



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Identificación de las principales causas y prevención de la combustión espontánea de carbón en los mantos de la mina El Cerrejón.

Alan José Daza Aragón

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Materiales y Minerales
Medellín, Colombia

2017

Identificación de las principales causas y prevención de la combustión espontánea de carbón en los mantos de la mina El Cerrejón.

Alan José Daza Aragón

Tesis o trabajo de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería - Recursos Minerales

Director:

PhD. Moisés Oswaldo Bustamante Rúa

Línea de Investigación:

Explotación y beneficio

Grupo de Investigación:

Instituto de Minerales CIMEX

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Materiales

Medellín, Colombia

2017

A mi padre Osias Daza, a mi madre Martha Aragón, a mi hermana María Carolina Daza y en general a toda mi familia, por confiar siempre en mis capacidades y brindarme el apoyo necesario para cumplir cada una de mis metas.

Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: la voluntad.

Albert Einstein

Agradecimientos

Agradezco especialmente al profesor Moisés Oswaldo Bustamante Rúa por su acompañamiento en este proceso, por brindarme la confianza, orientarme y compartirme una vez más sus conocimientos durante el desarrollo de este trabajo de investigación. A la prestigiosa Universidad Nacional de Colombia por permitirme ser parte de sus privilegiados estudiantes. A todas las personas del Instituto de Minerales CIMEX que de alguna manera han aportado un grano de arena para que pueda completar este ciclo académico, especialmente al ingeniero Wilson Marín, a mis grandes amigos Pablo Bustamante (compañero de tesis) y Julián Osorio, quiénes contribuyeron enormemente en mi trabajo compartiendo sus ideas y aconsejándome en múltiples momentos.

Agradezco de igual manera a la empresa Cerrejón, especialmente a los ingenieros Hernán Zapata, Jimmy Varela, Sandro Moscote, Edgardo Pérez y Arley Martínez, por el soporte técnico brindado para el desarrollo de las pruebas en la mina y suministrarme información valiosa para el desarrollo del presente trabajo.

Agradezco a mi pareja, amiga y consejera Daniela Zapata, por brindarme el apoyo necesario en los momentos difíciles e impulsarme a ser mejor cada día.

Resumen

La combustión espontánea en mantos de carbón es una problemática que se presenta en minas alrededor del mundo. Se han desarrollado teorías que hablan de factores que generan autocalentamiento en el carbón y favorecen a la combustión del mismo. La sinergia de estos factores contribuye al incremento de la temperatura en la reacción de oxidación, facilitando el alcance de la energía de activación del sistema, en la cual se desarrolla la ignición y la reacción es espontánea. Actualmente, se desconoce la incidencia de cada variable en la susceptibilidad a la combustión espontánea del carbón, por lo cual en este trabajo se desarrolló una metodología para determinar estadísticamente las variables con mayor aporte en el fenómeno. Se utilizó la estadística descriptiva, la detección de valores atípicos, la determinación de componentes principales, el análisis de conglomerados y la regresión logística para conocer cuántas variables indicadoras son necesarias para describir la susceptibilidad a la combustión. Para el análisis se recolectó información en campo y en el laboratorio procedentes de distintos mantos de la mina Cerrejón, considerando factores extrínsecos e intrínsecos. Se encontró que la temperatura del manto, la presión atmosférica, la velocidad del viento, el oxígeno, el metano, la altura, la ceniza, la materia volátil, el poder calorífico, la vitrinita, la liptinita y el índice de Hardgrove, son las variables más influyentes del fenómeno. Partiendo de estas variables que configuran un escenario de ignición, se plantearon algunas estrategias para prevenir la combustión espontánea en los mantos de la mina. Finalmente, a través de pruebas pilotos se confirmó que el bitumen diluido con salmuera en una concentración de 50/50 es la mejor alternativa.

Palabras clave: combustión espontánea, mantos de carbón, análisis estadístico, prevención, ignición, sellamientos.

Abstract

Spontaneous combustion in coal seams is a problem that occurs in coal mines around the world. Theories have been developed that speak of various factors that generate self-heating in coal and favor combustion. Synergy of these factors contributes to the increase of the temperature in the oxidation reaction, facilitating reaching the activation energy of the system. This ignition develops and reaction are spontaneous. Currently, the incidence of each variable in the susceptibility to coal spontaneous combustion is unknown, therefore in this work a methodology was developed to determine statistically which of the variables have the greatest contribution in this phenomenon. Descriptive statistics, atypical values detection, principal component determination, cluster analysis, and logistic regression were used to determine how many indicator variables are necessary to describe the susceptibility to combustion. For the analysis, field and laboratory data were collected from different seams at Cerrejón, considering extrinsic and intrinsic factors. The seam temperature, atmospheric pressure, wind speed, oxygen, methane, height, ash, volatile matter, heat power, vitrinite, liptinite and Hardgrove index are the most influential variables of the phenomenon. Based on these variables that constitute an ignition scenario, some strategies were proposed to prevent spontaneous combustion in coal seams. Finally, through pilot tests it was confirmed that the bitumen diluted with brine in a concentration of 50/50 is the best alternative.

Keywords: spontaneous combustion, coal seams, statistical analysis, prevention, ignition, sealings.

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Lista de figuras	XIII
Lista de tablas	XV
Lista de Símbolos y abreviaturas	XVI
Introducción	1
1. Estado del arte	5
1.1 Reacción de oxidación	6
1.2 Teorías de calentamiento espontáneo.....	11
1.3 Factores que influyen en la combustión espontánea de carbón	13
1.3.1 Factores extrínsecos	13
1.3.2 Factores intrínsecos	18
1.4 Métodos utilizados en el mundo para la prevención de la combustión espontánea en minas de carbón a cielo abierto	24
1.4.1 Agentes sellantes	24
1.4.2 Buffer Blasting	26
1.4.3 Implementación de inhibidores	26
1.5 Métodos para detectar el autocalentamiento en el carbón.....	27
1.6 Método para determinar la susceptibilidad de los carbones a la combustión espontánea.....	28
1.7 Efectos adversos de la combustión de carbón	30
2. Determinación de la etapa controlante en la reacción de oxidación	33
2.1 Control por reacción Química.....	33
2.2 Control por difusión del oxígeno a través del film o película gaseosa	35
3. Metodología	37
3.1 Descripción de las zonas de muestreo	37
3.2 Caracterización de los mantos	38
3.2.1 Medición de variables extrínsecas	38
3.2.2 Medición de variables intrínsecas	39
3.3 Análisis en el laboratorio	40
3.3.1 Análisis próximo completo	40
3.3.2 Análisis petrográfico	42
3.3.3 Índice de molienda Hardgrove	43

3.4	Análisis multivariante de datos.....	44
3.4.1	Descripción de las variables.....	45
3.4.2	Estadística descriptiva.....	46
3.4.3	Identificación de “outliers”.....	48
3.4.4	Análisis de componentes principales.....	49
3.4.5	Análisis de conglomerados.....	51
3.4.6	Regresión logística.....	51
3.5	Ángulo de contacto del bitumen.....	53
3.6	Viscosidad del bitumen.....	55
4.	Resultados y discusión.....	57
4.1	Análisis multivariante de datos.....	57
4.1.1	Medidas de localización.....	57
4.1.2	Identificación de outliers.....	59
4.1.3	Componentes principales.....	60
4.1.4	Conglomerados.....	65
4.1.5	Regresión logística.....	67
4.2	Resultados del análisis multivariante de datos.....	70
5.	Estrategia para la prevención de la combustión espontánea en los mantos de carbón.....	73
5.1	Estrategia actual implementada por Cerrejón.....	73
5.1.1	Aplicación del bitumen.....	73
5.1.2	Mediciones de ángulo de contacto de bitumen diluido con agua.....	74
5.2	Propuestas para evitar la ignición en los mantos de carbón de la mina Cerrejón.....	76
5.2.1	Alternativa de sellamiento seleccionada según los resultados de las pruebas piloto.....	82
5.2.2	Mediciones de ángulo de contacto de bitumen diluido con salmuera.....	83
5.2.3	Viscosidad del bitumen.....	85
6.	Conclusiones y recomendaciones.....	87
6.1	Conclusiones.....	87
6.2	Recomendaciones.....	90
	Bibliografía.....	93

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1. Triángulo de fuego de la combustión espontánea de carbón, a partir de potenciales energéticos.....	2
Figura 1-1. Etapas del fenómeno de combustión espontánea en los mantos de carbón (Bustamante Rúa, 2016a).	6
Figura 1-2. Etapas de oxidación (R. V. K. Singh, 2013a).	8
Figura 1-3. Relación de la constante de equilibrio con la temperatura en las reacciones de oxidación del carbón (OriginLab Corporation, 1992).	8
Figura 1-4. Balance de calor generado en el manto de carbón.	10
Figura 1-5. Transporte de oxígeno desde el seno del fluido hasta la interface carbón-aire	11
Figura 1-6. Daño provocados en el talud por las voladuras de producción y aplicación de las voladuras de contorno (Instituto Tecnológico GeoMinero de España, 2015).	17
Figura 1-7. Influencia de los inhibidores en la energía de activación para la ignición del carbón.	27
Figura 1-8. Imagen térmica sobre un manto de carbón (Huw et al., 2009).	28
Figura 1-9. Horno adiabático utilizado para prueba R_{70}	29
Figura 1-10. Curva de autocalentamiento adiabático R_{70} (B. B. Beamish, 2015).	30
Figura 1-11. Efectos adversos de la combustión espontánea de carbón.	30
Figura 3-1. Clasificación del carbón de acuerdo al porcentaje de materia volátil libre de agua y ceniza (Blandón Montes, 2015).	41
Figura 3-2. Modelo de regresión logística (Rincón, Castrillón, & Rivera, 2016).	52
Figura 3-3. Esquema de ángulo de contacto.	54
Figura 3-4. Equipo utilizado para medir ángulos de contacto.	54
Figura 3-5. Reómetro utilizado para las mediciones de viscosidad.	55
Figura 3-6. Experimento hipotético basado en las leyes de Newton (Universidad de Alicante, 2008).	56

Figura 4-1. Outliers en variables extrínsecas (Mathworks, 1994).	59
Figura 4-2. Outliers en variables intrínsecas (Mathworks, 1994).	60
Figura 4-3. Análisis de componentes principales variables extrínsecas (Mathworks, 1994).	62
Figura 4-4. Análisis de componentes principales variables extrínsecas con transformaciones realizadas (Mathworks, 1994).	62
Figura 4-5. Análisis de componentes principales variables intrínsecas (Mathworks, 1994).	64
Figura 4-6. Análisis de componentes principales variables intrínsecas con transformaciones realizadas (Mathworks, 1994).	64
Figura 5-1. Manto sellado con bitumen en manto de carbón (Mendoza Daza, 2009).	74
Figura 5-2. (a) Ángulo de contacto bitumen 50% diluido con agua, (b) ángulo de contacto bitumen 70% diluido con agua, (c) ángulo de contacto bitumen 100%.	75
Figura 5-3. Zona de clinker en el tajo 100 de Cerrejón (Angel & Herrera, 2004).	77
Figura 5-4. (a) (Izq.) Sellamiento bitumen-agua 70/30 día de la prueba y (Der.) dos meses después, (b) (Izq.) Sellamiento bitumen-agua 50/50 día de la prueba y (Der.) dos meses después.	79
Figura 5-5. (a) (Izq.) Sellamiento con bitumen-salmuera 50/50 día de la prueba y (Der.) dos meses después. (b) (Izq.) Sellamiento con bitumen-salmuera 70/30 día de la prueba y (Der.) dos meses después.	80
Figura 5-6. (a) (Izq.) Sellamiento con suelo cemento día de la prueba y (Der.) dos meses después. (b) (Izq.) Sellamiento con relación 2 a 1 cemento-cal día de la prueba y (Der.) dos meses después. (c) (Izq.) Sellamiento con suspensión de clinker de la prueba y (Der.) dos meses después.	81
Figura 5-7. (a) Ángulo de contacto bitumen 50% diluido con salmuera. (b) Ángulo de contacto bitumen 70% diluido con salmuera.	84
Figura 5-8. Esfuerzo de cizalla vs tasa de cizalladura (OriginLab Corporation, 1992)	86

