

**EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL CARBÓN  
DE SUMINISTRO Y CONSUMO EN LA TERMOÉLECTRICA  
TERMOTASAJERO S.A**



**termotasajero**  
colgener

**JORGE LEONEL ABRIL FLÓREZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2014**

**EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL CARBÓN  
DE SUMINISTRO Y CONSUMO EN LA TERMOÉLECTRICA  
TERMOTASAJERO S.A**

**JORGE LEONEL ABRIL FLÓREZ**

**Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico**

**Director:**

**Ph.D. VIVIANA SANCHEZ TORRES**

**Ingeniera Química**

**Codirector:**

**Ing. JUAN JAIME BARBOSA**

**Ingeniero de Sistemas**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2014**

## **DEDICATORIA**

Este trabajo lo dedico primeramente a Dios; porque tengo la plena convicción de que cualquier acción que realice en mi vida está diseñada y guiada por él.

A mis padres Marleni Florez y Emiliano Abril por tener siempre la posición de dedicar el tiempo necesario a mi formación espiritual y profesional, por ser el pilar más importante en todo lo que he construido hasta hoy y por ser la voz de aliento en cada momento difícil.

A mi tía Nelly por ser mi segunda madre, a mi tía Carmen y mi tía Gladis por la compañía y apoyo brindado. A mis primos por el respaldo en los buenos y no tan buenos momentos de todo este proceso.

A Pilar y Tatiana por ser mis compañeras y amigas de principio a fin en este camino en el cual compartimos el mismo objetivo, el de ser Ingenieros llenos de valores espirituales y profesionales.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la universidad Industrial de Santander por ser la morada de grandes vivencias de las cuales he tomado lo positivo para ser quien soy, hoy en día.

A todos los profesores de la escuela de Ingeniería Química y en especial a la profesora Viviana Sánchez por la disposición brindada para la ejecución de este trabajo.

A Termotasajero S.A por permitirme vivir una de las experiencias más enriquecedoras.

Al Ingeniero Juan Jaime Barbosa por ser el gran maestro durante el proceso de práctica.

A los compañeros de trabajo en la empresa por la buena actitud y el tiempo dedicado.

## TABLA DE CONTENIDO

	pág.
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>14</b>
<b>1. GENERALIDADES DE LA EMPRESA</b> .....	<b>15</b>
<b>1.1. DESCRIPCIÓN GENERAL</b> .....	<b>15</b>
<b>1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA</b> .....	<b>15</b>
<b>1.3. OBJETIVOS</b> .....	<b>16</b>
<b>2. FUNDAMENTO TEÓRICO</b> .....	<b>18</b>
<b>2.1. OXIDACIÓN Y COMBUSTIÓN ESPONTÁNEA</b> .....	<b>18</b>
<b>2.2. CONDICIONES IDEALES PARA EL ALMACENAMIENTO DE CARBÓN EN PATIOS DE ACOPIO</b> .....	<b>19</b>
<b>3. METODOLOGÍA</b> .....	<b>21</b>
<b>3.1. IDENTIFICACIÓN DE LAS CONDICIONES ACTUALES DE LAS PILAS DE CARBÓN EN EL PATIO DE ALMACENAMIENTO:</b> .....	<b>21</b>
<b>3.2. PROCESO DE MUESTREO Y PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS DEL CARBÓN DE SUMINISTRO Y CONSUMO PARA SU ANÁLISIS EN EL LABORATORIO:</b> .....	<b>21</b>
<b>3.3. ANÁLISIS PRÓXIMO DEL CARBÓN DE SUMINISTRO (CARBÓN QUE INGRESA AL PATIO DE ALMACENAMIENTO) Y CARBÓN DE CONSUMO (CARBÓN QUE SE ESTÁ ALIMENTANDO AL PROCESO)</b> .....	<b>23</b>
<b>3.3.1 Análisis de humedad residual, cenizas, materia volátil, combustible y carbono fijo.</b> .....	<b>23</b>
<b>3.3.2 Análisis de azufre total (método infrarrojo).</b> .....	<b>24</b>
<b>3.3.3 Análisis de poder calorífico</b> .....	<b>24</b>
<b>3.4. IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA ALTERNATIVA A UTILIZAR PARA MINIMIZAR LAS PÉRDIDAS ECONÓMICAS Y DE CALIDAD DEL CARBÓN</b> .....	<b>24</b>
<b>3.4.1. Proporción de la mezcla ceniza volátil-agua.</b> .....	<b>25</b>

3.4.2. Formación de las pilas de prueba.....	25
<b>4. RESULTADOS .....</b>	<b>27</b>
<b>4.1. CONDICIONES ACTUALES DE LAS PILAS DE CARBON EN EL PATIO DE ALMACENAMIENTO .....</b>	<b>27</b>
<b>4.2. ANÁLISIS PRÓXIMO DEL CARBÓN DE SUMINISTRO Y CONSUMO .....</b>	<b>29</b>
<b>4.3 DESARROLLO DE LA ALTERNATIVA.....</b>	<b>31</b>
4.3.1 Proporción de la mezcla ceniza volátil-agua .....	31
4.3.2 Formación de las pilas de prueba.....	32
4.3.3. Seguimiento térmico .....	33
4.3.4. Seguimiento de calidad .....	34
4.3.5. Pérdidas por arrastre de viento y lluvia .....	35
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>37</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>38</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>39</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>40</b>

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Pérdidas durante el almacenamiento del carbón.....	16
Figura 2. Mapa de distribución de los tubos de PVC en la pila. ....	26
Figura 3. Patio de almacenamiento de carbón.....	27
Figura 4. Aumento del ángulo de talud en la pila de consumo.....	28
Figura 5. Lixiviados por desnivel en el patio.....	28
Figura 6. Barreras artificiales y naturales del patio de almacenamiento .....	28
Figura 7. Pila de consumo supera la altura de las barreras artificiales y naturales.....	28
Figura 8. Proporción en peso del recubrimiento .....	31
Figura 9. Esfuerzo aplicado al recubrimiento.....	32
Figura 10. Pilas de seguimiento térmico. ....	32
Figura 11. Montaje de las pilas de prueba de pérdidas de arrastre.....	33
Figura 12. Seguimiento Térmico.....	33
Figura 13. Variación del Poder Calorífico .....	34
Figura 14. Variación del %CF.....	35

## LISTA DE TABLAS

pág.

<b>Tabla 1. Resultados finales del análisis próximo del carbón de suministro ..</b>	<b>29</b>
<b>Tabla 2. Resultados finales del análisis próximo del carbón de consumo.....</b>	<b>29</b>
<b>Tabla 3. Diferencias del carbón de suministro y consumo .....</b>	<b>30</b>
<b>Tabla 4. Toneladas de carbono fijo perdido por oxidación.....</b>	<b>30</b>
<b>Tabla 5. Pérdidas por almacenamiento.....</b>	<b>31</b>
<b>Tabla 6. Pérdidas por arrastre de lluvia y viento.....</b>	<b>35</b>

## LISTA DE ANEXOS

	<b>pág.</b>
<b>ANEXO A.</b> Clasificación del carbón.....	38
<b>ANEXO B.</b> Equipos de laboratorio.....	40
<b>ANEXO C.</b> Preparación de las pilas de prueba.....	42
<b>ANEXO D.</b> Tablas experimentales.....	44

## RESUMEN

**TITULO: EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL CARBÓN DE SUMINISTRO Y CONSUMO EN LA TERMOÉLECTRICA TERMOTASAJERO S.A.\***

**AUTORES:** ABRIL FLÓREZ Jorge Leonel\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Oxidación, combustión espontánea, ceniza volátil, carbón.

### DESCRIPCIÓN

El almacenamiento del carbón en las centrales eléctricas se realiza en grandes cantidades y durante periodos largos de tiempo debido a su uso industrial. Por lo general el almacenamiento se lleva a cabo en patios de acopio donde el carbón es expuesto a inclemencias meteorológicas, influyendo en las propiedades fisicoquímicas de este combustible por causa de la oxidación, autocombustión y el arrastre causado por las lluvias y el viento. De esta manera en TERMOTASAJERO S.A la variación de las propiedades físicas y químicas del carbón es una problemática que se refleja en pérdidas económicas.

Por lo tanto esta investigación se centra en el cálculo de las pérdidas económicas que se presenta en una pila de carbón por el almacenamiento; y en una alternativa para disminuirlas; esta propuesta consiste en observar la efectividad de la aplicación de un recubrimiento de una mezcla ceniza volátil-agua, a unas pilas de estudio a las que se les realizó un seguimiento térmico, de calidad y de peso para comparar la variación que se presenta con pilas que no contienen el recubrimiento.

Al finalizar el estudio se determinó que las pérdidas económicas para la empresa por el almacenamiento del carbón son considerables; resultando la aplicación del recubrimiento, una medida positiva para disminuir estas pérdidas.

---

\*Proyecto de grado

\*\*Facultad de ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director Dr. Viviana Sánchez Torres, Co-Director Juan Jaime Barbosa Ingeniero Jefe departamento Químico, TERMOTASAJERO S.A.

## SUMMARY

**TITLE: EVALUATION OF PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF COAL STOCK PILES AT TERMOTASAJERO S.A. THERMAL POWER STATION\***

**AUTHORS:** ABRIL FLÓREZ Jorge Leonel\*\*

**KEYWORDS:** Oxidation, spontaneous combustion, fly ash, coal.

### ABSTRACT

At thermal power stations, coal is stored in large quantities and during long periods of time due to its industrial use. In general the storage is carried out in stockpiles where coal is exposed to weather, altering the physicochemical properties of this fuel because of the oxidation, auto-combustion and the dragging caused by rains and wind. Therefore, at TERMOTASAJERO S.A. the variation of the physical and chemical properties of coal is an issue that is reflected in economic losses.

