomando de base las preguntas de investigación y los resultados obtenidos, podemos constatar que la metodología utilizada ha logrado responder a los objetivos planteados en esta investigación.

CONCLUSIONES

1. Con valores obtenidos de materia volátil de 22.11 % y 25.65 % y valores de carbono fijo de 67.59 % y 63.90 % para las cenizas volantes y de fondo respectivamente, se determina que la clasificación del carbón del que provienen están en el rango de los carbones bituminosos.
2. A mayor valor en el porcentaje de pérdidas por calcinación, menos eficiente es el proceso de combustión, y de acuerdo a los valores obtenidos que están en 9.17 % para las cenizas volantes y 9.06 % para las cenizas de fondo, estos no son un fuerte indicio de ineficiencia en el proceso. Sin embargo ese desfase que se tiene entre el valor ideal de acuerdo a la norma ASTM del 6 % versus los valores obtenidos, puede explicarse por la descomposición térmica de las especies inorgánicas, considerándose como impurezas poco reactivas.
3. Al haberse obtenido resultados arriba del 70 % para la suma de los óxidos principales ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$), valores menores al 15 % en la cantidad de CaO y no excederse del 5 % en los valores para el MgO, la cenizas se clasifican como cenizas silicoaluminosas Clase F puzolánicas no activas, con contenidos de CaO de 2.28 % y de 2.65 %; suma de sus óxidos principales ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) con valores de 84.54 % y 83.09 % y valores de MgO de 1.40 % y 1.78 % para las cenizas volantes y de fondo respectivamente.

4. Al determinar las cenizas como aquellas provenientes de carbón bituminoso y siendo estas clasificadas como cenizas silicoaluminosas clase F, se concluye que las mismas son aptas para ser usadas como material puzolánico para elaboración de hormigón. Poseen potencial técnico para uso como terraplenes y gravas de bases y sub-bases y adicional, los elevados valores de SiO_2 (sílice) y alta relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, perfila a las mismas como material óptimo para la extracción de sílice.

RECOMENDACIONES

1. A los futuros maestrantes de la Escuela de Estudios de Posgrados, realizar análisis físicos que incluyan parámetros tales como: granulometría, porosidad, área superficial, densidad relativa y aparente, capacidad de absorción del agua entre otros, para tener una comparación directa entre cenizas volantes y de fondo de una misma fuente de proceso.
2. Para profundizar en el tema de eficiencia energética del proceso de combustión del carbón, tanto los futuros investigadores de la Escuela de Estudios de Postgrados como a las plantas termoeléctricas a base de carbón, realizar los análisis elementales de las cenizas con el fin de correlacionar las pérdidas por calcinación y el contenido de carbono de las mismas.
3. Generar estudios relacionados a los elementos traza, los cuales tiene importancia debido al potencial impacto ambiental derivado de la solubilidad de sus elementos contaminantes y la volatilidad de los mismos durante la fusión de las cenizas, puede ser punto de partida para nuevos estudios por parte de futuros maestrandos y/o para soportar planes de mitigación dentro de la industria citada.
4. Los análisis acá descritos deben ser completados con pruebas en campo y de aplicabilidad ya que algunas propiedades físicas y hasta químicas pueden variar de cierto modo debido al proceso de combustión, recolección y manipulación de muestras, que pueden alterar de alguna

manera los valores presentados en este estudio. Es necesario generar estudios de aplicabilidad, de acuerdo a las líneas de investigación de la Escuela de Estudios de Posgrados, y generar pruebas de campo que complementen lo descrito en este y futuros estudios.

REFERENCIAS

1. ACAA. (2020). Coal Ash 101. (J. Simpson, Ed.) ASH at Work: Applications, Science, and Sustainability of Coal Ash (2), 88.
2. Adeleke, A.A., Onumanyi, P. & Ibitoye, S.A. (2011). Mathematical optimization of non-coking coal inclusion in coking blend formulations. *J. Petrol. & Coal, Vol. 53*, pp. 212-217.
3. American Society of Testing Material -ASTM-. (2007). Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke. Philadelphia, United State of America.
4. AMM. (2019). *Informe Estadístico 2019*. Guatemala: Administrado del Mercado Mayorista -AMM-.
5. ASTM., D-3174. (s.f.). Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal.
6. ASTM., D-3175. (s.f.). Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke.
7. Caballero, A., & Médico, O. (2013). Caracterización y posible uso de cenizas resultantes de la combustión del carbón, en la futura Termocentral de lecho fluidizado. Río Turbio (Argentina). *REDISA: Hacia un sistema de gestión integral de los residuos sólidos*, 6.