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1. Clasificación de los grupos macerales del carbón (Blandón Montes, 2015). .	21
Tabla 1-2. Litotipos de los carbones húmicos y sapropélicos (Blandón Montes, 2015). .	22
Tabla 1-3. Minerales que pueden estar presentes en el carbón (Blandón Montes, 2015).	23
Tabla 2-1. Tiempos de las etapas de la reacción de oxidación del carbón.	36
Tabla 3-1. Coordenadas de zona de muestreo.	38
Tabla 3-2. Análisis próximo completo.	42
Tabla 3-3. Resultados del análisis petrográfico (Laboratorio de Carbones- UNAL)	43
Tabla 3-4. Índice de molienda Hardgrove (Laboratorio de Carbones- UNAL).	44
Tabla 3-5. Descripción de las variables utilizadas en el análisis multivariante de datos .	45
Tabla 4-1. Medidas de localización para las variables cuantitativas continuas (Mathworks, 1994).....	58
Tabla 4-2. Variables categóricas y binarias de la base de datos.	65
Tabla 4-3. Resumen de Clasificación K-means (Mathworks, 1994).	66
Tabla 4-4. Modelo de regresión logística variables extrínsecas (RStudio, 2016).	67
Tabla 4-5. Modelo de regresión logística variables intrínsecas (RStudio, 2016).	68
Tabla 4-6. Coeficientes de correlación variables extrínsecas	69
Tabla 4-7. Coeficientes de correlación variables intrínsecas	69
Tabla 4-8. Modelo de regresión logística variables extrínsecas e intrínsecas RStudio, 2016).	70
Tabla 4-9. Variables influyentes en la combustión espontánea y medidas de control. ...	72
Tabla 5-1. Ángulos de contacto bitumen a diferentes concentraciones.	76
Tabla 5-2. Cantidades utilizadas de los productos en cada prueba.	78
Tabla 5-3. Ángulos de contacto bitumen diluido con salmuera.	85
Tabla 5-4. Viscosidad del bitumen en diferentes concentraciones diluido con agua o salmuera.	86

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Significado
A	Amplitud	Amplitud de intervalo modal
$argmax$	Argumento a maximizar	
A_p	Área de la partícula	
b	Coeficiente estequiométrico del carbón	
Btu	Unidad térmica Británica	Energía
$^{\circ}C$	Grados centígrados	Temperatura
CA_c	Concentración de oxígeno en el núcleo del solido	Concentración del gas reactivo
CA_o	Concentración de oxígeno en el seno del fluido	Concentración del gas reactivo
CA_s	Concentración de oxígeno en la interface solido-fluido	Concentración del gas reactivo
C_v	Coeficiente de variación	Medidas de localización
D_1	Frecuencia absoluta premodal	Estadística
D_2	Frecuencia absoluta postmodal	Estadística
dam	Desviación absoluta de la mediana de datos proyectados	Estadística
E_a	Energía de activación	Energía
f	Frecuencia absoluta de clase mediana	Estadística
g	Gravedad	Gravedad
H	Entalpia	Calor

Símbolo	Término	Significado
<i>hd</i>	Coefficiente de difusión	
<i>H_a</i>	Hipótesis alternativa	Prueba de hipótesis
<i>H_o</i>	Hipótesis nula	Prueba de hipótesis
<i>hPa</i>	HectoPascales	Presión
<i>J</i>	Joule	Energía
<i>k</i>	Constante de velocidad	Cinética de la reacción
<i>K</i>	Constante de equilibrio	
<i>kg</i>	Kilogramo(s)	Peso
<i>km</i>	Kilometro(s)	Distancia
<i>L</i>	Litro(s)	Volumen
<i>Li</i>	Límite inferior de la clase modal	
<i>LEL</i>	Límite inferior de explosividad	Concentración de metano
<i>m</i>	Metro(s)	Distancia
<i>mg</i>	Miligramos	Peso
<i>mol</i>	Mol(s)	Concentración
<i>m.s.n.m</i>	Metros sobre el nivel del mar	Altura
<i>Ni</i>	Frecuencia absoluta acumulativa	
<i>M</i>	Moda	
<i>Me</i>	Mediana	
<i>ppm</i>	Partes por millón	Concentración de monóxido de carbono
<i>R</i>	Rango	Constante
<i>rp</i>	Radio partícula	
<i>s</i>	Segundo(s)	Tiempo
<i>S</i>	Desviación estándar	Medida de localización
<i>t</i>	Tiempo	Tiempo
<i>V</i>	Velocidad del cuerpo	Velocidad
<i>Vp</i>	Volumen partícula	
<i>W</i>	Watt(s)	Energía por unidad de tiempo
<i>Z</i>	Proyección de datos univariados	

Símbolos con letras griegas

Símbolo Término

α	Nivel de significancia
β	Valor crítico escogido para asegurar un nivel razonable de error tipo I
ε	Porosidad
μ	Viscosidad
σ	Varianza
ρ	Densidad
τ	Tortuosidad
∇	Gradiente
ϵ	Radio crítico/radio de la partícula

Subíndices y superíndice

Símbolo Término

i	i-ésimo valor
n	Límite superior de los datos
j	j-ésimo valor
b	Boltzmann
M	Posición
s	Sólido
p	partícula

Abreviaturas

Abreviatura Término

Tamb	Temperatura ambiente
HR	Humedad relativa
Atmo	Presión atmosférica
Vaire	Velocidad del aire
O2	oxígeno

Abreviatura Término

<i>CO</i>	Monóxido de carbono
<i>CH₄</i>	Metano
<i>ALT</i>	Altura
<i>RS</i>	Radiación solar
<i>T_{manto}</i>	Temperatura del manto
<i>HTC</i>	Humedad total del carbón
<i>MV</i>	Materia volátil
<i>Na</i>	Sodio
<i>VITR</i>	Vitrinita
<i>LIPT</i>	Liptinita
<i>INERT</i>	Inertinita
<i>IHARD</i>	Índice de Hardgrove

Introducción

Colombia a través del tiempo se ha caracterizado por tener una alta producción de carbón, lo cual se ve reflejado en las 90,5 millones de toneladas que se produjeron en el año 2016 (ANM, 2017). Dentro de los departamentos que aportan a esta producción anual se encuentran Antioquia, Boyacá, Casanare, Cauca, Cesar, Córdoba, Cundinamarca, La Guajira, Norte de Santander, Santander y Valle del Cauca. Cabe resaltar, que de esta producción aproximadamente el 92 % pertenece a la minería a cielo abierto y aproximadamente el 8 % a la minería subterránea (SIMCO, 2017). Para ambos tipos de minería suelen presentarse problemas de combustión espontánea de carbón, por lo que es indispensable implementar una medida eficiente que ayude a controlar esta problemática.

El Cerrejón es la mina de carbón a cielo abierto más grande de Colombia, la cual se encuentra ubicada en el departamento de La Guajira y produjo en el año 2016 alrededor de 32,7 millones de toneladas, aportando el 36,1% de la producción anual de carbón en el país (UPME, 2016). La empresa desde hace muchos años identificó que varios de sus mantos se han estado consumiendo por el fenómeno de combustión espontánea y desde entonces han buscado la manera de controlarlo sin aún encontrar el mecanismo adecuado. Actualmente el proceso de combustión espontánea en la mina Cerrejón se presenta de forma puntual en los frentes de explotación, paredes finales y patios de almacenamiento, siendo uno de los grandes retos que enfrenta la minería, ya que esto representa problemas medio ambientales de gran envergadura, pérdidas significativas de reservas, inestabilidad producto de la afectación geotécnica y problemas de salud por la afectación a las comunidades aledañas (Finkelman, 2004; Kaymakçi & Didari, 2002; Moxon & Richardson, 1985; Ren, Shi, Guo, Zhao, & Bai, 2017). Esto ha llevado a la búsqueda de soluciones, para lo cual se ha partido inicialmente de la identificación de las causas primordiales que interfieren en el proceso, para posteriormente establecer una metodología de prevención eficaz que impida el desarrollo del fenómeno.

La mayor dificultad que existe en el mundo con respecto a esta problemática es que aún no se ha podido identificar de manera clara cuál es el factor o los factores que influyen drásticamente en la generación de combustión espontánea de carbón, y esto se debe a que cada yacimiento presenta características muy diferentes, tanto desde el punto de vista geoestructural, como petrológico y medio ambiental, lo que hace imposible establecer un mecanismo de acción general para todas las minas que presenten dicho fenómeno.

Una de las alternativas para comprender fenomenológicamente la ignición espontánea de mantos de carbón causante de incendios a gran escala, puede observarse a la luz de la ingeniería de las reacciones químicas de sistemas de heterogéneos sólido-gas, donde el carbón forma una interface con el aire atmosférico el cual a su vez es un proveedor de oxígeno. Si consideramos la combustión como un sistema de agregación de tres factores: la energía interna del carbón a través de su potencial calórico, normalmente expresado en la unidad de energía British Thermal Unit (BTU), la concentración de oxígeno en la interface a través del potencial de oxígeno en la fase gas y la energía de activación para configurar el escenario energético de energía mínima para que se produzca la reacción de oxidación del carbón (ver Figura 1-1), se puede evidenciar que la combustión espontánea requiere de un escenario fisicoquímico que aporte la energía de activación para generar la reacción en cadena y la estabilidad de la combustión (Octave Levenspiel, 1986; G. Qi et al., 2015; Szekely, Evans, & Sohn, 1976a).

Figura 1-1. Triángulo de fuego de la combustión espontánea de carbón, a partir de potenciales energéticos.



En la situación particular de la mina del Cerrejón, hace indispensable caracterizar algunos mantos que presenten alta y baja susceptibilidad a la combustión espontánea, con la finalidad de establecer diferencias que permitan conocer el escenario de ignición y poder posteriormente implementar una estrategia que permita desarrollar medidas de prevención y control. Se ha encontrado que la combustión espontánea del carbón es influenciada por muchos factores tanto intrínsecos como extrínsecos como el tamaño de partícula y porosidad en el carbón, la velocidad del aire, concentración de oxígeno, contenido de humedad y materia volátil de carbón, entre otros (B. Beamish, 2015; B. B. Beamish, Barakat, & St. George, 2001; X. Zhao et al., 2013).

Con el desarrollo de esta investigación, se busca contribuir en el sector de la minería, a partir del estudio detallado de las diferentes variables que pueden influir en la combustión espontánea de carbón, identificando plenamente las causas que la generan, y a su vez, conforman un escenario de ignición, para finalmente definir una estrategia de prevención que evite el desarrollo de la reacción de oxidación, de tal manera que no se produzca el autocalentamiento y se favorezca a la combustión espontánea en los mantos de carbón de la mina Cerrejón.