Therefore in this project the economic losses due to coal storage were estimated. As an alternative to reduce coal losses during storage, a coat of a mixture of fly ash and water was applied to coal stockpiles; the thermal properties, and coal quality and weight were measured to evaluate the efficacy of this method compared to an uncoated stockpile.

It was found that the company has large economic losses due to coal storage, and that the application of the fly ash coat may have a positive effect on the reduction of the economic losses.

---

\*Degree Project

\*\*Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director Dr. Viviana Sánchez Torres, Co-Director Juan Jaime Barbosa Chief Engineer at chemical department, TERMOTASAJERO S.A.

## INTRODUCCIÓN

El carbón es uno de los combustibles fósiles primarios adoptados en las plantas de energía, se trata de un combustible sólido y almacenable; por consiguiente, el carbón normalmente se almacena durante mucho tiempo en un patio de acopio de carbón antes de que se transfiera al horno para la combustión. De esta manera se forman pilas de carbón convencionales de gran escala almacenadas durante varios meses expuestas a los eventos climáticos de la zona.

En Termotasajero S.A el carbón es almacenado en un patio que se encuentra distribuido para formar dos pilas, una pila de consumo y otra de formación. El tiempo que transcurre en el proceso de formación y consumo de cada una de las pilas es de aproximadamente 6 meses; tiempo en el que el carbón permanece expuesto a las condiciones ambientales de la zona, el cual es suficiente para que se presente una variación en la propiedades fisicoquímicas del carbón que se ve reflejada en pérdidas económicas para la empresa.

Esta práctica se enfocó en identificar las pérdidas en las propiedades fisicoquímicas del carbón que se trata en Termotasajero S.A y la estimación de las correspondientes pérdidas económicas; también se realizó la evaluación de una alternativa para dar solución a este problema consistente en la aplicación de un recubrimiento de una mezcla agua-ceniza sobre una pila de prueba para determinar su efecto en la variación de las propiedades fisicoquímicas del carbón durante el almacenamiento.

## **1. GENERALIDADES DE LA EMPRESA**

### **1.1. DESCRIPCIÓN GENERAL**

Termotasajero S.A es una empresa de generación y comercialización de energía eléctrica con una capacidad de 163 MW, ubicada en el departamento de Norte de Santander, aproximadamente a 30 km. al sur-occidente de la ciudad de Cúcuta, sobre la margen derecha del río Zulia, en jurisdicción del municipio de San Cayetano y en un lote situado a una altura aproximada de 260 m. sobre el nivel del mar. El carbón es el combustible primario de la central, su consumo anual varía dependiendo de la disponibilidad de energía hidráulica y de la demanda general dentro del área de servicio. La central utiliza carbón bituminoso pulverizado, el cual es almacenado en un área de 2.84 hectáreas, donde se alcanza a mantener una cantidad suficiente que permite su operación a máxima carga por un período de 60 días. El carbón es suministrado desde pequeñas y medianas minas (75 minas aproximadamente), localizadas en un radio de 40 km respecto a la central y transportado hasta ella en volquetas. La calidad del carbón de Norte de Santander está catalogada como superior al promedio, por sus bajos niveles de ceniza y azufre.

### **1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

En Termotasajero S.A el carbón se almacena en un patio de acopio en forma de pilas convencionales de gran escala, la zona de almacenamiento se encuentra distribuida para formar dos pilas, una de consumo y una de formación; teniendo así una capacidad de almacenamiento de 250000 toneladas de carbón. Cuando una de las dos pilas se está formando, la otra se está consumiendo durando así aproximadamente 6 meses cada pila en el patio de almacenamiento. Durante estos 6 meses el carbón está expuesto a las condiciones atmosféricas y empieza a oxidarse por el oxígeno presente en el aire; llevando en algunos puntos de la pila

hasta la ignición espontánea (Figura 1a). La exposición del carbón a condiciones atmosféricas prevalecientes (humedad y temperatura) causa un deterioro en su calidad, su valor económico y genera pérdidas por arrastre del viento (Figura 1b) y la lluvia. Debido a esta problemática, se desea calcular las pérdidas de las propiedades fisicoquímicas del carbón y reflejarlas en un valor económico, así mismo presentar la evaluación de una alternativa para reducir estas pérdidas en el carbón.

**Figura 1.** Pérdidas durante el almacenamiento del carbón



### **1.3. OBJETIVOS**

#### **Objetivo general**

Determinar las pérdidas de las propiedades fisicoquímicas y pérdidas por arrastre de viento y lluvia del carbón almacenado en TERMOTASAJERO S.A y evaluar una alternativa para la reducción de éstas.

#### **Objetivos específicos**

- Calcular la variación del porcentaje de ceniza, materia volátil, carbono fijo, azufre, y el poder calorífico que presenta el carbón durante el tiempo que permanece en el patio de almacenamiento.
- Evaluar la efectividad de la aplicación de un recubrimiento de una mezcla ceniza-agua, para reducir las pérdidas que se presentan en las propiedades fisicoquímicas del carbón durante el tiempo de almacenamiento.

## 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

### 2.1. OXIDACIÓN Y COMBUSTIÓN ESPONTÁNEA

La oxidación a baja temperatura del carbón en patios de almacenamiento conduce a cambios no deseados en las propiedades térmicas de este combustible y en ocasiones se llega hasta la combustión espontánea, generando daños y pérdidas financieras. La oxidación de carbón implica algunos fenómenos:

- El transporte de oxígeno a las superficies de las partículas de carbón (transferencia de masa por convección formando una película que rodea la partícula seguido por la transferencia de masa por difusión en la película formada) y dentro de los poros del carbón.
- La interacción química entre el carbón y el oxígeno del aire.
- La liberación de calor
- La emisión de los productos gaseosos

A parte de estas consideraciones del transporte de masa; la oxidación del carbón se ve afectada por varios factores, que se pueden clasificar como variables internas y externas. Las variables internas incluyen la composición y las propiedades físicas del carbón, la historia a la intemperie del carbón y el tamaño de partícula; las variables externas implican la temperatura, la presión parcial del oxígeno y el contenido de humedad en el aire.

- **Composición y propiedades físicas del carbón:** La influencia de la composición del carbón y su estructura en la oxidación es muy complicado y sigue siendo motivo de debate. Esto es porque tanto las propiedades físicas y químicas de un carbón juegan un papel importante en el proceso de oxidación, y dos carbones incluso del mismo rango (Anexo A) pueden exhibir diferencias significativas cuando se someten al proceso de oxidación. La tendencia establecida es que la tasa de consumo de oxígeno

por un carbón es inversamente proporcional al rango del carbón de la muestra.

- **Historia de oxidación:** un carbón degradado u oxidado consume oxígeno a un ritmo inferior al de un carbón recién extraído. Esto es consecuencia de la acumulación de los complejos oxigenados en las superficies internas de los poros del carbón, que conduce a la desactivación de los sitios de reacción responsables de la adsorción de oxígeno.
- **Tamaño de partícula:** la tasa de oxidación aumenta con una disminución en el tamaño de partícula. Esto se deduce directamente del hecho de que la oxidación a baja temperatura del carbón implica reacciones que tienen lugar en las superficies internas del carbón.
- **Temperatura:** tiene un efecto significativo en el proceso de oxidación. La tasa de consumo de oxígeno casi que se duplica por aumento de temperatura de 10°C.
- **Contenido de humedad en el medio gaseoso:** el contenido de humedad del aire tiene un impacto pronunciado en la generación de calor o consumo de calor durante la oxidación del carbón. El calor liberado por la adsorción de humedad presente en el aire se compone esencialmente de calor de condensación y calor de humectación; el primero es liberado por el vapor de agua que se condensa y el segundo es liberado por la humectación que tiene el carbón al tener contacto con el agua condensada.

## **2.2. CONDICIONES IDEALES PARA EL ALMACENAMIENTO DE CARBÓN EN PATIOS DE ACOPIO**

En la literatura se ha establecido ciertas normas para evitar la combustión espontánea de carbones almacenados, estas son:

- El terreno del patio debe estar bien nivelado, ser firme, no tener grietas y estar bien drenado.
- Cuanto menor sea la altura de las pilas menor es el peligro de combustión.

- El carbón debe estar colocado en capas, las cuales no deben exceder un espesor de 91cm y deben estar niveladas y compactadas.
- Se debe evitar la separación natural por tamaños, porque en zonas de tamaños más gruesos se establecen chimeneas que producen entradas de aire en las pilas.
- La cara de la pila que enfrenta el viento debe ser apisonada para evitar el paso del aire.
- La inclinación o talud de las pilas debe ser de 5:1 o de 4:1.

Por otra parte en la industria se encuentran productos para implementar en las pilas que ayudan a disminuir las pérdidas durante el almacenamiento; empresas como BRENNTAG COLOMBIA ofrecen productos como el *Gluon 500*; el cual es un polímero líquido que se utiliza para la protección de pilas de almacenamiento, estabilización de taludes y en zonas de movimiento de materiales para prevenir la emisión de partículas de polvo que pueden llegar a ser arrastradas por el viento.

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. IDENTIFICACIÓN DE LAS CONDICIONES ACTUALES DE LAS PILAS DE CARBÓN EN EL PATIO DE ALMACENAMIENTO:

En esta primera etapa se estudiaron las normas encontradas en la literatura, para el almacenamiento de carbón en el patio de acopio y se realizó un recorrido para identificar las variaciones que había respecto a la teoría.