8. Canals, L. (Enero de 2007). *UPC commons*. Recuperado el 2021, de Sitio web de Universitat Politècnica de Catalunya Barcelonatech: <http://hdl.handle.net/2099.1/3325>.
9. Centro de estudios y experimentación de obras públicas (CEDEX), Ministerio de Fomento. (11 de Julio de 2021). *Ministerio de Fomento*. Obtenido de <http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos>: <http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/24/diciembre-2011/valorizacion/propiedades-del-residuo/23/las-cenizas-volantes.html>.
10. Comisión Guatemalteca de Normas COGUANOR. (1987). Muestreo y métodos de análisis de cenizas volantes de carbón y puzolanas naturales empleadas como aditivo mineral al hormigón de cemento portland. *NGO 41 044 87*. Guatemala.
11. Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE). (2013). Indicadores del mercado mayorista de electricidad de la República de Guatemala Correspondiente a 2012. Guatemala.
12. Diez, M. A., Alvarez, R. & Barriocanal, C. (2002). Coal for metallurgical coke production: predictions of coke quality and future requirements for coke making. *Intl. J. Coal Geol.*, 50, 389-412.
13. ECOBA_EURELECTRIC . (Junio de 2011). *European Coal Combustion Products Association*. (Eurelectric/Ecoba, Ed.) Obtenido de www.ecoba.com: http://www.ecoba.com/evjm,media/downloads/ECOBA_EURELECTRIC_Commission_Brief_June_2011.pdf.

14. García-Fraile, J. (2015). Caracterización de cenizas de centrales térmicas del norte de España para su aplicación en usos alternativos . Universidad de Oviedo. Oviedo. España.
15. Grijalba, T. (2010). Utilización sustentable de las cenizas volantes de la combustión del carbón mineral mexicano bajo el plan de desarrollo nacional. Fundación Universitaria Iberoamericana. Sonora. México.
16. IEA. (Diciembre de 2018). *Agencia Internacional de Energía*. Obtenido de www.iea.org: <https://www.iea.org/reports/coal-2018>.
17. INCYT. (Junio de 2018). *Universidad Rafael Landívar*. (I. d. Tecnología, Ed.) Obtenido de www.url.edu.gt: <http://www.incyt.org>.
18. Jauro, A. (2011). Organic geochemistry of Benue trough coals: biomarkers, hydrocarbon generation and coking potentials.
19. Jones, M., & McCarthy, A. (2005). Utilising unprocessed low-lime coal fly ash in foamed concrete. *Fuel*, *84*, 1398-1409.
20. Lav, H., Lav, A., & Ahmet, B. (2006). Analysis and design of a stabilized fly ash as pavement base material. *Fuel*, *85*.
21. León, E. (2006). La importancia del carbón mineral en el desarrollo. Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas, 9 (18), 91.

22. Levine, D., Krehbiel, T., & Berenson, M. (2006). *Estadística para Administración* (Cuarta ed.). Ciudad de México: Pearson Education.
23. Naeem, M. (2019). *Energy & Environment (ENEN-671)*. Univesity of Calgary. Calgary.
24. Obaje, N. G. (1997). Petrographic evaluation of the coking potentials of the Cretaceous Lafia-Obi coal deposits in the Benue trough of Nigeria. *Z. angew Geol., Vol. 43*(No. 4), pp 103—176.
25. Oshinowo, T. & Ofi, O. (1987). Kinetics of chemical desulphurization of coal in aqueous ferric chloride. *The Canadian J. Chem. Engin., 65*, 481-486.
26. Peng, F., & Hu, A. (2004). Nano-Crystal Glass–Ceramics Obtained by Crystallization of Vitrified Coal Fly Ash. *Fuel, 83*, 1973-77.
27. Rey, E. (2017). Cenizas de fondo de carbón: problemática, caracterización y uso como árido en morteros y hormigones. Universidade da Coruña. Coruña: Escola Universitaria de Arquitectura Técnica.
28. Rifai, A., Yasufuku, N., & Omine, k. (2012). Characterization and Effective Utilization of Volcanic Ash for Soil Improvement. *Applied Mechanics and Materials* , 292-97.
29. Sahu, P. (2010). *National Institute of Technology, Rourkela*. Obtenido de www.nitrkl.ac.in: <http://ethesis.nitrkl.ac.in/1708/>.

30. Santurio, J. (Marzo de 2002). Corrección y mejora del análisis de humedad del carbón térmico por medios no destructivos en tiempo real. *Tesis Doctoral*. Oviedo, España: Universidad de Oviedo.
31. Schoebert, H. (2013). *Chemistry of fossil fuels and biofuels* (First Edition ed.). New York: Cambridge University Press.
32. Seshadri, B., Bolan, N., & Raidu, R. &. (Julio de 2010). The role of coal combustion products in managing the bioavailability of nutrients and heavy metals in soils. *Journal of soil science and plant nutrition*, 10, 378-398.
33. Solís-Guzmán, J., Leiva, C., Marrero, M., & Carcía, C. (2011). High Fire Resistance in Blocks Containing Coal Combustion Fly Ashes and Bottom Ash. *Waste Management*, 31, 1783-89.
34. Wassiepe, K. (1992). Present coke making capacities worldwide. *Coke Making International*, Vol. 4, pp. 11.
35. WCI. (Mayo de 2005). *Coal-Power of Progress*. Obtenido de sitio web de WCI: <http://www.worldcoal.org>.