1.Estado del arte

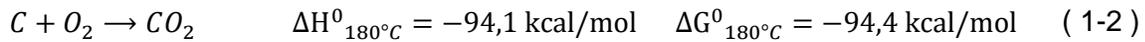
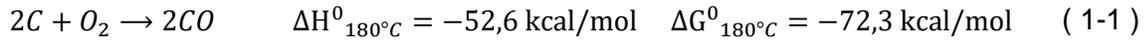
El carbón es el producto del enterramiento prehistórico de material vegetal que se acumula por millones de años bajo las capas de la tierra. El material vegetal cambia su composición física y química y se transforma en carbón (Berranco Melendez, 2011). El carbón es un material combustible de origen sedimentario, compuesto principalmente por una fracción orgánica denominada macérales (Cort, 1978), y también por algunos minerales que se encuentran en menor cantidad, los cuales presentan contenidos de agua y gases en poros submicroscópicos (Gómez Rojas, Carmona Lopez, & Bustamante Rúa, 2007).

El carbón es considerado un material susceptible de combustión espontánea, ya que se caracteriza por tener una temperatura crítica de autocalentamiento, conocida como Self-Heating Temperature (SHT), conocida como la temperatura mínima en la que los materiales se queman de forma espontánea, por tal razón es la temperatura más baja que es capaz de producir una sostenida reacción exotérmica, lo cual hace que en el caso en que se llegue a esta temperatura sin alcanzar el equilibrio térmico, la tasa de oxidación se acelere (Pone, y otros, 2007).

Glasser y Bradshaw (1990) señalaron los 3 elementos cruciales en el proceso de combustión espontánea de carbón (Pone, y otros, 2007):

- La reacción entre el carbón y los reactivos gaseosos que causan calentamiento espontáneo.
- El transporte de la sustancia reaccionante gaseoso en el lecho.
- La tasa de disipación de energía de calor en el lecho.

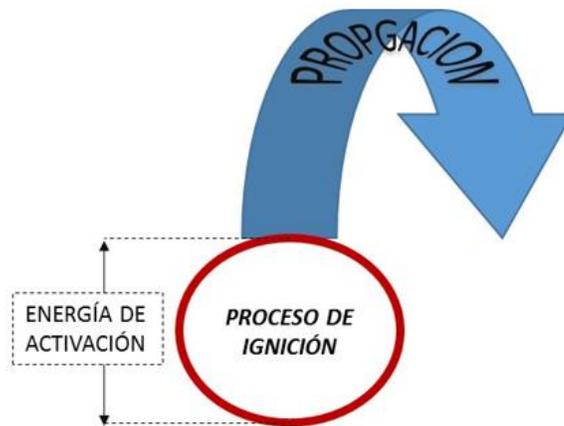
La ignición del carbón es un proceso heterogéneo asociado a una secuencia de reacciones químicas en un sistema sólido/gas como se expresa en las ecuaciones (1-1) y (1-2):



Donde el gas básicamente es el oxígeno disuelto en el aire circundante bajo condiciones fisicoquímicas determinadas (temperatura T, presión P, presión parcial de oxígeno pO₂, % Humedad) y el sólido es el carbón junto con otros minerales caracterizado por: distribución de tamaños de partículas (DTP), área superficial expuesta, entre otros.

En este proceso se requiere que las condiciones establecidas admitan el suministro de una energía de activación mínima y necesaria (aproximadamente 100 KJ/mol) (Wu et al., 2017), como se observa en la Figura 1-1 para que la reacción de oxidación se inicie y ocurra una reacción en cadena de liberación de calor, mediado a través de la entalpía (*H*). El análisis de este proceso es equivalente al fenómeno de “masa crítica” (Bustamante Rúa, 2016a).

Figura 1-1. Etapas del fenómeno de combustión espontánea en los mantos de carbón (Bustamante Rúa, 2016a).



1.1 Reacción de oxidación

La reacción de oxidación expresada anteriormente viene acompañada de una serie de reacciones exotérmicas y endotérmicas en muchos casos (Borghini, 1976; Mantri, Gokarn, & Doraiswamy, 1976; Szekely et al., 1976a):

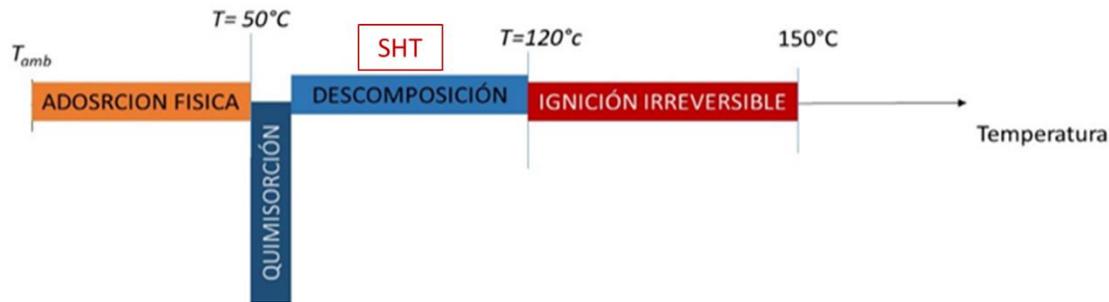
Reacciones exotérmicas**Reacciones endotérmicas**

La oxidación se presenta en cuatro etapas (Pone et al., 2007):

- La primera etapa es la adsorción física de oxígeno, la cual se presenta en un intervalo de temperatura entre 30-50°C, generando un primer aumento de la temperatura relacionado con el calor producido como subproducto de la energía liberada al modificar la superficie del material (Pone et al., 2007). La energía de activación de esta fase no supera los 10 kilocalorías/mol (Bustamante Rúa, 2016b).
- La segunda etapa es la adsorción química también conocida como quimisorción o sorción activada, la cual se inicia a partir de los 50°C de temperatura aproximadamente (Pone et al., 2007), caracterizada por la formación progresiva de compuestos inestables de hidrocarburos y oxígeno conocidos como complejos de peróxido y la energía de activación es mayor a 20 Kilocalorías/mol (Bustamante Rúa, 2016b).
- La tercera etapa es aquella en donde se llega a un punto conocido como la temperatura de calentamiento espontáneo del carbón. En esta los complejos de peróxido que se habían formado, se empiezan a descomponer de forma acelerada en un intervalo de temperatura entre 50-120°C, y específicamente a 70 °C, con el fin de proporcionar oxígeno adicional en las etapas posteriores de la oxidación. Se tiene que a temperaturas más altas, los complejos de peróxido se descomponen a una tasa mayor de la que se forman y los productos gaseosos de reacción química se liberan, como es el caso del monóxido de carbono, dióxido de carbono, vapor de agua, y los ácidos oxálicos, ácidos aromáticos, e hidrocarburos insaturados (Pone et al., 2007; R. V. K. Singh, 2013a).

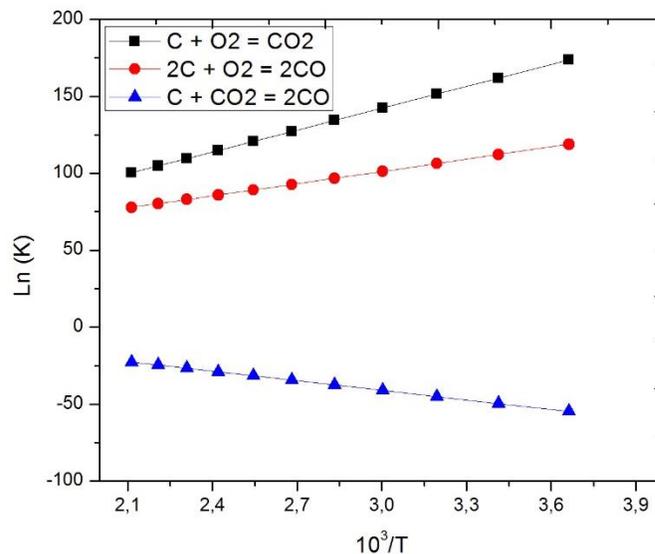
- La cuarta y última etapa se inicia a partir de una temperatura mayor 150°C aproximadamente, donde el proceso de combustión se hace cinéticamente más rápido y es fuertemente irreversible (Pone et al., 2007).

Figura 1-2. Etapas de oxidación (R. V. K. Singh, 2013a).



La reacción de oxidación de carbón es factible, teniendo en cuenta que la constante de equilibrio (K) es muy grande y la presión parcial de oxígeno es cercana a cero, lo que implica que termodinámicamente la reacción ocurre en todo el intervalo de temperatura posible hasta infinito, permitiendo que la reacción sea gobernada por la cinética química. En la Figura 1-3 se presenta la relación de la constante de equilibrio con la temperatura para las reacciones de oxidación del carbón.

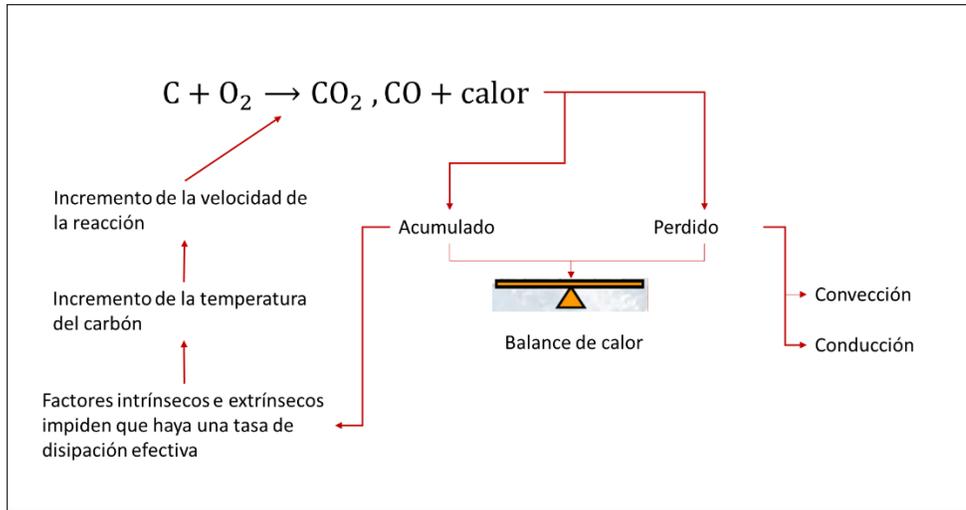
Figura 1-3. Relación de la constante de equilibrio con la temperatura en las reacciones de oxidación del carbón (OriginLab Corporation, 1992).



Se puede observar que para el caso de la reacción de oxidación de carbón donde se produce dióxido de carbono y monóxido de carbono a partir de la interacción del carbón con el oxígeno, los valores de K son muy grandes en el intervalo de temperatura analizado de 0-200 °C donde se presenta comúnmente la oxidación en los mantos de carbón, indicando que la reacción es espontánea y fuertemente irreversible, mientras que la reacción del dióxido de carbono con el carbón para producir monóxido de carbono presenta valores de K muy pequeños, lo que significa que la reacción no es espontánea y por tanto en ese intervalo de temperatura el dióxido de carbono no reacciona con el carbón.

La temperatura en la cual se da la ignición del carbón en condiciones normales donde no se entrega la energía de forma violenta al sistema es alrededor de 160-180°C para carbones bituminosos (R. V. K. Singh, 2013b). Una vez que la temperatura de ignición se alcanza y el carbón comienza a quemarse cualquier aumento en la circulación de aire sólo facilita la cinética de la combustión del carbón.

La liberación de calor producida por la reacción de oxidación permite desarrollar un balance entre la pérdida generada por la transferencia de calor básicamente por conducción y convección, y la acumulación de calor producto de un conjunto de factores que contribuyen a que la tasa de disipación no sea suficiente para mantener el sistema en equilibrio (ver Figura 1-4). Cuando se presenta este escenario se desarrolla un incremento en la temperatura del carbón y a su vez en la velocidad de la reacción. La tasa de oxidación se duplica por cada aumento de temperatura de 10 °C, una vez que la temperatura del carbón supera los 70 °C.