#### 3.2. PROCESO DE MUESTREO Y PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS DEL CARBÓN DE SUMINISTRO Y CONSUMO PARA SU ANÁLISIS EN EL LABORATORIO:

El carbón de suministro tiene el siguiente proceso para preparar la muestra y ser llevado al laboratorio a su respectivo análisis.

- **Muestreo en el patio de acopio:** El vehículo ingresa al patio de almacenamiento y descarga. Dependiendo de la capacidad del vehículo (volqueta, doble troque o mula) el auxiliar de laboratorio hace 3,6 o 9 tomas de la pila de descarga con una pala. Estas tomas se realizan en el nivel inferior, medio y superior de la pila y se almacena en bolsas impermeables y resistentes para llevar al laboratorio.
- **Preparación de la muestra bruta:** En esta etapa diaria, se ordenan las muestras por grupos dependiendo del proveedor. Seguidamente se preparan para formar la muestra bruta, efectuando reducción a malla 4 (4.75mm) en un triturador Holmes 401 XL (Anexo B). una vez reducida la muestra, se pasa el material obtenido al divisor CG donde se homogeniza 3 veces y luego se divide para obtener un peso de 0.5, 1 o 1.5 kg aproximadamente por unidad de transporte (volqueta, doble troque o mula). Esta muestra se guarda en bolsas plásticas y herméticas para el cierre quincenal.

- **Preparación de la muestra para análisis:** Cada 15 días se hace el cierre. Este día se homogenizan todas las muestras obtenidas de cada proveedor y luego se dividen en dos muestras de 2kg; una de estas es tomada como testigo contractual y la otra para la determinación de humedad por pérdidas de secado al aire.

El carbón de consumo tiene el siguiente proceso para preparar la muestra y ser llevado al laboratorio a su respectivo análisis.

- **Preparación de la muestra representativa:** Simultáneamente cuando la banda transportadora de carbón inicia el proceso, el muestreador automático toma una muestra cada 15 minutos que se va almacenando en tolvas. Al finalizar el consumo diario de carbón; se toma la muestra cuya cantidad depende del carbón consumido diariamente por la central eléctrica. Esta muestra obtenida es llevada al laboratorio y se realiza la reducción a malla 4 (4.75mm). Luego se realiza homogenización y división de la muestra hasta obtener dos muestras de 2kg cada una. La primera se guarda como testigo contractual en una bolsa de polietileno y se guarda en el cuarto de testigos por un periodo de 30 días para conformar la muestra compuesta mensual. La segunda muestra de 2kg se utiliza para realizar el análisis de humedad por pérdidas de secado al aire.

Cuando se tiene la muestra para el análisis próximo del carbón de suministro y el carbón de consumo se lleva a cabo el siguiente procedimiento.

- **Análisis de humedad por pérdidas de secado al aire (%Hpsa)**

La muestra de 2kg se homogeniza 3 veces y se pasa por un divisor en la que cada parte dividida se coloca extendida en una bandeja identificada. En el caso del carbón de suministro, estas bandejas se trasladan al cuarto de secado; donde la temperatura está controlada entre 36 y 38°C, allí la muestra se mantiene durante 24 horas (todas las muestras se corren por

duplicado); pasado este tiempo se deja estabilizar la muestra a la temperatura ambiente, se saca y se pesa para calcular el %Hpsa. Para el carbón de consumo el %Hpsa se realiza diariamente en una estufa de secado a una temperatura de 80°C por una hora, luego es retirada y colocada en un mesón para estabilizar la muestra a temperatura ambiente. Una vez terminado este análisis las muestras de las dos bandejas se unen y se reducen a malla 8 (2.36mm) en un molino de disco (Anexo B), se homogeniza 3 veces y se divide hasta obtener 500g que se reducen a malla 60 (250µm) en un pulverizador Holmes 500 DG (Anexo B), la muestra pulverizada se homogeniza tres veces y se divide hasta obtener dos muestras de 60g cada una. Estas muestras se guardan en frascos de vidrio con tapa, con capacidad de 150g de muestra pulverizada. Una de las muestras se guarda como muestra de respaldo por un periodo de 30 días y será utilizada en caso de pérdida por ruptura del frasco. La otra será la muestra para análisis, que se coloca en el homogenizador automático (Anexo B), por un periodo de 20 minutos y luego se entrega al analista químico para realizar los análisis próximos.

### **3.3. ANÁLISIS PRÓXIMO DEL CARBÓN DE SUMINISTRO (CARBÓN QUE INGRESA AL PATIO DE ALMACENAMIENTO) Y CARBÓN DE CONSUMO (CARBÓN QUE SE ESTÁ ALIMENTANDO AL PROCESO)**

Para calcular las variaciones en las propiedades fisicoquímicas y pérdidas económicas del carbón durante su almacenamiento se trabajó con una pila real de 618179 toneladas de carbón que permaneció en el patio de acopio durante 23 meses, tiempo desde el momento en que se descargó la primera tonelada de carbón hasta que se consumió la última.

**3.3.1 Análisis de humedad residual, cenizas, materia volátil, combustible y carbono fijo.** Este análisis se lleva a cabo en el TGA-601 analizador termogravimétrico. El analizador consiste en chasis electrónico que controla el

horno y maneja múltiples datos y muestras, lo cual permite analizar 19 muestras simultáneamente.

**3.3.2 Análisis de azufre total (método infrarrojo).** En este método la muestra se quema en un tubo de combustión a una temperatura mínima de 1350 °C, en una corriente de oxígeno, para oxidar el azufre. La humedad y las partículas se eliminan del gas por medio de trampas de perclorato de magnesio anhidro; la corriente de gas pasa a través de una celda en la cual el SO<sub>2</sub> formado se mide en un detector de absorción infrarrojo. El equipo utilizado es SC-144 DR LECO.

**3.3.3 Análisis de poder calorífico.** El poder calorífico de la muestra es determinado por quemado de la muestra en ambiente controlado. El calor liberado por la combustión es proporcional al poder calorífico de la sustancia. El equipo utilizado es calorímetro isoperibólico AC-500 de LECO.

#### **3.4. IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA ALTERNATIVA A UTILIZAR PARA MINIMIZAR LAS PÉRDIDAS ECONÓMICAS Y DE CALIDAD DEL CARBÓN**

TERMOTASAJERO S.A produce anualmente 54500 toneladas de ceniza volátil. Este desecho generado durante la combustión del carbón se ha convertido en un material de gran atracción para la industria de la construcción. El bajo costo, el peso ligero y su baja conductividad térmica lo hacen apropiado para aplicaciones como bloques aislantes y como recubrimientos para protección térmica de sustratos. Basados en sus propiedades y en la facilidad de obtención, se decidió utilizar la ceniza volátil producida en la empresa para preparar una mezcla de ceniza-agua y aplicarla como recubrimiento a pilas de prueba y observar si se presenta una disminución en las pérdidas de las propiedades fisicoquímicas y pérdidas económicas del carbón durante el tiempo de almacenamiento en el patio de acopio.

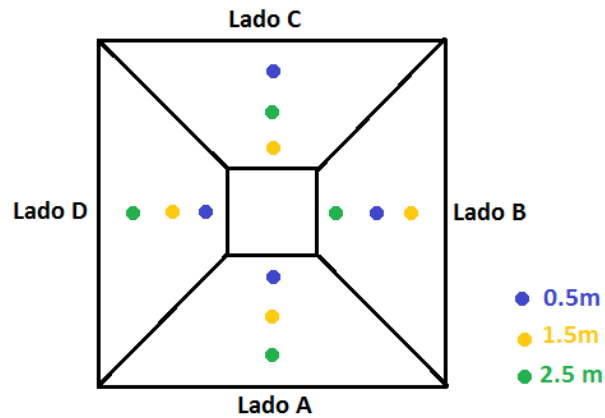
El procedimiento de la alternativa fue el siguiente:

**3.4.1. Proporción de la mezcla ceniza volátil-agua.** Para determinar la proporción de la mezcla ceniza-agua a utilizar, se realizaron tres mezclas de prueba a diferentes proporciones de ceniza y agua; 1:1, 1:2 y 1:3 fueron las proporciones en peso que se estudiaron. Las 3 mezclas se aplicaron al carbón y se observó su comportamiento de adhesión y sensibilidad a cualquier esfuerzo aplicado

**3.4.2. Formación de las pilas de prueba.** Se formaron 4 pilas de prueba, el carbón que contienen estas pilas es de un mismo proveedor de TERMOTASAJERO S.A para partir de unas mismas propiedades fisicoquímicas. A dos de estas 4 pilas se le realizó un seguimiento térmico y de calidad; y a las dos pilas restantes se le realizó un seguimiento del arrastre de lluvia y viento.

**3.4.2.1 Seguimiento térmico y de calidad.** Para este estudio se formaron dos pilas de 100 toneladas c/u. La geometría de estas pilas es de una pirámide cuadrangular truncada. A una de estas pilas se le aplicó la suspensión ceniza-agua y a otra no para comparar el comportamiento de la temperatura interna de las pilas y la calidad; tubos de PVC de 0.5, 1.5, y 2.5 metros de longitud se posicionaron en cada una de las caras de las pilas a 3 diferentes niveles de altura, de manera que quedara distribuidos los puntos de muestra en la totalidad de la pila, y así poder introducir una termocupla y registrar diariamente la temperatura en esos puntos; los tubos de PVC a excepción del momento en que se toma la temperatura, fueron tapados para evitar la entrada de aire a la pila (Anexo C). En la Figura 2 se visualiza un mapa de la pila con la ubicación de los tubos de PVC. A parte del seguimiento térmico, a estas pilas de prueba se le realizó un seguimiento de la calidad. Durante el tiempo de prueba, cada 15 días se tomaron muestras de carbón a las pilas A y B para realizar el análisis próximo y reportar la variación en las propiedades, con el fin de comparar estos resultados y determinar el efecto de la aplicación del recubrimiento en las pérdidas por oxidación del carbón durante el almacenamiento en el patio de acopio.