APÉNDICES

Apéndice 1. Datos de cálculo para análisis inmediato de cenizas volantes

| Muestra | Tara Crisol (g) | Peso inicial muestra (g) | Tara + peso inicial (g) | Tara + peso final (g) | Peso final (g) 105°C | Peso final (g) 750°C | Peso final (g) 950°C |
|---------|-----------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| CV1 | 24.759 | 0.503 | 25.262 | 24.993 | 0.489 | 0.321 | 0.269 |
| CV2 | 24.916 | 0.500 | 25.416 | 25.148 | 0.4851 | 0.319 | 0.268 |
| CV3 | 12.362 | 0.502 | 12.864 | 12.599 | 0.4873 | 0.318 | 0.265 |
| CV4 | 11.293 | 0.501 | 11.794 | 11.529 | 0.4871 | 0.318 | 0.265 |
| CV5 | 24.651 | 0.500 | 25.151 | 24.884 | 0.4874 | 0.319 | 0.267 |
| CV6 | 24.876 | 0.500 | 25.376 | 25.115 | 0.4871 | 0.315 | 0.261 |
| CV7 | 12.332 | 0.502 | 12.834 | 12.583 | 0.4873 | 0.307 | 0.251 |
| CV8 | 11.257 | 0.501 | 11.758 | 11.495 | 0.4871 | 0.316 | 0.263 |
| CV9 | 17.230 | 0.501 | 17.731 | 17.466 | 0.4871 | 0.318 | 0.265 |
| CV10 | 18.911 | 0.500 | 19.411 | 19.130 | 0.4873 | 0.330 | 0.281 |
| CV11 | 12.218 | 0.500 | 12.718 | 12.439 | 0.4875 | 0.328 | 0.279 |
| CV12 | 11.214 | 0.502 | 11.716 | 11.457 | 0.4873 | 0.313 | 0.259 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Datos de cálculo para análisis inmediato de cenizas de fondo

| Muestra | Tara Crisol (g) | Peso inicial muestra (g) | Tara + peso inicial (g) | Tara + peso final (g) | Peso final (g) 105°C | Peso final (g) 750°C | Peso final (g) 950°C |
|---------|-----------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| CF1 | 35.112 | 0.501 | 35.613 | 35.388 | 0.485 | 0.286 | 0.225 |
| CF2 | 24.624 | 0.500 | 25.124 | 24.896 | 0.484 | 0.288 | 0.228 |
| CF3 | 24.733 | 0.502 | 25.235 | 25.001 | 0.486 | 0.294 | 0.234 |
| CF4 | 25.789 | 0.500 | 26.289 | 26.061 | 0.484 | 0.289 | 0.228 |

Continuación apéndice 2.

| | | | | | | | |
|------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|
| CF5 | 35.131 | 0.501 | 35.632 | 35.404 | 0.485 | 0.289 | 0.228 |
| CF6 | 24.644 | 0.5 | 25.144 | 24.916 | 0.485 | 0.289 | 0.228 |
| CF7 | 24.65 | 0.5 | 25.150 | 24.924 | 0.485 | 0.287 | 0.226 |
| CF8 | 25.711 | 0.5 | 26.211 | 25.982 | 0.485 | 0.289 | 0.229 |
| CF9 | 35.117 | 0.5 | 35.617 | 35.391 | 0.485 | 0.288 | 0.226 |
| CF10 | 24.805 | 0.5 | 25.305 | 25.074 | 0.485 | 0.291 | 0.231 |
| CF11 | 24.679 | 0.5 | 25.179 | 24.951 | 0.485 | 0.289 | 0.228 |
| CF12 | 25.287 | 0.5 | 25.787 | 25.559 | 0.485 | 0.289 | 0.228 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Datos del análisis inmediato por muestra y corrida de las cenizas volantes y de fondo

| Mues- -tra | Hume- dad perdida (%) | Materia Volátil (%Mv) | Ceniza (%Cz) | Carbon o Fijo (%Cfx) | Mues- -tra | Hume- dad perdida (%) | Materia Volátil (%Mv) | Ceniza (%Cz) | Carbon o Fijo (%Cfx) |
|---------------|--------------------------------|-----------------------------|-----------------|----------------------------|---------------|--------------------------------|-----------------------------|-----------------|----------------------------|
| CV1 | 2.788 | 21.997 | 7.709 | 67.505 | CF1 | 3.160 | 26.064 | 7.370 | 63.406 |
| CV2 | 2.976 | 21.712 | 8.239 | 67.073 | CF2 | 3.170 | 25.648 | 7.489 | 63.693 |
| CV3 | 2.928 | 22.230 | 7.972 | 66.869 | CF3 | 3.157 | 25.215 | 7.609 | 64.019 |
| CV4 | 2.774 | 22.210 | 7.578 | 67.438 | CF4 | 3.140 | 25.630 | 7.429 | 63.801 |
| CV5 | 2.520 | 22.040 | 6.968 | 68.472 | CF5 | 3.195 | 25.699 | 7.545 | 63.561 |
| CV6 | 2.580 | 22.610 | 6.955 | 67.855 | CF6 | 3.098 | 25.651 | 7.331 | 63.920 |
| CV7 | 2.928 | 23.630 | 7.536 | 65.906 | CF7 | 3.038 | 25.881 | 7.140 | 63.941 |
| CV8 | 2.774 | 22.410 | 7.515 | 67.300 | CF8 | 3.094 | 25.553 | 7.349 | 64.003 |
| CV9 | 2.774 | 22.210 | 7.578 | 67.438 | CF9 | 3.004 | 25.865 | 7.069 | 64.063 |
| CV10 | 2.540 | 20.597 | 7.474 | 69.389 | CF10 | 3.052 | 25.374 | 7.303 | 64.271 |
| CV11 | 2.500 | 20.850 | 7.282 | 69.368 | CF11 | 3.020 | 25.657 | 7.158 | 64.165 |
| CV12 | 2.926 | 22.831 | 7.774 | 66.469 | CF12 | 3.098 | 25.618 | 7.340 | 63.944 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Promedio de los análisis inmediatos para las cenizas volantes**