Figura 1-4. Balance de calor generado en el manto de carbón.

La reacción de oxidación propuesta es un proceso heterogéneo que es controlado por la difusión de oxígeno desde el seno del fluido hasta la superficie del carbón, el gas reactivo llega hasta el frente de reacción donde se desarrolla la reacción química (O Levenspiel, 2012)

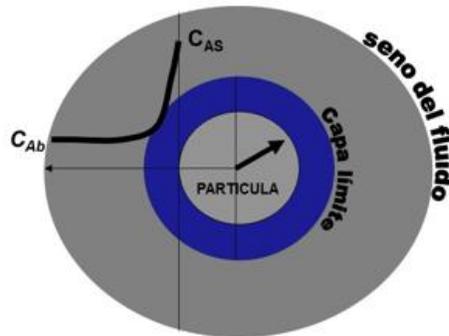
Es importante resaltar que el oxígeno debe difundirse a través de la fase gaseosa, que en este caso es el aire, para mantener las condiciones de concentración adecuadas en la interface carbón-aire. El transporte de oxígeno desde la atmósfera hasta la interface en la reacción de oxidación es controlado básicamente por la difusión del oxígeno en el aire, denotado como $D_{O_2/aire}$ de $2 \text{ cm}^2/\text{seg}$ (Szekely, Evans, & Sohn, 1976b)., seguido de una contradifusión de los productos gaseoso CO y CO_2 , cuyos coeficientes de difusión son del orden de $0,43 \text{ cm}^2/\text{seg}$ (Szekely et al., 1976b). Por otro lado, cuando se presenta la ignición del carbón, se debe considerar la difusión de oxígeno a través de los poros o canales en el lecho poroso producto de la combustión, lo que obliga a definir una difusividad efectiva de oxígeno D_{eff} y contradifusividades de CO y CO_2 a través del lecho poroso, como se expresa en la ecuación (1-8) (Bustamante Rúa, 2016a):

$$D_{eff} = D_{O_2/aire} * \frac{\epsilon}{\tau} \quad (1-8)$$

Donde ϵ es la porosidad y τ la tortuosidad (Szekely et al., 1976b). La difusión del oxígeno, desde el seno de fluido hasta la superficie del carbón, al igual que la contradifusión de los

gases que se presentan como el CO y CO₂ producto de la reacción de oxidación se pueden visualizar en la Figura 1-5.

Figura 1-5. Transporte de oxígeno desde el seno del fluido hasta la interface carbón-aire
Autor: (Bustamante Rúa, 2016a)

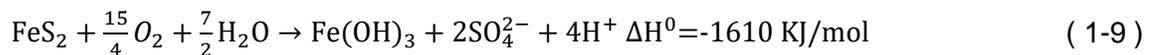


Donde C_{Ab} o C_{Ao} es la concentración del gas reactivo (oxígeno) en el seno del fluido, C_{AS} es la concentración del gas reactivo (oxígeno) en la interface sólido-fluido y C_{Ac} es la concentración del gas reactivo (oxígeno) en el núcleo del sólido (carbón) (Szekely et al., 1976b).

1.2 Teorías de calentamiento espontáneo

Existen algunas teorías que se han desarrollado a partir de múltiples investigaciones, que tratan de explicar las causas del calentamiento espontáneo (P. Singh, 2014). Algunas de estas teorías son las siguientes:

- **Teoría de piritas:** la pirita (FeS_2) presente en el carbón, se oxida al entrar en contacto con el oxígeno del agua liberando calor de acuerdo a la siguiente reacción:



Muzner (1975) encontró que la pirita puede contribuir al auto-calentamiento si está presente en exceso de 5%. Por otro lado, Graham (1923) llegó a la conclusión que además de una concentración mínima de pirita necesaria para contribuir de manera esencial al auto-calentamiento, la presente pirita en el carbón debe estar finamente

dividida en forma de polvo (Dodamani, 2014). El calor y los productos liberados por la reacción rompen el carbón exponiendo así una gran superficie para la oxidación (P. Singh, 2014).

- **Teoría de adsorción de agua:** el agua juega un papel vital en la combustión espontánea de carbón, ya que interactúa con el carbón a través de dos procesos, en el primer proceso, el contenido de humedad en el carbón es expulsado por evaporación durante las primeras etapas de calentamiento (Adamus, Šancer, Guřanová, & Zubiček, 2011; Huw, Sezer, & Kelello, 2009; Villadiego Ruiz, 2000), por lo tanto, una parte del calor es eliminado en vapor de agua en forma de calor latente de evaporación, mientras que el segundo proceso implica la adsorción de vapor de agua desde el aire por el carbón. Este calor de adsorción produce un aumento de la temperatura del carbón (Pone et al., 2007).
- **Teoría de movimientos de tierra:** estos se pueden producir por movimiento de los estratos, trituración del carbón por fricción y energía residual de explosivos, los cuales generan una gran cantidad de calor, que contribuye al calentamiento espontáneo (P. Singh, 2014).
- **Teoría de compuestos iónicos sólidos:** elementos como el sodio que reaccionan espontáneamente en presencia de oxígeno, agua o humedad del aire, desencadenan una reacción muy violenta, contribuyendo a la combustión espontánea y posible propagación.
- **Teoría de interacción carbón-oxígeno:** el complejo peróxido formado en etapas tempranas de oxidación, empieza a descomponerse entre 70-80°C aportando más calor al sistema y produciendo CO, CO₂ y H₂O (P. Singh, 2014).
- **Teoría de macerales:** La susceptibilidad del carbón a la combustión espontánea disminuye con el aumento del contenido de inertinita, mientras que la liptinita contribuye al fenómeno (Moxon & Richardson, 1985). La vitrinita contiene más compuestos no aromáticos que la inertinita, y por lo tanto, se oxida más fácil a bajas temperaturas contribuyendo al calentamiento espontáneo (Dodamani, 2014; Mine Safety Operations Branch Industry and Investment NSW, 2011).

1.3 Factores que influyen en la combustión espontánea de carbón

El fenómeno de combustión espontánea puede ocurrir en un manto, mientras que en otros no, y también se puede presentar el caso que sólo una cierta parte del manto sea susceptible a la combustión espontánea (Carras JN, Day S, Saghafi A, 2005; Huw et al., 2009), por lo tanto, cada factor debe analizarse para predecir la susceptibilidad del manto a la combustión espontánea, y también si es necesario tomar acciones inmediatas, ya que los resultados si no se trata a tiempo pueden ser devastadores (P. Singh, 2014). Existen factores extrínsecos e intrínsecos que pueden influir en cierta forma en la combustión espontánea del carbón (Huw et al., 2009).

1.3.1 Factores extrínsecos

Son aquellas variables externas que no están relacionadas directamente con el carbón, pero juegan un rol importante en la combustión espontánea del mismo.

- **Temperatura ambiente**

Se puede definir la temperatura como el grado de energía térmica medida en una escala definida. La temperatura es una medida de la energía cinética de las partículas que componen un sistema, en este caso el medio ambiente (Cortes Ibarra & Baribay, 2015).

Cuando dos sistemas están a la misma temperatura, se dice que están en equilibrio térmico y no se producirá transferencia de calor. Cuando existe una diferencia de temperatura, el calor tiende a transferirse del sistema de mayor temperatura al de menor temperatura hasta alcanzar el equilibrio térmico (Inzunza R, 2002; Warren M, James P, & Young I, 2008). Por tal razón, si la temperatura ambiente es mayor a la del carbón incide en el calentamiento del manto, favoreciendo la combustión espontánea.

- **Radiación solar**

La radiación solar es conocida también como radiación de onda corta, debido a los valores de longitud de onda en los que se concentra el máximo de emisión de energía solar. La

radiación solar que llega a la atmósfera puede ser dispersada, reflejada o absorbida por sus componentes. Esto depende de la longitud de onda de la energía transmitida y del tamaño y naturaleza de la sustancia que modifica la radiación (Inzunza, 2005). La exposición prolongada de los mantos a la atmósfera, permite la adición de calor externo al carbón, lo cual se ve reflejado en el aumento de la temperatura del mismo (P. Singh, 2014). La radiación solar promedio en los tajos de Cerrejón es aproximadamente $245,6 W/m^2$ según los registros que se tienen en la mina.

▪ **Velocidad y dirección del aire**

El viento a través de movimiento aporta su energía cinética a las paredes del macizo rocoso y paredes finales de la explotación. Se estima que la energía contenida en los vientos es aproximadamente el 2% del total de la energía que alcanza la tierra (Angelone, Garibay, & Cauhapé C., 2006). El contenido energético del viento depende de su velocidad, la cual es baja cerca del suelo, y aumenta rápidamente con la altura. Cuanto más accidentada sea la superficie del terreno, mayor es la oposición que se genera al viento (Universidad de Castilla-La Mancha, 2011).

La velocidad del viento favorece o desfavorece al fenómeno de combustión espontánea de carbón dependiendo del escenario (Zhao, y otros, 2012). Puede favorecer cuando aún no se ha alcanzado la energía de activación para la ignición ayudando a la disipación de calor, pero puede ser desfavorable cuando el fenómeno se encuentra en propagación, ya que es una fuente de oxígeno latente en los frentes que ayuda al desarrollo de la combustión (Guansheng, Deming, Yun, Haihui, & Xuyao, 2014). La velocidad promedio del aire en los tajos de Cerrejón es $3,1 m/s$ y la dirección del viento generalmente es en el sentido norte-sur.

▪ **Estructuras geológicas**

La geología estructural es la rama de la geología que estudia las estructuras geológicas presentes en la corteza de la terrestre. Esta identificación se realiza mapeando y analizando las principales estructuras para determinar factores geológicos a la hora de diseñar obras ingenieriles en minería (Varela, 2014). La presencia de fallas y grietas,

sumadas a la acción del viento, favorecen el calentamiento espontáneo por los mismos mecanismos descritos en la velocidad el viento (P. Singh, 2014). Es importante mencionar que las fallas y grietas también pueden ser producidas por los gases de la combustión en incendios que se desarrollan en profundidad (Kuenzer & Stracher, 2012).

- **Presión atmosférica**

La presión atmosférica es fundamental a la hora de incidir directamente con las precipitaciones, donde el contenido de agua y la humedad pueden contribuir al fenómeno de combustión espontánea del carbón. Por otro lado, las diferencias de presiones favorecen los movimientos en masa, y por lo tanto, puede ayudar a la difusión de oxígeno en las fisuras y grietas del macizo, favoreciendo a la reacción de oxidación (P. Singh, 2014). Hay indicios que señalan que al disminuir la humedad relativa del aire, la incidencia de combustión espontánea en mantos de carbón aumenta. Sin embargo, los cambios en la presión atmosférica parecen ser una causa secundaria de combustión espontánea, como sugiere Sullivan¹³ (Huw et al., 2009).

- **Concentraciones de gases**

El monóxido de carbono (CO) es un gas incoloro, inodoro, no irritante pero sumamente tóxico (Moretton, 1996). Se produce naturalmente por una serie de procesos, sobre todo por la oxidación parcial del metano (CH₄) que se forma en la descomposición de la materia orgánica (Szekely et al., 1976a). En una atmósfera no contaminada la concentración de monóxido de carbono es muy baja y estable (0,1 ppm = partes por millón) (Moretton, 1996).