**Figura 2.** Mapa de distribución de los tubos de PVC en la pila.



Estas dos pilas se ubicaron en el patio de almacenamiento y fueron formadas y compactadas por el Coal Dozer de la empresa. La Pila A no tiene recubrimiento y la Pila B tiene el recubrimiento ceniza-agua.

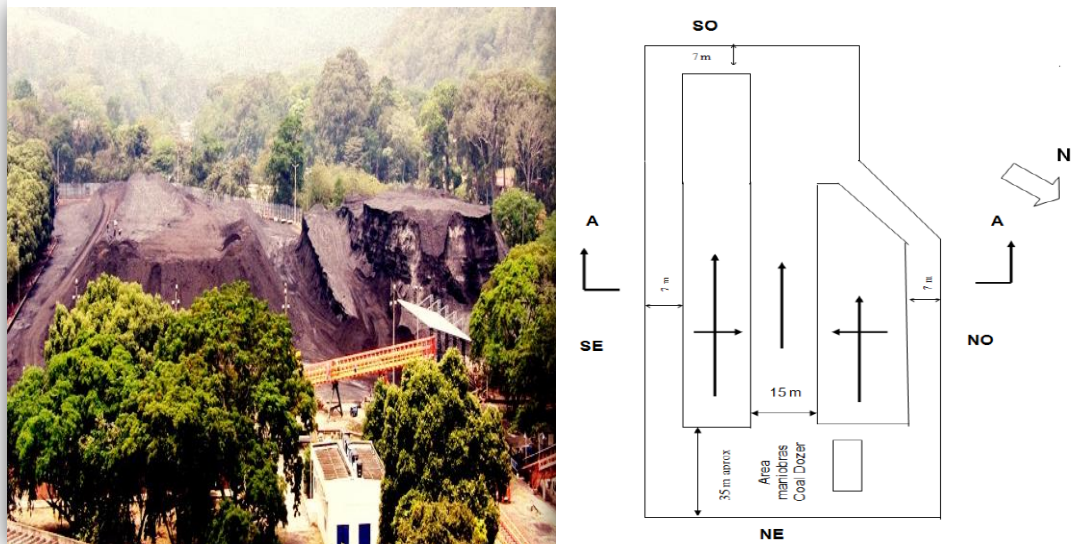
**3.4.2.2 Pérdidas por arrastre de viento y lluvia.** Para este estudio se formaron dos pilas de 20 kg c/u. A una de estas pilas se le aplicó el recubrimiento ceniza-agua y a otra no para comparar las pérdidas resultantes por el arrastre del viento y la lluvia. Las pilas fueron formadas sobre una superficie de Eternit con un pequeño grado de inclinación para permitir el flujo de agua cuando se presente lluvias. En el lado más bajo de la superficie de Eternit se colocó un canal recolector que conduce a una trampa formada de una bolsa permeable para recolectar el carbón que sea arrastrado por las lluvias.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. CONDICIONES ACTUALES DE LAS PILAS DE CARBÓN EN EL PATIO DE ALMACENAMIENTO

En la Figura 3 se encuentra el patio de almacenamiento de carbón de TERMOTASAJERO S.A. El patio tiene 2,84 hectáreas y está distribuido para formar dos pilas; una de formación y otra de consumo que se irán alternando una vez se haya terminado la pila de consumo. Las pilas tienen una altura aproximada de 15m y sus taludes a excepción del talud de consumo tienen una inclinación de 60° (Figura 4). El patio de almacenamiento presenta desniveles en algunas zonas; donde se acumulan lixiviados resultante de las lluvias (Figura 5). El patio de almacenamiento cuenta con barreras artificiales y naturales para disminuir la velocidad del viento (Figura 6); la altura de las pilas de carbón superan la altura de las barreras artificiales y en algunos puntos las barreras naturales (Figura 7).

**Figura 3.** Patio de almacenamiento de carbón.



**Figura 5.** Lixiviados por desnivel en el patio



**Figura 4.** Aumento del ángulo de talud en la pila de consumo



**Figura 6.** Barreras artificiales y naturales del patio de almacenamiento



**Figura 7.** Pila de consumo supera la altura de las barreras artificiales y naturales.



## 4.2. ANÁLISIS PRÓXIMO DEL CARBÓN DE SUMINISTRO Y CONSUMO

La pila sobre la cual se realizó el estudio, inicio su formación el 6 de marzo de 2012 y se terminó su consumo el 18 de enero de 2014. La cantidad de toneladas suministradas y consumidas mensualmente se presentan en el Anexo D. Los cierres para el carbón de suministro se hacen cada 15 días y de esta manera se presentan resultados quincenales; este reporte del análisis próximo es resultado del promedio ponderado de cada uno de los análisis hechos al carbón de los diferentes proveedores que entró durante la quincena. En el caso de carbón de consumo se presentan resultados mensuales que es el promedio ponderado de los análisis diarios. En la tabla 1 y 2 se presentan los resultados finales para el carbón de suministro y consumo.

**Tabla 1.** Resultados finales del análisis próximo del carbón de suministro

	TONELAJE	%HUMED P.S.A.	%HUMED RESID.	%HUMED TOTAL	BASE COMO SE RECIBE				
					% M.V.C.	%CENIZAS	%AZUFRE	% C. FIJO	P.CAL(Kcal/Kg)
TOTAL	618179.10								
PROMEDIO PONDERADO		2.68	1.75	4.37	35.92	13.19	1.52	46.46	6824
BASE SECA	646447.42				37.56	13.79	1.59	48.58	7136

**Tabla 2.** Resultados finales del análisis próximo del carbón de consumo.

	TONELAJE	%HUMED P.S.A.	%HUMED RESID.	%HUMED TOTAL	BASE COMO SE RECIBE				
					% M.V.C.	%CENIZAS	%AZUFRE	% C. FIJO	P.CAL(Kcal/Kg)
TOTAL	604175.02								
PROMEDIO PONDERADO		3.60	1.62	5.15	35.63	13.31	1.34	45.74	6431
BASE SECA	636996.63				37.57	14.03	1.41	48.22	6780

Para evitar errores por la influencia de la humedad, se tomaron en base seca (BS) los resultados del análisis próximo. El total del carbón suministrado fue de 646447.42 toneladas; el total del carbón consumido fue de 636996.63 toneladas, teniéndose así una diferencia de 9450.79 toneladas representando el 1.46% del carbón inicial (Tabla 3). Este porcentaje de carbón perdido, es producto de la

oxidación, autocombustión del carbón y del carbón arrastrado por el flujo de viento y lluvia.

**Tabla 3.** Diferencias del carbón de suministro y consumo

	<b>TONELADAS</b>
<b>SUMINISTRO</b>	646447.42
<b>CONSUMO</b>	636996.63
<b>DIFERENCIA</b>	9450.79
<b>% PERDIDO</b>	1.46

El precio del carbón que es suministrado a TERMOTASAJERO S.A varía según su porcentaje de azufre y su poder calorífico, manejándose un rango de \$60000 a \$180000 pesos entre los diferentes proveedores de carbón. Para calcular las pérdidas económicas que se presentan, se decidió tomar un valor fijo a manera de base de cálculo de \$100000 pesos por tonelada de carbón. De esta manera las 9450.70 toneladas de carbón perdidas durante el almacenamiento reflejan unas pérdidas económicas para la empresa de 945.1 millones de pesos.

Para determinar las pérdidas obtenidas por oxidación y autocomobustión se tomó como variable indicadora el % de carbono fijo (Tabla 4).

**Tabla 4.** Toneladas de carbono fijo perdido por oxidación.

	<b>TONELADAS EN BS</b>	<b>%CF EN BS</b>
<b>SUMINISTRO</b>	646447.42	48.58
<b>CONSUMO</b>	641662.82	48.22
<b>DIFERENCIA</b>	4784.60	0.36

De las 9450.70 toneladas de carbón total perdido en base seca, 4784.6 toneladas se perdieron por oxidación y autocombustion de la pila lo que representa el 50.63% de las pérdidas totales. El 49.37% restante, son causadas por el arrastre del viento y la lluvia, representado en 4666.19 toneladas de carbón.

**Tabla 5.** Pérdidas por almacenamiento

TIPO DE PERDIDA	TONELADAS	PORCENTAJE
OXIDACION Y AUTOCOMBUSTION	4784.60	50.63
ARRASTRE VIENTO Y LLUVIA	4666.19	49.37
TOTAL	9450.79	100

### 4.3 DESARROLLO DE LA ALTERNATIVA

#### 4.3.1 Proporción de la mezcla ceniza volátil-agua

En la figura 8 se observa la aplicación de cada uno de los recubrimientos de diferente proporción en peso. La figura 8a es del recubrimiento de la proporción 1:1 (p/p); la figura 8b es del recubrimiento de la proporción 1:2 (p/p) y la figura 8c es del recubrimiento de las proporción 1:3 (p/p). En la figura 9 se observa la respuesta de cada uno de los recubrimientos ante un esfuerzo aplicado.