| Corrida | Humedad (%) | Cenizas (%) | M. Volátil (%) | Carbono Fijo (%) |
|-----------------|--------------------|--------------------|-----------------------|-------------------------|
| 1 | 2.88 | 7.97 | 21.85 | 67.29 |
| 2 | 2.85 | 7.78 | 22.22 | 67.15 |
| 3 | 2.55 | 6.96 | 22.32 | 68.16 |
| 4 | 2.85 | 7.53 | 23.02 | 66.6 |
| 5 | 2.66 | 7.53 | 21.4 | 68.41 |
| 6 | 2.71 | 7.53 | 21.84 | 67.92 |
| Promedio | 2.75 | 7.55 | 22.11 | 67.59 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Promedio de los análisis inmediatos para las cenizas de fondo**

| Corrida | Humedad (%) | Cenizas (%) | M. Volátil (%) | Carbono Fijo (%) |
|-----------------|--------------------|--------------------|-----------------------|-------------------------|
| 1 | 3.16 | 7.43 | 25.86 | 63.55 |
| 2 | 3.15 | 7.52 | 25.42 | 63.91 |
| 3 | 3.15 | 7.44 | 25.68 | 63.74 |
| 4 | 3.07 | 7.24 | 25.72 | 63.97 |
| 5 | 3.03 | 7.19 | 25.62 | 64.17 |
| 6 | 3.06 | 7.25 | 25.64 | 64.05 |
| Promedio | 3.10 | 7.34 | 25.65 | 63.90 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. **Datos de cálculo para análisis de pérdidas por calcinación (LOI) para las cenizas volantes**

| Semana | Muestra | Tara Crisol (g) | Peso inicial (g) | Tara + Peso inicial muestra (g) | Tara + muestra 105°C (g) | Tara + muestra (105°C) y calcinada (900°C) (g) | LOI (%) |
|--------|---------|-----------------|------------------|---------------------------------|--------------------------|--|---------|
| 1 | CV1 | 24.759 | 0.503 | 25.262 | 24.9451 | 24.9279 | 9.25 |
| | CV2 | 24.916 | 0.500 | 25.416 | 25.1010 | 25.0841 | 9.14 |
| 2 | CV3 | 12.362 | 0.502 | 12.864 | 12.5477 | 12.5307 | 9.17 |
| | CV4 | 11.293 | 0.501 | 11.794 | 11.4784 | 11.4614 | 9.15 |
| 3 | CV5 | 24.651 | 0.500 | 25.151 | 24.8360 | 24.8191 | 9.14 |
| | CV6 | 24.876 | 0.500 | 25.376 | 25.0610 | 25.0440 | 9.19 |
| 4 | CV7 | 12.332 | 0.502 | 12.834 | 12.5177 | 12.5007 | 9.17 |
| | CV8 | 11.257 | 0.501 | 11.758 | 11.4424 | 11.4254 | 9.17 |
| 5 | CV9 | 17.230 | 0.501 | 17.731 | 17.4154 | 17.3984 | 9.15 |
| | CV10 | 18.911 | 0.500 | 19.411 | 19.0960 | 19.0790 | 9.19 |
| 6 | CV11 | 12.218 | 0.500 | 12.718 | 12.4030 | 12.3859 | 9.24 |
| | CV12 | 11.214 | 0.502 | 11.716 | 11.3997 | 11.3828 | 9.12 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. **Datos de cálculo para análisis de pérdidas por calcinación (LOI) para las cenizas de fondo**

| Semana | Muestra | Tara Crisol (g) | Peso inicial (g) | Tara + Peso inicial muestra (g) | Tara + muestra 105°C (g) | Tara + muestra (105°C) y calcinada (900°C) (g) | LOI (%) |
|--------|---------|-----------------|------------------|---------------------------------|--------------------------|--|---------|
| 1 | BA1 | 35.112 | 0.501 | 35.613 | 35.3847 | 35.3600 | 9.05 |
| | BA2 | 24.624 | 0.500 | 25.124 | 24.8963 | 24.8716 | 9.08 |
| 2 | BA3 | 24.733 | 0.502 | 25.235 | 25.2010 | 25.1588 | 9.02 |
| | BA4 | 25.789 | 0.500 | 26.289 | 26.0610 | 26.0362 | 9.12 |
| 3 | BA5 | 35.131 | 0.501 | 35.632 | 35.4040 | 35.3792 | 9.08 |
| | BA6 | 24.644 | 0.500 | 25.144 | 24.9160 | 24.8914 | 9.04 |
| 4 | BA7 | 24.650 | 0.500 | 25.150 | 24.9240 | 24.8990 | 9.12 |
| | BA8 | 25.711 | 0.500 | 26.211 | 25.9820 | 25.9576 | 9.00 |
| 5 | BA9 | 35.117 | 0.500 | 35.617 | 35.3907 | 35.3659 | 9.05 |
| | BA10 | 24.805 | 0.500 | 25.305 | 25.0740 | 25.0497 | 9.03 |