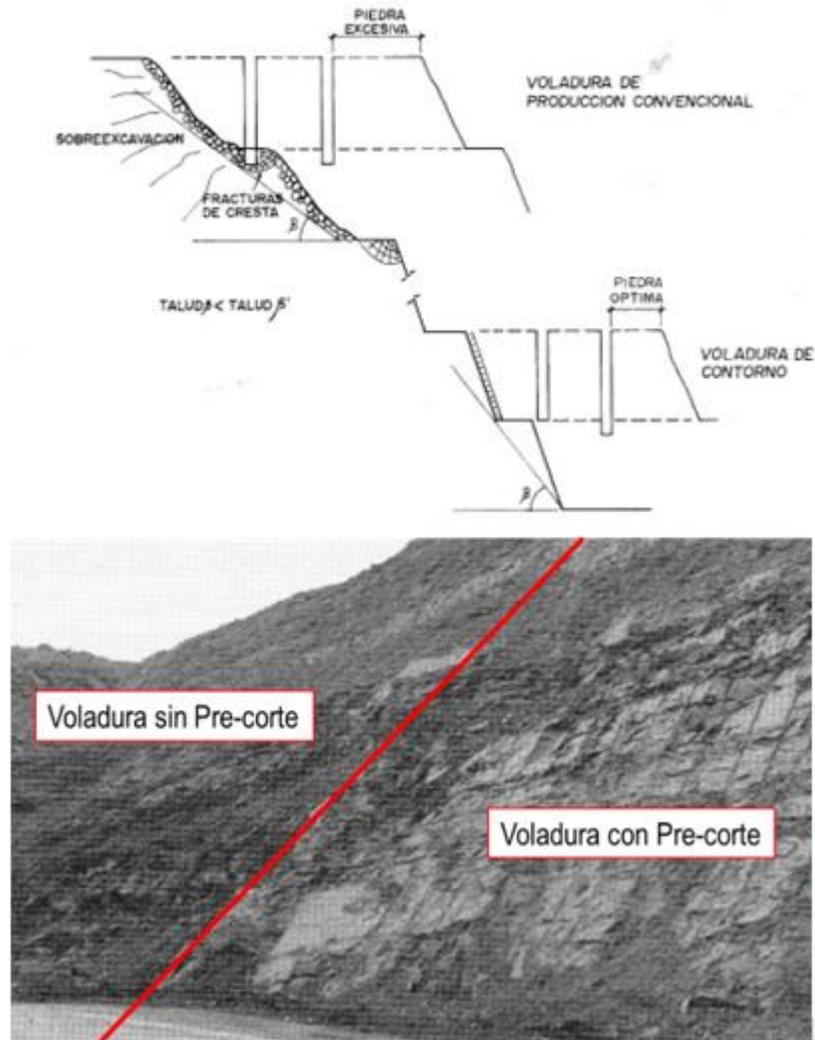
Elevadas concentraciones de monóxido de carbono se generan en la atmósfera debido principalmente a la combustión incompleta de combustibles fósiles (petróleo y derivados, carbón, gas natural). En la mina, la fuente principal de emisión de monóxido de carbono son los motores de combustión interna de la maquinaria, y la generada por la combustión espontánea de carbón. La concentración de CO permite conocer el estado de avance de la combustión, ya que al desarrollarse la reacción se da la liberación de este gas (Deng et al., 2016; Huo et al., 2015). Por otro lado, la concentración de oxígeno es indispensable para que se desarrolle la reacción de oxidación, y esta disminuye a medida que se consume en la reacción.

- **Acción de voladuras**

La energía no aprovechada en el proceso de fragmentación y desplazamiento de la roca, en algunos casos superiores al 85% de la desarrollada en la voladura, reduce la resistencia estructural del macizo rocoso fuera del ámbito de actuación teórica del corte (Instituto Tecnológico GeoMinero de España, 2015; Senneca, Scala, Chirone, & Salatino, 2017). Se crean nuevas fracturas y planos de debilidad y las juntas, diaclasas y planos de estratificación, que inicialmente no eran críticas, al ser abiertas provocan una reducción de la cohesión del macizo. Esto se manifiesta en forma de sobreexcavación, dejando al macizo fracturado en un estado de colapso potencial. Las consecuencias negativas que se derivan de este hecho son las aperturas de nuevas o pre existentes discontinuidades en el macizo rocoso.

Los mecanismos responsables de los fenómenos de sobreexcavación y fracturación del macizo rocoso están estrechamente ligados a los propios de rotura de la roca que se desarrollan durante la voladura (ver Figura 1-6). Para controlar la sobreexcavación debe intentarse mantener niveles de vibraciones en el macizo que no genere fracturamiento y utilizar explosivos adecuados al tipo de roca, para evitar la apertura de fisuras por un exceso de volumen de gases (Instituto Tecnológico GeoMinero de España, 2015; Senneca et al., 2017). La acción de los gases a alta presión y temperatura, abriendo las fracturas preexistentes y las creadas por la onda de compresión, pueden afectar en gran medida al control de la sobreexcavación, por lo que en rocas blandas y muy fracturadas deberán utilizarse explosivos que produzcan un pequeño volumen de gases (Instituto Tecnológico GeoMinero de España, 2015; Senneca et al., 2017).

Figura 1-6. Daño provocados en el talud por las voladuras de producción y aplicación de las voladuras de contorno (Instituto Tecnológico GeoMinero de España, 2015).



Voladura de Precorte: consiste en crear en el macizo rocoso una discontinuidad o plano de fractura antes de disparar las voladuras de producción, mediante una fila de barrenos, generalmente de pequeño diámetro, y con cargas de explosivo desacopladas. El disparo de los barrenos de precorte se puede realizar simultáneamente con los de destroza, pero adelantándose un intervalo de tiempo de 90 a 120 milisegundos.

Voladura Buffer: son voladuras semejantes a las convencionales, donde se ha modificado el diseño de la última fila, tanto en el esquema geométrico que es más reducido como en

las cargas de explosivo que suelen ser menores y desacopladas (Instituto Tecnológico GeoMinero de España, 2015).

Por otro lado, la implementación de detonadores electrónicos ha contribuido a mejorar el control de la voladura, al ser más eficientes al momento de la detonación con tiempo más precisos y con una menor pérdida de energía, la cual es invertida correctamente en la fragmentación de la roca donde se desarrollan los barrenos, generando la menor afectación al macizo rocoso circundante y un control en el nivel de vibraciones. Esto impide la aparición de nuevas grietas y la apertura de fracturas preexistente, evitando el ingreso de oxígeno al macizo y la interacción con el carbón que posibilita la reacción de oxidación y posterior combustión.

Los detonadores electrónicos se caracterizan por permitir un mayor control en los tiempos de retardo, una alta precisión y una mayor eficiencia energética en la voladura, reduciendo la energía desperdiciada en sobreexcavaciones, vibraciones y ruido. A su vez, estos dispositivos garantizan una mayor seguridad durante la ejecución de las voladuras, ya que su iniciación solo es posible mediante una corriente codificada emitida por un explosor compatible con el detonador, con los cuales se puede mantener una comunicación biyectiva, de tal manera que se pueda detectar a tiempo cualquier inconveniente que se presente en el proceso (Revista seguridad minera, 2018).

1.3.2 Factores intrínsecos

Son aquellas variables que están relacionadas propiamente con el carbón y tienen un impacto sobre el fenómeno de combustión espontánea.

- **Humedad del carbón**

De acuerdo al análisis próximo, se puede encontrar una humedad total, la cual considera toda la humedad contenida dentro y sobre la muestra de carbón, siendo la suma de la pérdida de humedad por secado al aire y la humedad residual, ajustada a la base como se recibió según la norma ASTM D-121. Por otro lado, se tiene que la humedad residual es la que se encuentra remanente en la muestra de carbón después de haber sido secada al

aire. Esta es obtenida por determinación de la pérdida de masa de una muestra de carbón secada al aire y calentada entre 104°C y 110°C a condiciones específicas de tiempo de residencia, atmósfera, masa de la muestra y configuración de equipos según la ASTM D-121 (Bravo Rodriguez, 2014) (Cort, 1978). Se han encontrado estudios que indican que las velocidades de calentamiento inicial a temperatura ambiente son altas para carbones con alto contenido de humedad (Adamus et al., 2011; Huw et al., 2009; Villadiego Ruiz, 2000).

- **Ceniza**

Las cenizas del carbón son el residuo que queda después de la ignición de las sustancias combustibles, determinado por métodos estandarizados en la norma ASTM D 3174-04. La cantidad de cenizas de un carbón es un indicativo de la cantidad de minerales que contiene un carbón, teniendo en cuenta que el porcentaje de cenizas de un carbón no es igual al porcentaje de minerales del mismo (Cort, 1978). Estas se pueden clasificar en 3 tipos (ASTM D 3174-04): cenizas de sustancias inherentes que incluyen elementos inorgánicos combinados con la sustancia orgánica del carbón. Estas tienen un origen sin genético y proviene de la materia vegetal a partir de la cual se generó el carbón, cenizas de materia mineral como las arcillas, carbonatos, sulfuros, óxidos, cuarzo, fosfatos y minerales pesados y accesorios; y cenizas de dilución u operaciones representadas por los materiales estériles de los respaldos del manto o las intercalaciones de roca, que durante la operación minera se arrancan conjuntamente con el carbón.

- **Materias volátiles**

Son los productos gaseosos excluyendo el vapor de agua que se liberan del carbón durante el calentamiento, bajo condiciones específicas de ensayo estipuladas en la norma ASTM D 121. Los constituyentes gaseosos son principalmente hidrógeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono, sulfuros de hidrogeno, metano, amoníaco, benceno, tolueno, naftaleno y vapores de alquitranes. El porcentaje de materias volátiles del carbón se determina según la norma ASTM D3175-02 e ISO 562, estableciendo la pérdida de peso que se genera al calentar el carbón bajo condiciones estrictamente controladas (Cort, 1978). La materia volátil aumenta la susceptibilidad del carbón a la combustión espontánea reduciendo la temperatura de ignición del carbón (Gupta, 1990; Wu et al., 2017).

- **Poder calorífico**

Para el análisis del poder calorífico, se analiza el calor producido por combustión de una cantidad unitaria de una sustancia. Esta generalmente se expresa en unidades térmicas británicas (BTU) por libra o en calorías por gramo (Cal/g) o en el sistema Internacional de Unidades, en julios por gramo, (J/g), cuando se requiera. El poder calorífico representa la energía de combustión del carbono e hidrógeno de la materia orgánica y del azufre pirítico y en parte del orgánico. La determinación del poder calorífico consiste en quemar completamente una muestra de 1 gramo de carbón en una bomba herméticamente cerrada y llena de oxígeno a una presión entre 20 y 30 atmósferas (Cort, 1978).

- **Azufre**

El azufre se presenta en el carbón combinado con la materia orgánica, en los minerales acompañantes, como la pirita la marcasita y como sulfato. El azufre se encuentra en los carbones en proporciones variables desde 0.1% hasta más del 10% es uno de los constituyentes del carbón más preocupantes y problemáticos no solo económicamente sino también por sus efectos contaminantes. El azufre se presenta entonces en el carbón en tres formas: azufre pirítico, azufre de sulfato y azufre orgánico. La suma de estas tres formas configura el azufre total. El azufre orgánico está finamente distribuido y es imposible separarlo por medios físicos del carbón. El azufre de pirita se puede separar en los procesos de molienda y lavado, si los granos framboidales son lo suficientemente grandes (Huw et al., 2009; P. Singh, 2014). El azufre de sulfato no es combustible y pasa directamente a las cenizas. La determinación del porcentaje de azufre total del carbón se efectúa a partir de la aplicación de la norma ASTM D 4239-04a, para el cual se utiliza un horno de combustión de alta temperatura con detección infrarroja (Cort, 1978).