**Figura 8.** Proporción en peso del recubrimiento



**Figura 9.** Esfuerzo aplicado al recubrimiento



Al aplicar un esfuerzo a los recubrimientos, se observó que las suspensiones de la proporción 1:1 y 1:2 (p/p) presentaron fractura, quedando el carbón completamente descubierto. De esta manera se eligió la proporción de 1:3 (p/p) de ceniza-agua para formar la suspensión que se aplicó a las pilas de prueba (Anexo C).

#### **4.3.2 Formación de las pilas de prueba**

En la Figura 10 se observan las pilas de seguimiento térmico; la Pila A no tiene recubrimiento y la Pila B tiene el recubrimiento ceniza-agua. En la figura 11 se observan las pilas de prueba de arrastre de viento y de lluvia.

**Figura 10.** Pilas de seguimiento térmico.



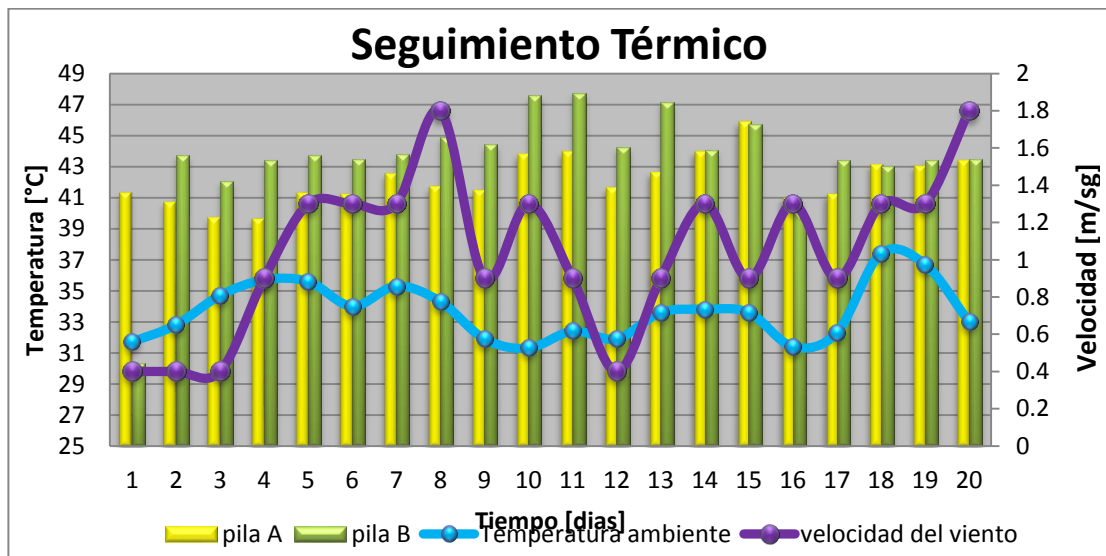
**Figura 11.** Montaje de las pilas de prueba de pérdidas de arrastre.



### 4.3.3. Seguimiento térmico

En la figura 12 se presenta el resultado del seguimiento térmico. Las temperaturas presentadas es un promedio de los 24 puntos de muestreo de cada pila. La temperatura ambiente y la velocidad del viento se obtuvieron de la estación meteorológica que se encuentra ubicada en la central eléctrica.

**Figura 12.** Seguimiento Térmico

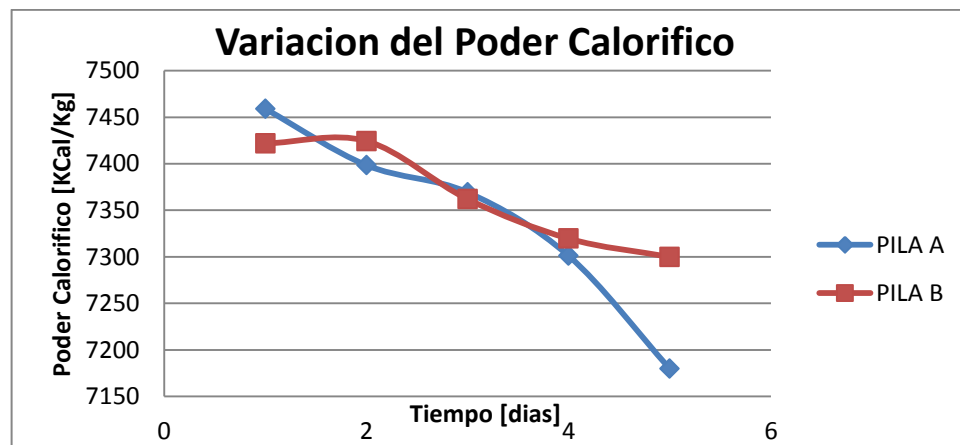


Los resultados muestran un aumento lento en la temperatura de cada una de las pilas lo que refleja la oxidación presente en el carbón. La pila con el recubrimiento (Pila B) siempre presentó temperaturas más altas durante el tiempo de estudio que la pila sin recubrimiento; pero nunca de superó el umbral de temperatura (80 - 120°C) donde se alcanza el desbordamiento térmico y se llega a la ignición espontánea. Los días 9, 10, 16 y 17 se presentaron lluvias, después de los dos primeros días de lluvia se observó las temperaturas más altas alcanzadas por la pila B y se interpreta como la superación del límite de humedad saturada ya que el recubrimiento no permite una buena disipación del calor generado por la reacción de oxidación. Los dos últimos días de lluvia se observó un aumento más similar en las dos pilas y se puede interpretar como el deterioro del recubrimiento aplicado a la pila B.

#### 4.3.4. Seguimiento de calidad

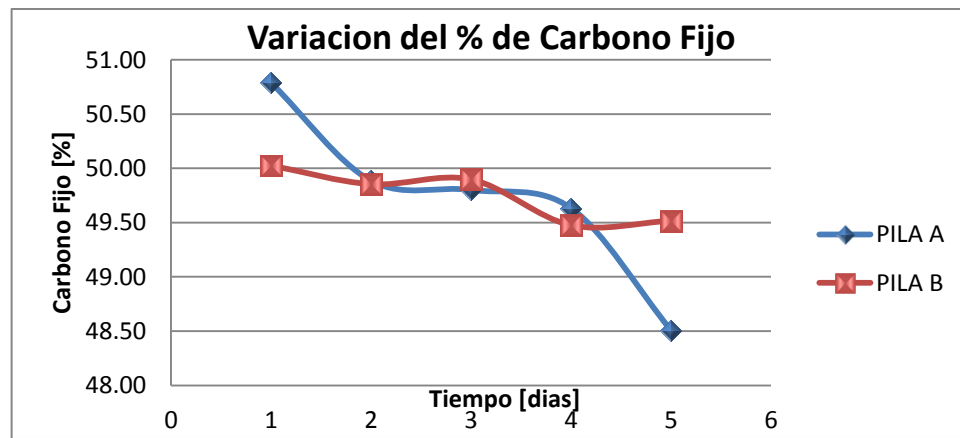
Los resultados de seguimiento de calidad de las pilas A y B se encuentran en las tablas D7 y D8 respectivamente. Durante el mes y medio que se realizó el seguimiento de calidad; en la pila A se pierde 279 kcal/kg de poder calorífico y en la pila B se pierde 122 kcal/kg de poder calorífico (Figura 13).

Figura 13. Variación del Poder Calorífico



En el caso del porcentaje de carbono fijo; la pila A paso del 50.79% a 48.51% disminuyendo el 2.28%, la pila B paso del 50.03% a 49.52% disminuyendo el 0.51%. En la muestra 2,3 y 4 (Figura 14) se observa que la variación del %CF en la pila A es casi constante y se interpreta que es causado por la disminución de la temperatura de la pila, ya que las lluvias presentadas en esos días bajo la temperatura y por ende la oxidación del carbón. En el caso de la pila B la variación del %CF en la muestra 2,3 y 4 (Figura 14) fue un poco más notorio en comparación a las otras muestras de esta misma pila; debido a que esos días se reportaron las temperaturas más altas de la pila durante el tiempo de estudio.

**Figura 14. Variación del %CF**



#### 4.3.5. Pérdidas por arrastre de viento y lluvia

**Tabla 6.** Pérdidas por arrastre de lluvia y viento.

	PILA A (SIN CENIZA)	PORCENTAJE [%]	PILA B (CON CENIZA)	PORCENTAJE [%]
CARBON INICIAL EN EL ETERNIT [g]	20000	100	20000	100
CARBON FINAL EN EL ETERNIT [g]	19040	95.2	19638	98.2
CARBON ARRASTRADO POR LLUVIA [g]	732.8	3.7	157.4	0.8
CARBON ARRASTRADO POR VIENTO [g]	227.2	1.1	204.6	1.0

Las pérdidas totales por viento y lluvia fueron calculadas como la diferencia entre el peso inicial y el peso final de las pilas. En la pila A (sin ceniza) las pérdidas totales fueron de 960g y en la pila B (con ceniza) las pérdidas totales fueron de 362g. Por lo tanto la aplicación del recubrimiento reduce las pérdidas por arrastre de viento y lluvia. Al pesar las bolsas recolectoras del carbón arrastrado por la lluvia se encontró que en la pila sin ceniza se arrastró el 3.7% del carbón inicial y en la pila con ceniza se arrastró el 0.8% del carbón inicial. La diferencia entre las pérdidas totales y las pérdidas por lluvia corresponde a las pérdidas por arrastre del viento, las cuales fueron de 1.1% para la pila A y de 1% para la pila B. por lo tanto para la pila A el 76.3% de las perdidas fue debido a la lluvia y el 23.6% fueron pérdidas por viento. En la pila con recubrimiento el 43.5% representa las pérdidas por lluvia y el 56.5% es de pérdidas por viento.