Continuación apéndice 7.

| | | | | | | | |
|---|------|--------|-------|--------|---------|---------|------|
| 6 | BA11 | 24.679 | 0.500 | 25.179 | 24.9507 | 24.9260 | 9.08 |
| | BA12 | 25.287 | 0.500 | 25.787 | 25.5587 | 25.5341 | 9.04 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. **Valores promedio para las pérdidas por calcinación (LOI) para las cenizas volantes y de fondo**

| Ceniza / corrida | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | Promedio |
|------------------|------|------|------|------|------|------|-------------|
| Volante | 9.19 | 9.16 | 9.16 | 9.17 | 9.17 | 9.18 | 9.17 |
| de Fondo | 9.06 | 9.07 | 9.06 | 9.06 | 9.04 | 9.06 | 9.06 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. **Porcentaje de óxidos mayoritarios en las cenizas volantes**

| Tipo de Ceniza | Corrida | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO |
|----------------|-----------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------|-------------|
| Volante | 1 | 52.09 | 23.84 | 8.14 | 2.34 | 1.35 |
| | 2 | 52.37 | 23.68 | 8.30 | 2.19 | 1.44 |
| | 3 | 52.14 | 22.50 | 8.33 | 2.27 | 1.37 |
| | 4 | 53.56 | 23.48 | 8.69 | 2.30 | 1.40 |
| | 5 | 53.61 | 23.54 | 8.43 | 2.24 | 1.44 |
| | 6 | 54.15 | 22.34 | 8.06 | 2.31 | 1.40 |
| | Promedio | | 52.99 | 23.23 | 8.32 | 2.28 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. **Porcentaje de óxidos mayoritarios en las cenizas de fondo**

| Tipo de Ceniza | Corrida | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO |
|-----------------|---------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------|-------------|
| de Fondo | 1 | 51.80 | 22.58 | 8.05 | 2.63 | 1.98 |
| | 2 | 52.33 | 23.57 | 8.18 | 2.40 | 1.91 |
| | 3 | 51.72 | 22.32 | 8.03 | 2.84 | 1.43 |
| | 4 | 51.46 | 23.74 | 8.03 | 2.70 | 1.87 |
| | 5 | 52.34 | 23.1 | 8.15 | 2.85 | 1.65 |
| | 6 | 51.86 | 23.18 | 8.13 | 2.48 | 1.84 |
| Promedio | | 51.92 | 23.08 | 8.09 | 2.65 | 1.78 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. **Sumatoria de óxidos principales por tipo de ceniza**

| Corrida | Ceniza Volante | Ceniza de Fondo |
|--|----------------|-----------------|
| 1 | 84.08 | 82.43 |
| 2 | 84.35 | 84.08 |
| 3 | 82.97 | 82.07 |
| 4 | 85.73 | 83.22 |
| 5 | 85.59 | 83.59 |
| 6 | 84.55 | 83.17 |
| SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ | 84.54 | 83.09 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 12. **Tratamiento estadístico al análisis inmediato de las cenizas volantes**

| | Humedad perdida (%) | Materia Volátil (Mv) | Cenizas (Cz) | Carbono Fijo (Cfx) |
|--------------|---------------------|----------------------|--------------|--------------------|
| Media | 2.75 | 22.11 | 7.55 | 67.59 |
| Error típico | 0.05 | 0.23 | 0.11 | 0.300 |

Continuación apéndice 12.

| | | | | |
|----------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Mediana | 2.77 | 22.21 | 7.56 | 67.44 |
| Desviación estándar | 0.18 | 0.81 | 0.37 | 1.060 |
| Varianza | 0.03 | 0.66 | 0.14 | 1.110 |
| Rango | 0.48 | 3.03 | 1.28 | 3.480 |
| Mínimo | 2.50 | 20.60 | 6.95 | 65.910 |
| Máximo | 2.98 | 23.63 | 8.24 | 69.390 |
| Suma | 33.01 | 265.33 | 90.58 | 811.080 |
| Cuenta | 12 | 12 | 12 | 12 |
| Coefficiente de Variación | 6.37 % | 3.67 % | 4.90 % | 1.56 % |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 13. Tratamiento estadístico al análisis inmediato de las cenizas de fondo

| | Humedad perdida (%) | Materia Volátil (Mv) | Cenizas (Cz) | Carbono Fijo (Cfx) |
|----------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| Media | 3.10 | 25.65 | 7.34 | 63.90 |
| Error típico | 0.02 | 0.06 | 0.05 | 0.07 |
| Mediana | 3.10 | 25.65 | 7.34 | 63.94 |
| Desviación estándar | 0.06 | 0.22 | 0.16 | 0.25 |
| Varianza | 0.00 | 0.05 | 0.03 | 0.06 |
| Rango | 0.19 | 0.85 | 0.54 | 0.86 |
| Mínimo | 3.00 | 25.22 | 7.07 | 63.41 |
| Máximo | 3.20 | 26.06 | 7.61 | 64.27 |
| Suma | 37.23 | 307.85 | 88.13 | 766.79 |
| Coefficiente de Variación | 2.04 % | 0.87 % | 2.22 % | 0.39 % |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 14. **Tratamiento estadístico al análisis químico de las cenizas volantes**