- **Macerales**

Los macerales se definen como los constituyentes orgánicos del carbón que son reconocibles microscópicamente. Los macerales que componen el carbón pueden ser identificados en carbones de todos los rangos. Los macerales con base en el poder reflector se clasifican en tres grupos: vitrinitas / huminitas para materiales leñosos (tallos y leños), liptinitas / exinitas para esporas, resinas y cutículas, e inertinitas para material de

plantas oxidadas (Blandón Montes, 2015). Los distintos macerales se distinguen entre sí por su poder reflector, la forma, la estructura, el color, la anisotropía, la fluorescencia, el relieve (dureza al desbastado y pulimento), la microdureza. La clasificación de los grupos macerales ha sido propuesta por distintos autores entre ellos, Stopes – Heerlen, 1935 en Thomas, 2002, McCabe, 1984 en Thomas, 2002, ICCP, 1998 Bustin, 1985, ICCP, 1994. (ver Tabla 1-1).

Tabla 1-1. Clasificación de los grupos macerales del carbón (Blandón Montes, 2015).

Grupo	Maceral
1. Vitrinita	1.1. Telinita
	1.2. Collotelinita (Telocolinita)
	1.3. Vitrodetrinita
	1.4. Collodetrinita (Desmocolinita)
	1.5. Corpogelinita (Corpocolinita)
	1.6. Gelinita (Gelocolinita)
2. Liptinita	2.1. Esporinita
	2.2. Cutinita
	2.3. Resinita
	2.4. Alginita
	2.5. Liptodetrinita
	2.6. Fluorinita
	2.7. Bituminita
	2.8. Exsudatinita
	2.9. Suberinita
3. Inertinita	3.1. Fusinita
	3.2. Semifusinita
	3.3. Funginita
	3.4. Secretinita
	3.5. Macrinita
	3.6. Micrinita

Para la descripción física de los carbones, se tienen en cuenta los litotipos, los cuales son capas identificables macroscópicamente en los mantos de carbón. Los diferentes litotipos que se presentan normalmente en los carbones húmicos y sapropélicos cuentan con características que los distinguen (Ver Tabla 1-2).

Tabla 1-2. Litotipos de los carbones húmicos y sapropélicos (Blandón Montes, 2015).

Litotipo	Descripción	Composición
Vitreno	Carbón negro muy brillante en capas delgadas, fractura cúbica, capas densas con fractura concoidea	Maceral vitrinita con menos de 20% de liptinita
Clareno	Capas finamente estratificadas de vitreno, durenno y en algunos casos fuseno semibrillante	Variable
Durenno	Gris a negro, opaco, superficies de fractura rugosas	Principalmente macerales del grupo de la inertinita y la liptinita
Fuseno	Negro, lustre sedoso, friable y blando	Principalmente el maceral fusinita
Carbón Cannel	Negro, opaco, lustre graso, fractura concoidea	Finas partículas macerales, representadas predominantemente por esporinitas
Carbón Boghead	Negro o pardo, opaco, homogéneo, fractura concoidea, el lustre puede ser graso	Predominantemente alginitas

La materia mineral del carbón constituye la fracción no combustible y es definida como la suma de los minerales y de materia inorgánica asociada al carbón, dentro de los cuales se encuentran las sales disueltas contenidas en el agua de poros del carbón, los elementos inorgánicos asociados a los macerales y las partículas inorgánicas cristalinas o no cristalinas que representan los minerales. Los granos individuales que hacen parte de los minerales en el carbón varían desde menos de una micra hasta cientos de micras, existiendo un grupo en particular de minerales que se presentan comúnmente (Ver Tabla 1-3).

Tabla 1-3.Minerales que pueden estar presentes en el carbón (Blandón Montes, 2015).

Clase	Nombre		
Sulfuros	Pirita	Calcopirita	Esfalerita
	Marcasita	Galena	Pirrotita
Cloruros	Halita	silvita	Bischofita
óxidos e hidróxidos	Cuarzo	Diáspora	Rutilo
	Hematita	Goethita	Limonita
	Magnetita		
Carbonatos	Calcita	Ankerita	Dolomita
	Siderita		
Sulfatos	Yeso	Bassanita	Mirabilita
	Anhidrita	Jarosita	Tenardita
	Barita	Kieserita	
Fosfatos	Apatita		
Minerales arcillosos	Kaolinita	Clorita	Illita
	Montmorillonita		

▪ Índice de molienda Hardgrove

El índice de moliendabilidad "Hardgrove" es un número empírico que relaciona la facilidad con la cual un carbón puede ser molido; esta evaluación se fundamenta en la ley de "Rittinger", cuyo enunciado es el siguiente "el trabajo necesario para moler un carbón es proporcional a las nuevas superficies de grano formadas". El intervalo de valores del índice Hardgrove va desde 20 hasta 110, entre más bajo sea el índice del carbón, presenta mayor dificultad para ser molido y en consecuencia la energía necesaria para alcanzar el tamaño de grano deseado es grande. Por lo anterior, valores altos del índice Hardgrove en general presentan pocos problemas durante la molienda, pero son el indicativo de otros problemas, como son los asociados a la friabilidad de los carbones. Un intervalo de valores típicos para el índice Hardgrove está entre 50 y 55 unidades, pero este intervalo puede ser ampliado de 45 a 60 unidades (SGS, 1995).

El método estándar a seguir para medir la moliendabilidad consiste en moler una muestra a un tamaño de partícula entre 600 micras–1,18 mm durante un periodo de tiempo de 60 revoluciones, lo anterior se lleva a cabo en un mini pulverizador de anillo con bolas. La masa de material con tamaño de partícula menor a 75 micras es una medida de la superficie nueva producida. El molino es calibrado con carbones estándares, sobre un intervalo de unidades Hardgrove entre 40-100 unidades. El índice de Hardgrove es determinado de acuerdo con la ecuación (1-10) (SGS, 1995):

$$IHARD = 13 + 3,465M < 75 \text{ micras} \quad (1-10)$$

El índice de molienda Hardgrove se desarrolla de la siguiente manera: se toma una muestra de 50 gramos de carbón preparado de tamaño uniforme, el cual se lleva a un molino. A este se le establecen revoluciones estandarizadas y una determinada presión. Las bolas de acero dentro del molino se encargan de la molienda de la muestra de carbón. Los finos de carbón se clasifican, y la cantidad de carbón menor que un tamaño especificado se registra y se convierte en el valor del índice de molienda Hardgrove (SGS, 1995).

1.4 Métodos utilizados en el mundo para la prevención de la combustión espontánea en minas de carbón a cielo abierto

Dentro de los mecanismos que se ha encontrado para controlar el tema de la combustión espontánea de carbón en paredes altas, consiste en la reducción y eliminación de oxígeno del proceso, con el fin de que no se pueda dar el contacto entre el carbón y el oxígeno que facilite la reacción. Esto se puede lograr a través de múltiples alternativas.

1.4.1 Agentes sellantes

El revestimiento de la pared alta es la técnica que busca evitar el contacto del oxígeno y el carbón, impidiendo la reacción de oxidación y en últimas el autocalentamiento de la pared. En este sentido, se logra un control de la temperatura y la velocidad de reacción. En

algunos lugares se ha llegado a revestir o cubrir los sitios de mayor calentamiento con arena (Phillips, 2011).

Se han realizado trabajos de investigación y desarrollo en diferentes partes del mundo sobre inhibidores químicos para contrarrestar el calentamiento espontáneo en minas de carbón. Tarpagosova probó la acción inhibidora de la oxidación de varios reactivos sobre el carbón y encontró que los productos derivados del petróleo y sus emulsiones eran bastante efectivos, mientras que los ácidos grasos y algunos otros agentes sólo mostraron menores aportes (R. V. K. Singh, 2013b). Nakano y Yamski afirmaron haber obtenido resultados alentadores aplicando una espesa capa de emulsión de asfalto sobre la superficie del carbón (R. V. K. Singh, 2013b).

Se llevó a cabo un ensayo con una capa de alquitrán y emulsión móvil quemada, en la proporción de 1:3 sobre una pared de un banco de Jhingurda MP, India, y se obtuvo que aumentó considerablemente el período de generación de incendio. Pero el principal inconveniente de estos agentes es que inducen un mayor riesgo de contacto con el fuego y no se puede utilizar en un punto caliente o incendio cercano. Sin embargo, estos agentes se han mejorado al hacerlos resistentes al fuego, lo que ofrece una buena promesa como agente protector. Por consiguiente, el Instituto Central de Investigación de Minas y Combustibles, de Dhanbad, India, desarrolló un material de revestimiento protector contra incendios basado en emulsión catiónica (bajo el proyecto S & T, financiado por el Ministerio de Carbón de la India) para prevenir el calentamiento espontáneo en las minas de carbón. Por lo tanto, ayudaría no sólo a ahorrar una enorme cantidad de carbón perdido cada año debido al incendio en las minas de carbón, sino también en la minimización de la contaminación ambiental. La eficacia del revestimiento ha sido bien demostrada mediante rigurosos estudios a escala de laboratorio, así como ensayos de campo en bancos de carbón en el proyecto a cielo abierto de Karkatta, Dakra (CCL), proyecto a cielo abierto de Jagannath, Talcher (MCL) y Jhingurdah opencast project, Singrauli (NCL) Carbón de alta susceptibilidad de calentamiento espontáneo (R. V. K. Singh, 2013b).

Estos estudios han confirmado que un material de recubrimiento protector contra incendios tiene las siguientes ventajas: (i) ofrece buena resistencia al incendio (ii) evita la penetración de aire y (iii) no forma grietas y permanece intacto un largo período de tiempo (más de un

año). Además, es fácil de pulverizar y es muy compatible con el carbón (R. V. K. Singh, 2013b).

1.4.2 Buffer Blasting

Es una técnica aplicada durante la perforación y voladura, la cual consiste en dejar las últimas filas de barrenos con menor cantidad de explosivo o incluso sin carga, para evitar que en las voladuras las grietas se propaguen a través del banco y permitan la entrada de oxígeno (R. V. K. Singh, 2013b). En el “*buffer blasting*” los detonadores no son usados en el fondo de los barrenos para evitar grietas hacia el fondo de la pared alta. Además, es indispensable conocer la temperatura en el barreno si estos van a ser cargados, puesto que si está se encuentra por encima de los 60°C puede provocar una iniciación temprana generando grietas en la pared alta.

Algunas consideraciones adicionales de los lugares en donde se ha implementado este método son las siguientes:

- En la mina Middlesburge en Australia para un corte de 60 metros, se deja un Buffer de 15 metros.
- En la mina ATCOM Colliery utilizan un tamaño de buffer mediante una relación con la altura del banco (Huw et al., 2009):

$$Size\ of\ Buffer = 0.75 * Altura\ del\ Banco \quad (1-11)$$

- Los barrenos son sellados inmediatamente se hace la perforación para evitar la entrada de oxígeno al banco.
- Disminuir el tiempo de exposición de los mantos de carbón.