## CONCLUSIONES

1. La oxidación, la combustión espontánea y el arrastre por lluvia y viento que se presenta en el carbón durante su almacenamiento en el patio de acopio, genera pérdidas económicas significativas para TERMOTASAJERO, que en el caso de nuestra pila analizada fue de 945 millones de pesos.
2. Al analizar las variables más representativas en la calidad del carbón y teniendo como objetivo la conservación de estas, la aplicación del recubrimiento de la mezcla ceniza-agua resulta una alternativa positiva.
3. La variación del carbono fijo (%CF) y ceniza volátil (%CV) en la pila con recubrimiento es mucho menor que la variación del %CF y el %CV en la pila sin recubrimiento; esto indica que el recubrimiento de la mezcla ceniza-agua ayuda a disminuir la tasa de oxidación y autocombustión del carbón en la pila de almacenamiento.
4. El recubrimiento de la mezcla ceniza-agua impide la disipación del calor en la pila de carbón; pero esto no es un problema representativo al observarse que no se supera el umbral de temperatura y la variación de las propiedades es mucho menor que la variación presentada en una pila que no contiene el recubrimiento.

## RECOMENDACIONES

1. Se recomienda realizar este tipo análisis durante un lapso mayor de tiempo, para observar con mayor detalle las variaciones en las propiedades fisicoquímicas del carbón ya que este depende de los eventos climáticos en la zona de almacenamiento.
2. En época de lluvias se recomienda la aplicación más constante del recubrimiento de la mezcla ceniza-agua para conservar la idealidad del proceso.
3. Cada vez que se tome las muestras para el análisis de calidad se deben hacer de la misma manera en la pila (parte superior, media e inferior de cada lado de la pila) y en el caso de la pila con el recubrimiento es necesario después de tomar la muestra, cubrir nuevamente con el recubrimiento la zona muestreada.

## BIBLIOGRAFIA

COWARD HF. Research on spontaneous combustion of coal in mines a review. Research Report 142, Great Britain: Safety in Mines Research Establishment; 1957.

HAIHUI, WANG; BOGDAN Z. DLUGOGORSKI; ERIC M. KENNEDY. Coal oxidation at low temperatures: oxygen consumption, oxidation products, reaction mechanism and kinetic modelling.

ROMERO, C; MIRANDA, J, Oxidación y autocombustión de carbones en parque. 5 ° Informe, Proyecto quinto Informe CECA 7220-EA/752, diciembre de 1991.

ROMERO, C; MIRANDA, J; IBARRA, J; SCHMAL, D; MARTINEZ, D. El desgaste de los carbones y las existencias de las pérdidas derivadas de su poder calorífico J. Calidad del Carbón, 13 (3-4) (1994), p. 104

SCHMAL, D. Spontaneous heating of stored coal. In: Nelson CR, editor. Chemistry of coal weathering. Amsterdam: Elsevier; 1989. p. 133–215.

SCHMAL, D. A model for the spontaneous heating of stored coal, PhD Thesis, University of Delft, Delft, 1987.

V. FIERRO, A; J.L. MIRANDA A; C. ROMERO; J.M. ANDRE; A. ARRIAGA; D. SCHMAL; G.H. VISSER. Prevention of spontaneous combustion in coal stockpiles Experimental results in coal storage yard.

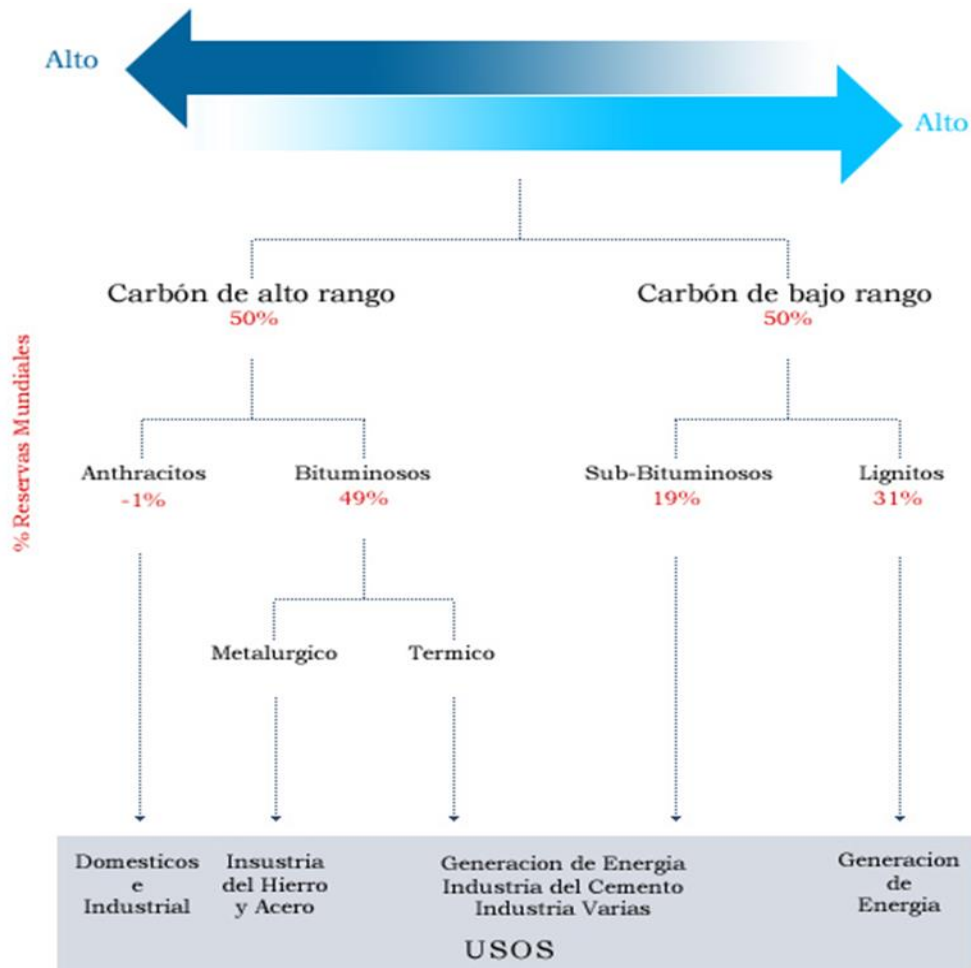
WINMILL TF. The absorption of oxygen by coal. IX. Comparison of rates of adsorption of oxygen by different varieties of coal. Trans Inst Min Engrs, London 1915/1916; 51:510–47.

## ANEXOS

### ANEXO A. Clasificación del carbón

#### CLASIFICACION DEL CARBON SEGÚN SU RANGO

Figura A1.



**Fuente:** energía-catamutun

Las variaciones en la edad y en la historia geológica del carbón ocasionan variaciones en el rango. La clasificación general y básica del carbón es por rango o categoría, desde turba y lignitos en el extremo inferior de la escala, pasando por los carbones bituminosos hasta llegar a la antracita en el extremo superior. Por lo

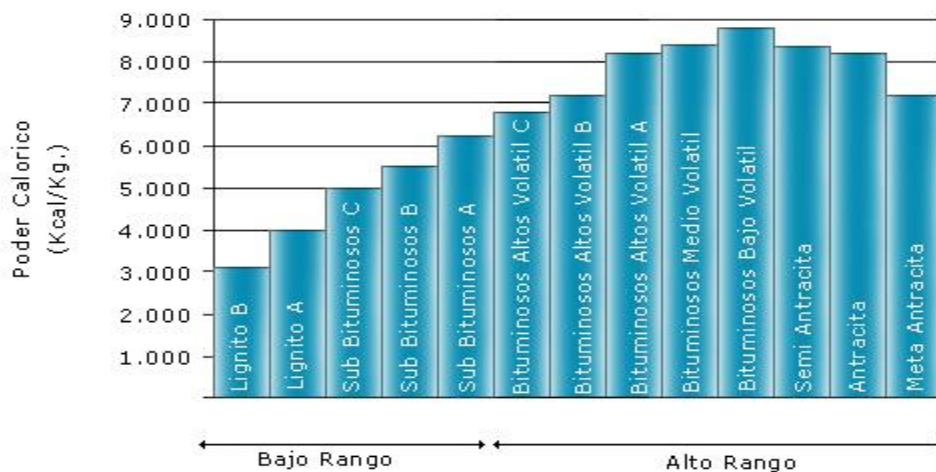
general, cuanto más alto sea el rango del carbón, mayor será su edad, contenido de carbono y poder calorífico, de igual modo, más bajo será su contenido de hidrógeno y materias volátiles.

Los distintos sistemas de clasificación de carbón se basan en distintas propiedades, que en esencia buscan determinar el poder calorífico del carbón. De esta forma es posible construir un rango de clasificación que permite identificar la génesis, edad, tipo de biomasa originaria, condiciones bioquímicas y fisicoquímicas que caracterizan el desarrollo del carbón.

### CLASIFICACION DEL CARBON SEGÚN LAS NORMAS ASTM.

Las normas ASTM fijan un estándar en la clasificación de carbones. Esta norma define como carbones de bajo rango aquellos cuyo poder calorífico bruto, base húmeda sea menor a 6.390 Kcal/Kg., en este rango están los carbones denominados sub bituminosos y los lignitos. En los carbones de alto rango, con un poder calorífico mayor a 6.390 Kcal/Kg., se incluyen los carbones bituminosos y antracitos.