| | SiO₂ | Al₂O₃ | Fe₂O₃ | CaO | MgO |
|----------------------------------|------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------|---------------|
| Media | 52.99 | 23.23 | 8.32 | 2.28 | 1.40 |
| Error típico | 0.36 | 0.26 | 0.09 | 0.02 | 0.02 |
| Mediana | 52.97 | 23.51 | 8.31 | 2.28 | 1.40 |
| Desviación estándar | 0.89 | 0.64 | 0.22 | 0.05 | 0.04 |
| Varianza | 0.79 | 0.41 | 0.05 | 0.00 | 0.00 |
| Rango | 2.06 | 1.50 | 0.63 | 0.15 | 0.09 |
| Mínimo | 52.09 | 22.34 | 8.06 | 2.19 | 1.35 |
| Máximo | 54.15 | 23.84 | 8.69 | 2.34 | 1.44 |
| Suma | 317.93 | 139.39 | 49.95 | 13.65 | 8.40 |
| Coefficiente de Variación | 1.68 % | 2.76 % | 2.67 % | 2.37 % | 2.63 % |

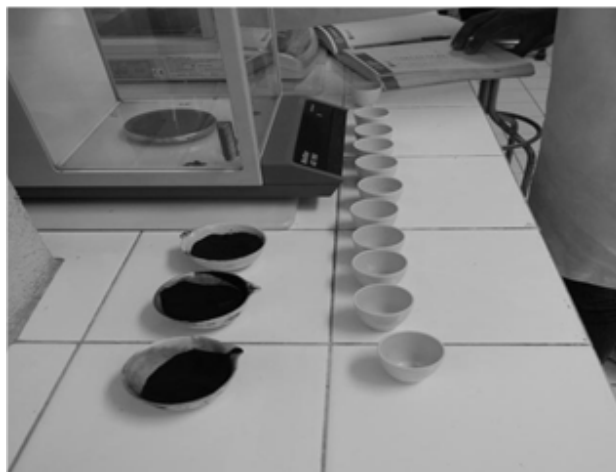
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 15. **Tratamiento estadístico al análisis químico de las cenizas de fondo**

| | SiO₂ | Al₂O₃ | Fe₂O₃ | CaO | MgO |
|----------------------------------|------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------|----------------|
| Media | 51.92 | 23.08 | 8.09 | 2.65 | 1.78 |
| Error típico | 0.14 | 0.22 | 0.03 | 0.08 | 0.08 |
| Mediana | 51.83 | 23.14 | 8.09 | 2.66 | 1.85 |
| Desviación estándar | 0.35 | 0.55 | 0.07 | 0.18 | 0.20 |
| Varianza | 0.12 | 0.30 | 0.00 | 0.03 | 0.04 |
| Rango | 0.88 | 1.41 | 0.15 | 0.45 | 0.55 |
| Mínimo | 51.46 | 22.32 | 8.03 | 2.40 | 1.43 |
| Máximo | 52.34 | 23.74 | 8.18 | 2.85 | 1.98 |
| Suma | 311.51 | 138.49 | 48.55 | 15.89 | 10.68 |
| Coefficiente de Variación | 0.68 % | 2.37 % | 0.82 % | 6.97 % | 11.48 % |

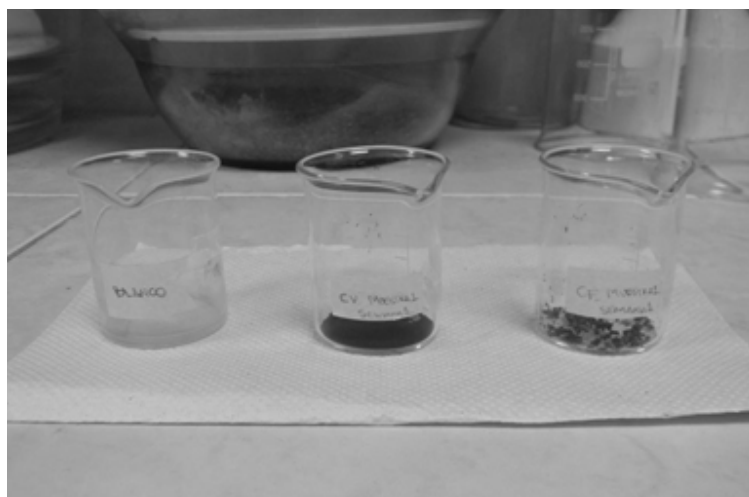
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 16. Preparación y tara de muestras