1.4.3 Implementación de inhibidores

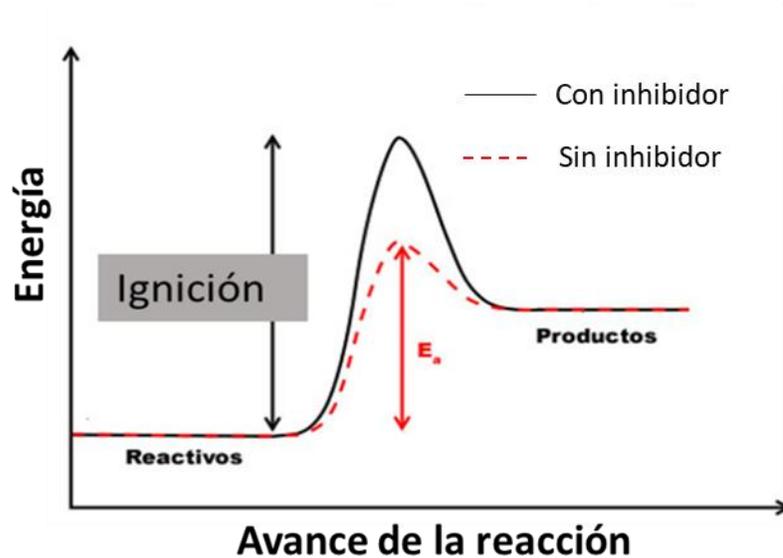
Otra alternativa que se ha implementado para prevenir la combustión espontánea de carbón fue reportada por Panigrahi en sus investigaciones, la cual consiste en el uso de inhibidores en minería a cielo abierto (Phillips, 2011). La clasificación de estos inhibidores es la siguiente:

- Monovalente como el cloruro de sodio, cloruro de potasio y cloruro de litio

- Bivalentes como el cloruro de magnesio, cloruro de zinc, cloruro de calcio, sulfato de magnesio, sulfato ferroso y fosfato de magnesio
- Trivalentes como el clorato de hierro y el sulfato de hierro.

Estos inhibidores se caracterizan principalmente por aumentar la energía de activación que se requiere para que ocurra la reacción de combustión (ver Figura 1-7), por tanto, la temperatura que debe alcanzar el carbón para la ignición es mayor y se dificulta que el carbón logre una temperatura donde la temperatura del manto comienza a exceder la temperatura ambiente (Crossing point temperature)(Xuyao, Wang, Milke, & Zhong, 2011; H. Zhao, Yu, Liu, & Tahmasebi, 2015).

Figura 1-7. Influencia de los inhibidores en la energía de activación para la ignición del carbón.

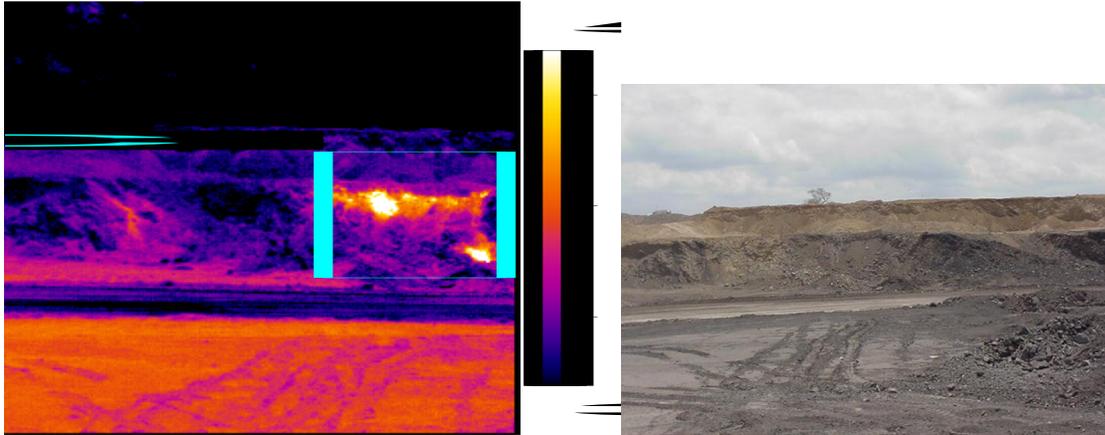


1.5 Métodos para detectar el autocalentamiento en el carbón

Existen dos métodos efectivos a la hora de detectar el aumento de temperatura en paredes altas en minería de superficie. El primero se basa en el uso de cámaras de infrarrojos que permiten obtener imágenes termales, tal como se muestra en la Figura 1-8, las cuales pueden ser muy útiles a la hora de detectar el calentamiento cerca de la superficie (R. V.

K. Singh, 2013b). Con la implementación de este método se busca tener un constante monitoreo de las temperaturas en la pared alta.

Figura 1-8. Imagen térmica sobre un manto de carbón (Huw et al., 2009).



El otro método identificado para la detección de combustión espontánea es a través del olor generado por la emanación de gases producto de la oxidación del carbón, los cuales representan un peligro, debido a la asfixia, envenenamiento y riesgo de explosiones. (R. V. K. Singh, 2013b).

Por otro lado, se ha utilizado la técnica de microcalorimetría para observar el comportamiento térmico de carbones de diferentes rangos, lo que ha ayudado a evidenciar que parámetros cinéticos como la energía de activación se encuentran en constante cambio en el proceso de oxidación del carbón (G. Qi et al., 2015)

1.6 Método para determinar la susceptibilidad de los carbones a la combustión espontánea

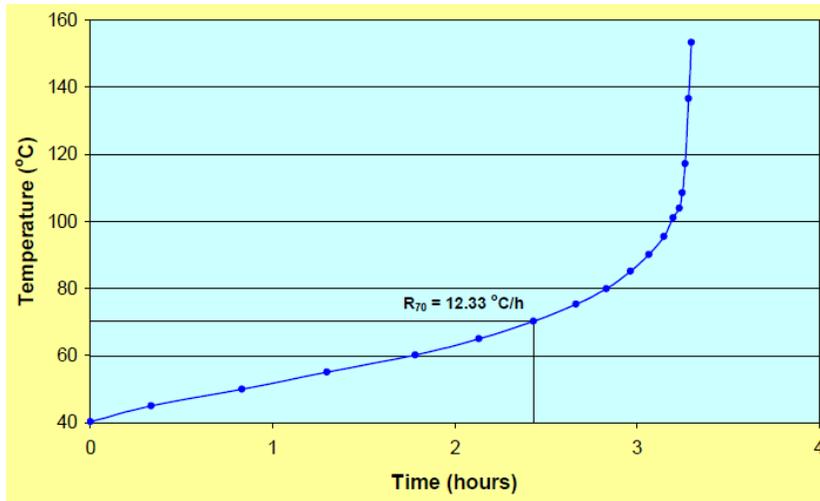
El método R_{70} es una prueba que se ha implementado en el laboratorio para determinar la susceptibilidad de los carbones a la combustión espontánea (B. B. Beamish, 2015; X. Qi, Xin, Wang, & Qi, 2013). Esta prueba consiste en tomar una muestra de 150 gramos de carbón triturado con un tamaño menor a 212 micras, el cual es secado en nitrógeno a una temperatura de 110 °C durante al menos 16 horas y luego se enfría a 40 °C. El carbón es

llevado a un horno adiabático con una temperatura de $40^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ (ver Figura 1-9). Se mantiene un flujo de oxígeno de 50 mililitros/minuto, y los cambios de temperatura quedan registrados en la computadora (B. B. Beamish, 2015). Finalmente, se tienen los valores de R_{70} determinados como la tasa promedio de autocalentamiento de 40°C a 70°C , expresada en $^{\circ}\text{C}/\text{hora}$.

Figura 1-9. Horno adiabático utilizado para prueba R_{70} .



Se tiene que valores de R_{70} inferiores a $0,5^{\circ}\text{C}/\text{hora}$ son para carbones poco propensos a la combustión espontánea, entre $0,5-0,8^{\circ}\text{C}$ tienen una propensión media y con valores superiores a $0,8^{\circ}\text{C}$ presentan alta propensión (B. B. Beamish, 2015; X. Qi et al., 2013). En la Figura 1-10 se muestra la curva de autocalentamiento adiabático R_{70} para un carbón bituminoso altamente volátil.

Figura 1-10. Curva de autocalentamiento adiabático R_{70} (B. B. Beamish, 2015).

1.7 Efectos adversos de la combustión de carbón

La combustión espontánea de carbón en los diferentes escenarios donde se presenta trae consigo diversos efectos adversos, los cuales se resumen en la Figura 1-11 y se describen a continuación:

Figura 1-11. Efectos adversos de la combustión espontánea de carbón.

-
- **Impactos ambientales:** relacionados con las emisiones de gases de efecto invernadero como el monóxido de carbono (CO) y el dióxido de carbono (CO_2), gases generadores de lluvia ácida (dependiendo del contenido de azufre del carbón), la emisión de olores fétidos producto de la concentración de SO_3 y la emisión de material particulado (Pone, y otros, 2007).
 - **Pérdidas de reservas:** relacionadas con el consumo de carbón como parte de la reacción de oxidación o combustión, teniendo en cuenta que existan zonas dentro de la mina donde se presente el fenómeno que pueden ser aprovechadas a futuro.
 - **Seguridad:** se refiere a la afectación geotécnica por inestabilidad de las paredes a largo plazo, de la infraestructura y condiciones de seguridad en la mina.
 - **Financieros:** se refiere a la afectación en la productividad por cargue de material caliente y daños de componentes de equipos por las altas temperaturas, altos costos operativos para controlar y sofocar los incendios, los cuales actualmente son más de 150 por año.
 - **Legales:** tiene que ver con los problemas causados con el no cumplimiento del marco normativo que respecta al cierre de minas.
 - **Imagen:** generación de una visión negativa sobre la compañía ante los entes gubernamentales y la sociedad.

2.Determinación de la etapa controlante en la reacción de oxidación

Desde el punto de vista de los sistemas de reacciones heterogéneas, la oxidación del carbón es un proceso encadenado a varios procesos a su vez (Borghini, 1976; Octave Levenspiel, 1986; Szekely et al., 1976a):

- Transporte de oxígeno desde el seno de la atmósfera hasta el frente de reacción (ver Figura 1-5)
- Reacción química de oxidación del carbón y reducción del oxígeno para formar CO, CO₂.
- Contradifusión de gases de producto de reacción (CO, CO₂).

La etapa controlante del proceso de oxidación del carbón de forma general, se puede partir del análisis de ciertas condiciones a escala micro que puedan reflejar de cierta forma el comportamiento real de lo que sería a escala macro un manto de carbón.

En este caso, el análisis se realizará para partículas de carbón esféricas de 1 cm de diámetro y una placa de carbón de longitudes igual a 1 cm, teniendo en cuenta la reacción de oxidación del carbón donde se produce dióxido de carbono. Los controles pueden ser a causa de la reacción química o por los procesos difusionales de oxígeno hasta la superficie del carbón (Szekely et al., 1976b).

2.1 Control por reacción Química

La ecuación (2-1) es la que rige la conversión del carbón cuando esté presente poca o nula porosidad (Bustamante Rúa, 2016a; Szekely et al., 1976a):

$$t^* = \frac{bk}{\rho} \cdot \left(\frac{A_p}{3V_p} \right) \left(C_{AS} - \frac{C_{CS}}{K_E} \right) t \quad (2-1)$$

Nota: En la reacción de oxidación de carbón la constante de reversibilidad tiende a cero, puesto que el carbón se va consumiendo y generando a su vez CO₂ en el caso de la combustión completa. En este sentido, la constante de equilibrio (KE) es muy grande, obteniéndose la ecuación (2-2) para el caso de la partícula esférica y la ecuación (2-3) para el caso de la placa.

$$t^* = \frac{bk}{\rho_s} \left(\frac{A_p}{3V_p} \right) (C_{AO}) t \quad (2-2)$$

$$t^* = \frac{bk}{\rho_s L} (C_{AO}) t \quad (2-3)$$

Tomando como base la reacción química se tiene que $b = 1$ (coeficiente estequiométrico de C), la constante forward $k = 12$ cm/seg y la densidad del carbón es aproximadamente $\rho_s = 1.4 \text{ g/cm}^3 = 0.116 \text{ mol/cm}^3$. A su vez se tiene que la ecuación es de primer orden (Bustamante Rúa, 2016a; Szekely et al., 1976a).