**Figura 17.** Clasificación del carbón según normas ASTM.



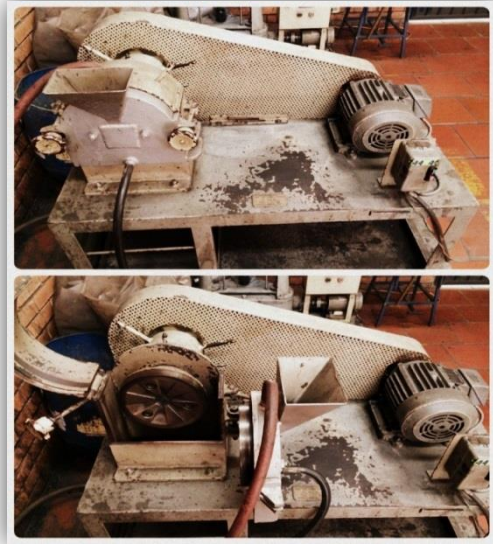
**Fuente:** energía-Catamutun

## ANEXO B. Equipos de laboratorio

**Figura B1. TRITURADOR DE MALLA 4**  
(Holmes 401 XL)



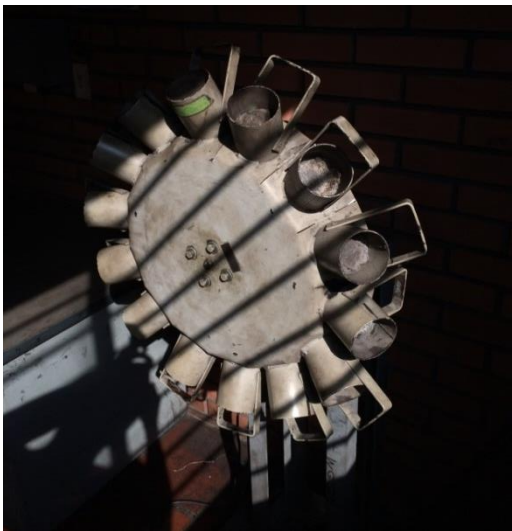
**Figura B2. TRITURADOR MALLA 8**  
(Molino de disco)



**Figura B3. TRITURADOR MALLA 60 (Pulverizador Holmes 500 DG)**



**Figura B4. HOMOGENIZADORES**



## ANEXO C. Preparación de las pilas de prueba

**Figura C1.** Preparación y aplicación de la mezcla ceniza-agua



**Figura C2.** Inserción de los tubos de PVC en las pilas.



## ANEXO D. Tablas experimentales.

**Tabla D1.** Resultados del análisis próximo para el carbón de suministro.

PERIODO	TONELAJE	%HUMED			BASE COMO SE RECIBE				
		P.S.A.	RESID.	TOTAL	% M.V.C.	%CENIZAS	%AZUFRE	% C. FIJO	P.CAL(Kcal/Kg)
1Q - Mar	10,375.70	2.84	1.77	4.55	34.44	15.19	1.78	45.40	6653
2Q - Mar	16,177.54	3.40	1.85	5.18	34.90	13.91	1.24	45.98	6706
1Q - Abr	14,243.50	4.39	2.26	6.54	35.03	13.62	1.22	44.71	6557
2Q - Abr	17,150.04	4.50	2.20	6.60	35.29	13.44	1.22	44.66	6554
1Q - May	16,203.44	3.63	2.10	5.65	35.83	12.66	1.29	45.86	6714
2Q - May	21,744.66	3.22	1.60	4.76	36.77	12.38	1.24	46.09	6827
1Q - Jun	17,795.52	3.34	1.72	5.00	35.95	11.87	1.18	47.18	6831
2Q - Jun	21,774.73	2.75	1.98	4.67	36.21	11.94	1.35	47.10	6870
1Q - Jul	17,303.36	3.04	2.00	4.96	36.08	11.70	1.37	47.13	6876
2Q - Jul	22,249.81	3.04	2.10	5.07	36.06	11.51	1.27	47.31	6849
1Q - Ago	26,846.55	2.96	1.99	4.88	36.57	11.58	1.24	46.97	6904
2Q - Ago	33,415.37	3.10	1.99	5.02	36.49	10.86	1.29	47.53	6924
1Q - Sep	10,974.82	2.24	1.84	4.03	36.61	11.67	1.41	47.52	6968
2Q - Sep	19,662.87	2.33	1.50	3.80	36.47	12.59	1.30	47.14	6915
1Q - Oct	20,697.88	2.38	1.97	4.30	26.32	11.69	1.26	57.69	6942
2Q - Oct	11,441.81	3.30	1.83	5.07	35.81	11.94	1.21	47.18	6877
1Q - Nov	11,619.82	2.94	1.70	4.59	37.50	12.63	1.34	45.80	6854
2Q - Nov	16,054.60	2.93	1.96	4.82	35.71	13.52	1.57	47.00	6764
1Q - Dic	37,301.76	2.65	1.86	4.45	35.42	14.63	1.68	45.33	6684
2Q - Dic	37,301.76	1.13	1.50	2.61	38.13	17.25	1.82	42.02	6622
1Q - Ene 2013	261.35	1.14	1.57	2.69	38.03	17.63	1.92	41.64	6624
2Q - Ene	12379.46	2.45	1.69	4.10	35.34	15.21	1.77	45.36	6713
1Q - Feb	11453.91	2.45	1.63	4.04	36.90	15.06	4.39	41.33	6568
2Q - Feb	8781.98	2.20	1.49	3.66	36.19	13.10	2.46	46.20	6897
1Q - Mar	10364.46	2.01	1.52	3.50	36.39	13.41	1.85	46.44	6946
2Q - Mar	7536.93	1.94	1.49	3.40	36.06	13.55	1.69	46.99	6932
1Q - Abr	11742.27	1.85	1.46	3.29	35.97	13.81	1.74	46.93	6941
2Q - Abr	11761.98	2.27	1.61	3.84	35.75	14.03	1.79	46.35	6870
1Q - May	10083.91	2.45	1.36	3.77	35.76	14.07	1.82	46.38	6872
2Q - May	14559.56	2.10	1.47	3.54	35.93	13.98	1.65	46.56	6894
1Q - Jun	12495.09	2.40	1.35	3.72	36.59	13.65	1.57	46.03	6917
2Q - Jun	12812.41	2.14	1.30	3.41	36.69	13.66	1.56	46.24	6921
1Q - Jul	13710.84	2.09	1.53	3.59	36.71	13.71	1.49	45.99	6881
2Q - Jul	14380.77	2.23	1.49	3.68	36.66	12.89	1.43	46.77	6940
1Q - Ago	15923.58	2.91	1.59	4.45	36.40	12.68	1.42	46.46	6878
2Q - Ago	16712.40	2.27	1.61	3.84	36.64	13.19	1.44	46.33	6921
1Q - Sep	16996.54	2.55	1.66	4.16	36.54	12.90	1.45	46.41	6905
2Q - Sep	15886.12	2.27	1.50	3.73	36.61	12.88	1.48	46.73	6963
<b>TOTAL</b>	<b>618,179.1</b>								
<b>PROMEDIO PONDERADO</b>		<b>2.68</b>	<b>1.75</b>	<b>4.3729</b>	<b>35.92</b>	<b>13.19</b>	<b>1.52</b>	<b>46.46</b>	<b>6,824</b>
<b>BASE SECA</b>	<b>646447.42</b>				<b>37.56</b>	<b>13.79</b>	<b>1.59</b>	<b>48.58</b>	<b>7136</b>

**Tabla D2.** Resultados del análisis próximo para el carbón de consumo.

PERIODO	TONELAJE	%HUMED P.S.A.	%HUMED RESID.	%HUMED TOTAL	BASE COMO SE RECIBE				
					% M.V.C.	%CENIZAS	%AZUFRE	% C. FIJO	P.CAL(Kcal/Kg)
JULIO 2012	22,290.70	3.54	1.74	5.22	35.88	12.17	1.29	46.77	6801
AGOSTO 2012	24,837.81	3.74	1.57	5.25	35.80	12.11	1.23	46.84	6818
SEPTIEMBRE 2012	18,097.55	3.42	1.19	4.57	35.33	12.86	1.27	47.25	6787
OCTUBRE 2012	30,481.97	4.70	1.52	6.15	34.42	12.03	1.19	47.40	6731
NOVIEMBRE 2012	37,680.97	4.31	1.58	5.81	35.38	12.05	1.20	47.05	6777
DICIEMBRE 2012	42,813.20	4.42	1.50	5.85	34.89	13.77	1.35	45.49	6610
ENERO 2013	43,005.00	4.23	1.72	5.87	34.86	13.39	1.34	45.88	6624
FEBRERO 2013	37,309.90	3.60	1.82	5.34	35.62	13.23	1.39	45.81	6720
MARZO 2013	32,791.00	3.20	1.53	4.68	35.76	13.12	1.50	46.43	6798
ABRIL 2013	40,334.00	3.54	1.46	4.95	35.48	13.41	1.54	46.16	6750
MAYO 2013	36,157.32	4.35	1.99	6.26	34.82	13.24	1.34	45.68	6630
JUNIO 2013	27,509.17	4.12	1.68	5.73	35.68	13.14	1.30	45.44	6699
JULIO 2013	41,417.69	3.03	1.63	4.60	36.36	13.27	1.37	45.77	6754
AGOSTO 2013	20,705.00	3.49	1.68	5.11	36.18	14.40	1.62	44.30	6633
SEPTIEMBRE 2013	23,385.40	2.88	1.73	4.57	36.40	14.13	1.51	44.90	6732
OCTUBRE 2013	37,714.00	2.82	1.72	4.49	36.44	14.11	1.57	44.96	6738
NOVIEMBRE 2013	30,237.40	4.23	2.30	6.42	35.89	14.16	1.51	43.52	6573
DICIEMBRE 2013	32,317.95	3.42	1.92	5.28	36.20	14.14	1.55	44.39	6679
ENERO 2014	25,088.99	2.80	1.94	4.69	36.43	13.88	1.42	45.00	6729
<b>TOTAL</b>	<b>604,175.02</b>								
<b>PROMEDIO PONDERADO</b>		<b>3.60</b>	<b>1.62</b>	<b>5.15</b>	<b>35.63</b>	<b>13.31</b>	<b>1.34</b>	<b>46</b>	<b>6431</b>
<b>BASE SECA</b>	<b>636996.63</b>				<b>37.57</b>	<b>14.03</b>	<b>1.41</b>	<b>48.22</b>	<b>6780</b>