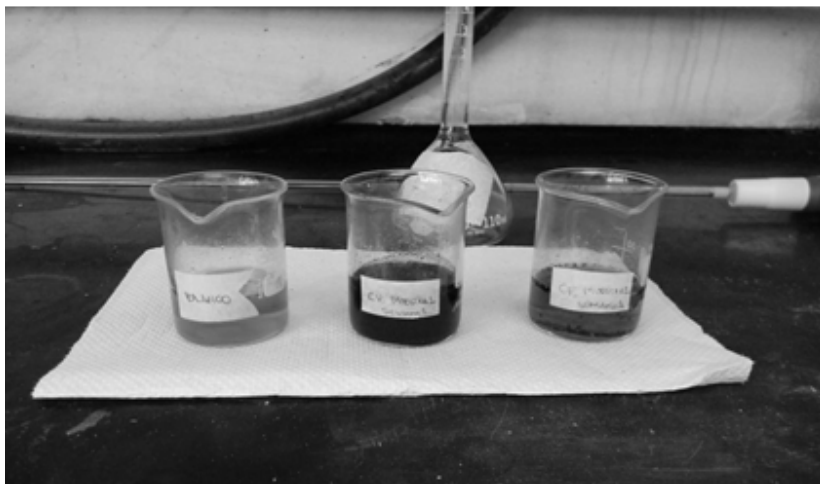
Fuente: elaboración propia. Tomada en el Laboratorio de química industrial de la facultad de Ingeniería, USAC, 2014.

Apéndice 17. Preparación análisis químico



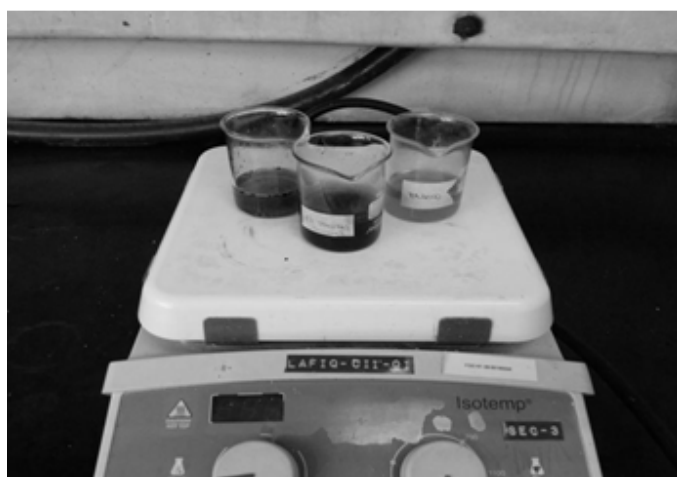
Fuente: elaboración propia. Tomada en el Laboratorio de química industrial de la facultad de Ingeniería, USAC, 2014.

Apéndice 18. Digestión de óxidos mayoritarios



Fuente: elaboración propia. Tomada en el Laboratorio de química industrial de la facultad de Ingeniería, USAC, 2014.

Apéndice 19. Ebulliciones en análisis químico



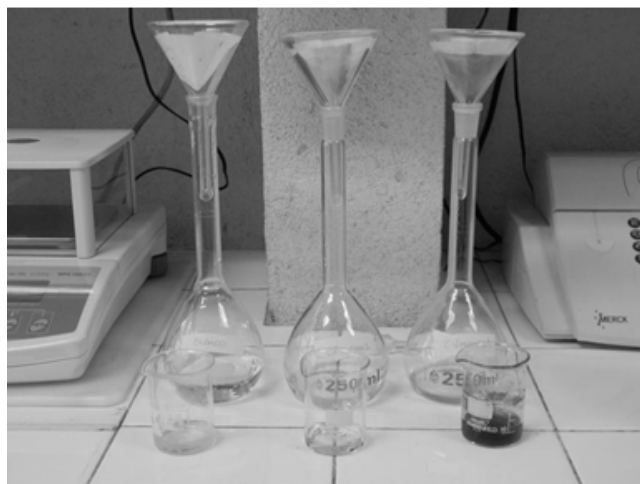
Fuente: elaboración propia. Tomada en el Laboratorio de química industrial de la facultad de Ingeniería, USAC, 2014.

Apéndice 20. **Calcinaciones**



Fuente: elaboración propia. Tomada en el Laboratorio de química industrial de la facultad de Ingeniería, USAC, 2014.

Apéndice 21. **Proceso para determinación de pérdidas por calcinación**



Fuente: elaboración propia. Tomada en el Laboratorio de química industrial de la facultad de Ingeniería, USAC, 2014.

ANEXOS

Anexo 1. Utilización de CCPs en Europa, 2008

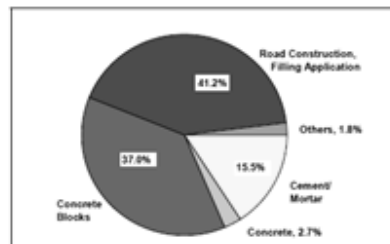


Figure A1:
Utilisation of Bottom Ash in the Construction Industry and Underground Mining in Europe (EU 15) in 2008.
Total utilisation 2.4 million tonnes.