**Tabla D3.** Toneladas de carbón de suministro y consumo de la pila de estudio.

AÑO	MES	SUMINISTRO DE CARBON (Ton)	CONSUMO DE CARBON (Ton)
2012	ENERO	--	--
	FEBRERO	--	--
	MARZO	32,152.59	--
	ABRIL	31,393.54	--
	MAYO	37,948.10	--
	JUNIO	39,570.25	--
	JULIO	39,553.17	22,290.70
	AGOSTO	60,261.92	24,837.81
	SEPTIEMBRE	30,637.69	18,097.55
	OCTUBRE	32,140.03	30,481.97
	NOVIEMBRE	27,674.42	37,680.97
	DICIEMBRE	74,603.52	42,813.20

2013	ENERO	12,640.81	43,005.00
	FEBRERO	20,235.89	37,310.00
	MARZO	17,901.39	32,791.00
	ABRIL	23,504.64	40,334.00
	MAYO	24,642.73	36,157.32
	JUNIO	25,307.50	27,509.17
	JULIO	28,091.61	41,417.69
	AGOSTO	32,635.98	20,705.00
	SEPTIEMBRE	32,882.66	23,385.40
	OCTUBRE	--	37,714.00
	NOVIEMBRE	--	30,237.40
	DICIEMBRE	--	32,317.95
2014	ENERO	--	25,088.99
	TOTAL	623,778.44	604,175.12

Fuente: TERMOTASAJERO S.A

Tabla D4. Temperaturas en cada punto de muestreo de la pila A.

TEMPERATURAS PILA A (°C)																	
LADO A				LADO B				LADO C				LADO D					
NIVEL																	
FECHA	1	2	3	PROMEDIO	1	2	3	PROMEDIO	1	2	3	PROMEDIO	1	2	3	PROMEDIO	PROMEDIO TOTAL
12/03/2014	45	46	44	45	41	37	37	38	45	38	47	43	37	39	40	39	41
13/03/2014	34	39	34	36	36	39	45	40	42	45	40	42	40	46	49	45	41
17/03/2014	32	39	34	35	48	41	40	43	38	39	38	38	43	43	42	43	40
18/03/2014	34	40	33	36	44	41	41	42	38	39	38	38	40	39	49	43	40
19/03/2014	36	38	35	36	41	41	41	41	43	43	38	41	44	47	49	47	41
20/03/2014	39	38	30	36	43	42	39	41	42	43	43	43	42	48	46	45	41
21/03/2014	42	41	33	39	48	46	40	45	42	43	36	40	46	46	48	47	43
25/03/2014	39	39	32	37	43	43	40	42	44	43	39	42	46	48	45	46	42
26/03/2014	32	36	30	33	47	44	42	44	44	45	40	43	43	47	48	46	42
27/03/2014	35	36	34	35	44	43	42	43	47	49	44	47	47	53	52	51	44
28/03/2014	35	37	35	36	41	43	43	42	48	49	45	47	47	54	51	51	44
31/03/2014	36	38	36	37	42	39	40	40	42	45	39	42	41	55	47	48	42
01/04/2014	39	40	36	38	43	43	39	42	42	45	38	42	45	56	46	49	43
02/04/2014	41	41	33	38	43	46	39	43	43	48	42	44	42	59	51	51	44
03/04/2014	38	40	37	38	44	42	45	44	51	53	44	49	50	55	52	52	46
04/04/2014	38	39	36	38	39	35	40	38	41	49	36	42	43	47	49	46	41
07/04/2014	36	37	33	35	37	37	40	38	44	45	41	43	38	56	51	48	41
09/04/2014	35	37	32	35	40	40	41	40	45	47	42	45	47	57	55	53	43
10/04/2014	34	36	33	34	41	41	41	41	45	47	42	45	47	56	54	52	43
11/04/2014	35	34	34	34	40	43	42	42	46	46	42	45	48	55	53	53	43

**Tabla D5.** Temperaturas en cada punto de muestreo de la pila B.

TEMPERATURAS PILA B (°C)																	
LADO A				LADO B				LADO C				LADO D					
NIVEL																	
FECHA	1	2	3	PROMEDIO	1	2	3	PROMEDIO	1	2	3	PROMEDIO	1	2	3	PROMEDIO	PROMEDIO TOTAL
12/03/2014	46	41	40	42	38	37	35	37	37	39	32	36	36	39	35	37	30
13/03/2014	44	54	50	49	46	40	43	43	40	50	32	41	41	46	39	42	44
17/03/2014	43	52	46	47	47	37	39	41	35	47	39	40	39	46	35	40	42
18/03/2014	44	51	44	46	45	39	42	42	45	49	36	43	42	47	37	42	43
19/03/2014	45	47	47	46	51	39	44	45	46	49	28	41	39	49	41	43	44
20/03/2014	45	44	49	46	45	44	43	44	45	47	34	42	40	50	36	42	44
21/03/2014	42	49	49	47	52	45	43	47	44	45	31	40	39	50	37	42	44
25/03/2014	43	48	49	47	52	46	44	47	44	51	30	42	39	53	40	44	45
20/03/2014	41	45	43	43	53	50	38	47	48	52	36	45	44	43	40	42	44
21/03/2014	40	53	48	47	51	46	49	49	50	52	44	49	44	51	43	46	48
28/03/2014	41	54	47	47	50	47	50	49	50	52	43	48	45	51	43	46	48
31/03/2014	43	46	47	45	50	47	43	47	47	50	35	44	39	47	37	41	44
01/04/2014	45	47	48	47	52	49	47	49	50	55	40	48	42	50	41	44	47
02/04/2014	41	41	46	43	52	46	44	47	47	51	37	45	36	47	41	41	44
03/04/2014	44	44	48	45	53	50	46	50	47	52	38	46	39	48	40	42	46
04/04/2014	41	40	43	41	42	42	41	42	41	50	35	42	31	40	35	35	40
07/04/2014	45	46	47	46	48	46	45	46	40	48	34	41	36	46	40	41	43
09/04/2014	44	44	45	44	48	45	43	45	43	48	36	42	35	46	39	40	43
10/04/2014	43	46	44	44	49	47	43	46	43	49	36	43	35	46	40	40	43
11/04/2014	44	45	46	45	50	47	42	46	44	50	33	42	36	47	38	40	44

**Tabla D6.** Datos de la estación meteorológica

FECHA	VELOCIDAD DEL VIENTO (m/Sg)	DIRECCION VIENTO	TEMP AMBIENTE (°C)
12/03/2014	0.4	NE	31.7
13/03/2014	0.4	NE	32.8
17/03/2014	0.4	NE	34.7
18/03/2014	0.9	NE	35.7
19/03/2014	1.3	SE	35.6
20/03/2014	1.3	WSW	34
21/03/2014	1.3	WSW	35.3
25/03/2014	1.8	WSW	34.3
26/03/2014	0.9	NE	31.9
27/03/2014	1.3	NE	31.3
28/03/2014	0.9	NE	32.4

31/03/2014	0.4	NE	31.9
01/04/2014	0.9	NE	33.6
02/04/2014	1.3	W	33.8
03/04/2014	0.9	NE	33.6
04/04/2014	1.3	WSW	31.4
07/04/2014	0.9	WSW	32.3
09/04/2014	1.3	W	37.4
10/04/2014	1.3	WSW	36.7
11/04/2014	1.8	SE	33

**Fuente:** TERMOTASAJERO S.A

**Tabla D7.** Resultados del seguimiento de calidad de la pila A

FECHA ANALISIS	%HS	%HR	%HT	%CZ	%MV	%CF	%S	KCAL/KG	%C
27/02/2014	0.58	1.31	1.89	11.19	38.03	50.79	1.10	7459	70.14
10/03/2014	2.03	1.52	3.52	12.00	38.11	49.89	1.27	7398	69.15
25/03/2014	0.59	1.35	1.93	12.15	38.04	49.80	1.45	7369	68.80
10/04/2014	0.4	1.39	1.78	12.31	38.06	49.63	1.43	7301	70.82
21/04/2014	0.28	1.47	1.75	13.40	38.08	48.51	1.33	7180	70.10

**Tabla D8.** Resultados del seguimiento de calidad de la pila B

FECHA ANALISIS	%HS	%HR	%HT	%CZ	%MV	%CF	%S	KCAL/KG	%C
27/02/2014	0.53	1.31	1.83	11.95	38.03	50.03	1.23	7422	69.30
10/03/2014	1.67	1.51	4.14	12.04	38.11	49.85	1.21	7424	69.76
25/03/2014	0.81	1.44	2.24	12.02	38.08	49.90	1.28	7362	68.79
10/04/2014	0.35	1.42	1.77	12.00	38.07	49.48	1.24	7320	71.58
21/04/2014	0.28	1.43	1.71	12.41	38.07	49.52	1.27	7300	70.97