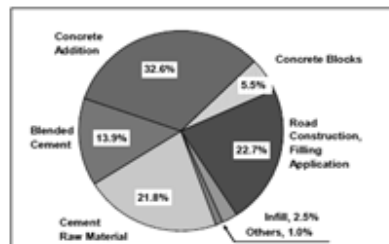


Figure A2:
Utilisation of Fly Ash in the Construction Industry and Underground Mining in Europe (EU 15) in 2008.
Total utilisation 17.7 million tonnes.

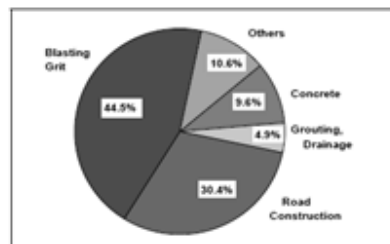


Figure A3:
Utilisation of Boiler Slag in the Construction Industry and as Blasting Grid in Europe (EU 15) in 2008.
Total utilisation 1.4 million tonnes.

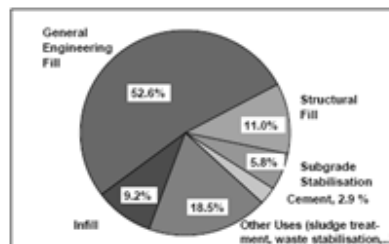


Figure A4:
Utilisation of FBC Ash in the Construction Industry and Underground Mining in Europe (EU 15) in 2008.
Total utilisation 0.2 million tonnes.

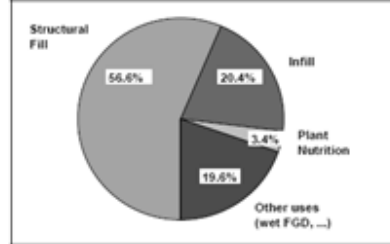


Figure A5:
Utilisation of SDA-Product in the Construction Industry and Underground Mining in Europe (EU 15) in 2008.
Total utilisation 0.3 million tonnes.

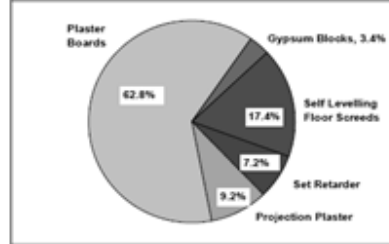
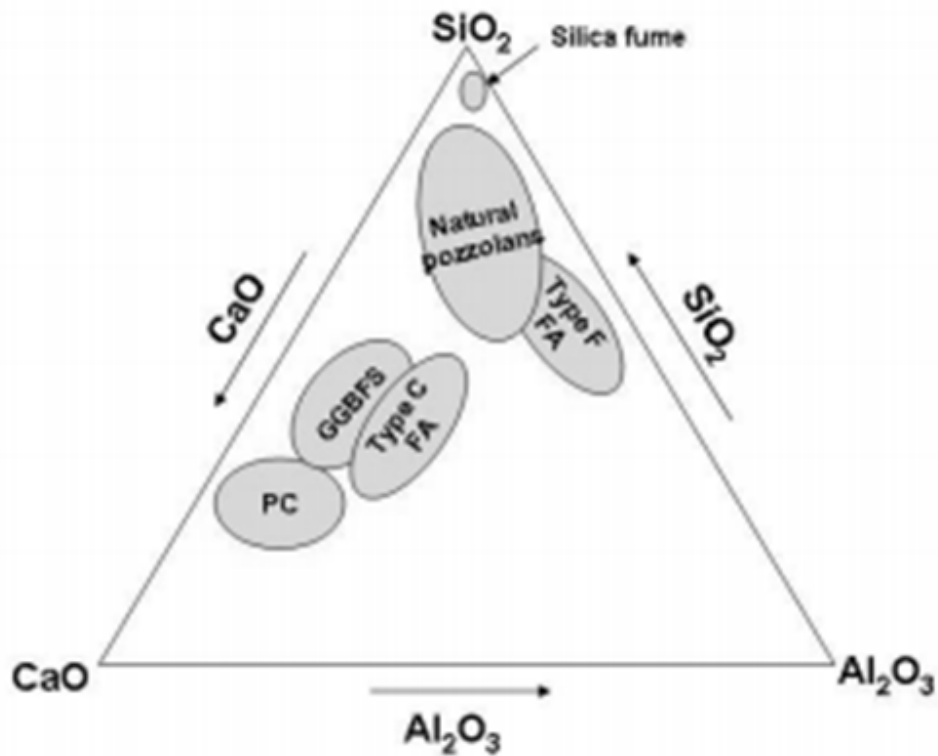


Figure A6:
Utilisation of FGD gypsum in the Construction Industry in Europe (EU 15) in 2008.
Total utilisation 8.8 million tonnes.

Fuente: (ECOBA_EURELECTRIC, 2011).

Anexo 2. Diagrama ternario para compuestos puzolánicos



PC (cemento Portland), GGBFS (escoria granular de horno), Type F FA (ceniza volante clase F), Type C FA (ceniza volante clase C) y Natural pozzolans (material puzolánico).

Fuente: Simposio de habilitación profesional, Depto. De Ingeniería Civil. Universidad Católica de Chile. Recuperado de:

<http://repositoriodigital.ucsc.cl/bitstream/handle/25022009/1310/Mauricio%20Mu%C3%B1oz%20Adams.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.