La concentración del oxígeno en el seno de la solución se puede calcular a partir de la presión atmosférica, la temperatura y la constante de los gases.

$$C_{AO} = \frac{n}{v} = \frac{P}{RT} = \frac{1 \text{ atm}}{82,05 \frac{\text{atm cm}^3}{\text{mol K}} \cdot 453 \text{ K}} = 2,692 \times 10^{-5} \frac{\text{mol}}{\text{cm}^3} \quad (2-4)$$

Para el diámetro de 1 cm, la conversión completa para la partícula esférica de carbón es $t^* = 1$.

$$t = \frac{1}{\frac{bk}{\rho_s} \left(\frac{1}{r_p} \right) (C_{AO})} = \frac{\rho_s r_p}{bk C_{AO}} \quad (2-5)$$

Reemplazando los valores se obtiene el tiempo de conversión completa para el caso de la partícula esférica de carbón:

$$t = \frac{1}{\frac{1 \cdot 12}{0,116} \cdot \left(\frac{1}{0,5} \right) (2,692 \cdot 10^{-5})} = \frac{1}{0,0042} = 180,6 \text{ segundos} = 3 \text{ min} \quad (2-6)$$

Por otro lado, para las longitudes de 1 cm en el caso de la placa, la conversión completa se alcanza cuando $t^* = 1$.

$$t = \frac{1}{\frac{bk}{\rho_s} \left(\frac{1}{L}\right) (C_{AO})} = \frac{\rho_s L}{bk C_{AO}} \quad (2-7)$$

Reemplazando los valores se obtiene el tiempo de conversión completa para el caso de la partícula esférica de carbón:

$$t = \frac{0,116 \cdot 1}{1 \cdot 12 \cdot 2,692 \cdot 10^{-5}} = 360 \text{ segundos} = 6 \text{ minutos} \quad (2-8)$$

2.2 Control por difusión del oxígeno a través del film o película gaseosa

La ecuación (2-9) es la que determina la razón del carbón que ya ha reaccionado cuando el coeficiente de difusión h_d es función del radio característico r_c (Bustamante Rúa, 2016a; Szekely et al., 1976a).

$$t^* = \frac{2bD_{O_2}}{\rho_s r_p^2} \left(C_{AO} - \frac{C_{CO}}{K_E} \right) \frac{K_E}{1 + K_E} t \quad (2-9)$$

Se conoce que la constante de equilibrio K_E por ser una reacción irreversible tiende a infinito, obteniéndose la ecuación (2-10) para la partícula esférica de carbón y la ecuación para la placa plana:

$$t^* = \frac{2bD_{O_2}}{\rho_s r_p^2} (C_{AO}) t \quad (2-10)$$

$$t^* = \frac{2bD_{O_2}}{\rho_s L^2} (C_{AO}) t \quad (2-11)$$

En la conversión completa de la partícula esférica $t^* = 1$, por tanto se obtiene la ecuación (2-12):

$$t = \frac{\rho_s r_p^2}{(2bD_{O_2})(C_{AO})} \quad (2-12)$$

Se tiene que $r_{p(1cm)} = 0,5 \text{ cm}$, partiendo que el diámetro de la partícula esférica de carbón es de 1 cm:

$$t = \frac{0,116 \cdot 0,5^2}{(2 \cdot 2 \cdot 1)(2,692 \cdot 10^{-5})} = 269,3 \text{ seg} = 4,5 \text{ min} \quad (2-13)$$

En la conversión completa de la placa $t^* = 1$, por tanto se obtiene:

$$t = \frac{\rho_s L^2}{(2bD_{O_2})(C_{AO})} \quad (2-14)$$

Se tiene que la longitud de la placa de carbón es de 1 cm:

$$t = \frac{0,116 \cdot 1^2}{(2 \cdot 2 \cdot 1)(2,692 \cdot 10^{-5})} = 1083,4 \text{ seg} = 18 \text{ min} \quad (2-15)$$

Según el análisis realizado se puede apreciar que la etapa controlante tanto en el caso de la partícula esférica como en la placa de carbón, es la difusión de oxígeno en la película gaseosa hasta la superficie del carbón, ya que representa el mayor tiempo empleado para que ocurra la reacción (ver Tabla 2-1). Se encontró que los tiempos de difusión de oxígeno como de reacción química son diferentes para los dos casos analizados, lo que indica que la geometría es muy importante en la cinética de la reacción. Por tanto, cuando se presentan partículas esféricas en el ambiente, las cuales pueden estar relacionadas con polvo de carbón, la cinética de la reacción es mayor que cuando se tiene una placa que se asemeja a un manto de carbón. Finalmente, se puede deducir que debido a que los mantos de carbón alcanzan temperaturas altas en la reacción de oxidación, los procesos controlantes son los procesos difusionales.

Tabla 2-1. Tiempos de las etapas de la reacción de oxidación del carbón.

Etapa	Tiempo (minutos)
Control por reacción química - partícula esférica	3
Control por difusión del oxígeno a través de la película gaseosa - partícula esférica	4,5
Control por reacción química - placa	6
Control por difusión del oxígeno a través de la película gaseosa - placa	18

3. Metodología

3.1 Descripción de las zonas de muestreo

Los frentes de explotación se escogieron según el grupo técnico de control de incendios de la compañía, discriminando dos zonas que son importantes para el posterior análisis de datos, la primera es una zona de poca susceptibilidad a combustión espontánea (PSCE) y la segunda es una de alta susceptibilidad a combustión espontánea (ASCE). Definiéndose de la siguiente manera:

- **PSCE:** zona donde se encuentra un manto de carbón que ha tenido baja frecuencia de combustión espontánea. El grupo de control lleva el registro de los inventarios de los incendios y por su historia se sabe que ha tenido poca repercusión por el fenómeno de combustión espontánea.
- **ASCE:** zona donde se encuentra un manto de carbón que ha tenido alta frecuencia de combustión espontánea. El grupo de control lleva el registro de los inventarios de los incendios y por su historia se sabe que ha tenido alta repercusión por el fenómeno de combustión espontánea.

Se seleccionaron 14 puntos, los cuales se describen en la Tabla 3-1, mostrando las coordenadas geográficas, los puntos de muestreos como se definieron para el análisis estadístico de acuerdo con la susceptibilidad.

Tabla 3-1. Coordenadas de zona de muestreo.

Tajo	Punto de muestreo	Susceptibilidad	Coordenadas	
			Latitud	Longitud
EWP	1	ASCE	1.154.842	1.718.547
EWP	2	PSCE	1.154.423	1.717.923
EWP	3	PSCE	1.154.558	1.718.667
Patilla	1	PSCE	1.151.356	1.715.857
Patilla	2	ASCE	1.148.445	1.713.904
Patilla	3	ASCE	1.149.344	1.714.988
Tabaco	1	ASCE	1.163.878	1.723.558
Tabaco	2	PSCE	1.164.340	1.723.523
Tabaco	3	PSCE	1.163.854	1.723.303
La Puente	1	PSCE	1.168.662	1.724.934
Tajo 100	1	PSCE	1.148.205	1.708.600
Tajo 100	2	ASCE	1.149.052	1.707.847
Oreganal	1	ASCE	1.146.296	1.704.976
Oreganal	2	PSCE	1.146.911	1.706.198

3.2 Caracterización de los mantos

3.2.1 Medición de variables extrínsecas

Para la medición de las variables extrínsecas en cada uno de los mantos seleccionados en los diferentes tajos, se estableció la siguiente metodología:

- Se escogieron mantos susceptibles y no susceptibles a la combustión espontánea. Esto con el fin de comparar cada una de las variables en los diferentes tajos y evidenciar ciertos patrones.
- Al llegar al manto de estudio, se buscó inicialmente adecuar la zona para poder realizar el arco de medición definido para la toma de datos en el campo cercano y lejano. Se especificó el nombre del tajo, el nombre del manto, su espesor, las coordenadas del punto de medición, la hora y la jornada (mañana, tarde o noche).

- Se procedió a realizar el arco de medición de derecha a izquierda con la vista al manto, para la toma de datos.
- Se tomaron mediciones en cada uno de los puntos anteriormente estipulados, obteniendo información acerca de la temperatura ambiente, presión, humedad relativa, velocidad del aire y concentraciones de gases ($O_2\%$, CO ppm y $CH_4\%$ LEL). Para estas mediciones los equipos que se utilizaron fueron el termohigroanemómetro, el barómetro y el multidetector de gases.
- Posteriormente, se hizo un barrido con la pistola térmica y la cámara termográfica para conocer la temperatura del manto, registrando los picos y las zonas de menor temperatura.
- Se definió la dirección del viento para establecer si el aire chocaba directamente con el manto de carbón o si se encontraba paralelo al mismo. Por otro lado, se observó si el manto recibía incidencia directa de la radiación en la jornada en la cual se estaba realizando la medición.
- Se recogió una muestra de la superficie del manto de carbón, con el fin de realizarle posteriormente un análisis en el laboratorio de adsorción de sodio y otros metales alcalinos.
- Se realizaron nuevamente todas las mediciones en los mismos puntos, pero en una jornada diferente, para poder determinar las variaciones de las condiciones durante el transcurso del día.

Adicionalmente, se solicitó información al grupo de medio ambiente acerca de las radiaciones en las zonas de estudio, al grupo de geología acerca de las estructuras geológicas y al grupo de voladuras acerca de las vibraciones que se presentan en el campo cercano.

3.2.2 Medición de variables intrínsecas

El procedimiento utilizado para las mediciones de las variables intrínsecas en cada uno de los mantos objetos de estudio fue el siguiente:

- Se realizó un muestreo de canal en cada uno de los 14 puntos a los cuales se les desarrolló las mediciones de las variables extrínsecas. Para cada muestra se tomaron aproximadamente 4 kilos, estableciéndose una nomenclatura para su posterior identificación

- Las muestras fueron llevadas al laboratorio de Carbones de Cerrejón, realizándoles un análisis próximo completo a cada una de estas, obteniendo información acerca de la humedad total, contenido de azufre, poder calorífico, contenido de ceniza y materia volátil.
- Se tomó la cantidad restante de las muestras utilizadas para el análisis próximo completo, el cual había sido cuarteado previamente, y se envió al laboratorio de Carbones de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia –Sede Medellín.
- En el laboratorio de Carbones de la Universidad Nacional de Colombia, se realizó el análisis petrográfico de las diferentes muestras para conocer la incidencia de macerales y subgrupos en el fenómeno de combustión espontánea; y también se realizó el índice Hardgrove para conocer la resistencia que ofrecen los diferentes mantos estudiados.

3.3 Análisis en el laboratorio

3.3.1 Análisis próximo completo

En la Tabla 3-2 se presentan los resultados de los análisis próximos completos que se realizaron en Cerrejón de las muestras tomadas en los diferentes tajos. Se desarrollaron los cálculos del porcentaje de materia volátil libre de agua y ceniza, con el fin de determinar los rangos asociados a las muestras de carbón. De acuerdo con la Figura 3-1, las 3 clasificaciones que se obtuvieron fueron las siguientes: Bituminoso alto en volátiles A, bituminoso alto en volátiles B y bituminoso alto en volátiles C.

$$M.V_{(libre\ de\ agua\ y\ ceniza)} = \frac{M.V.}{100 - (HTC + ASH)} \times 100 \quad (3-1)$$

Figura 3-1. Clasificación del carbón de acuerdo al porcentaje de materia volátil libre de agua y ceniza (Blandón Montes, 2015).

RANGO	REFL. Rm	M.V. %SLCz	CARBONO %SLCz	HUMEDAD DE EQUILIBRIO	PODER CALORIFICO CAL/gr	APLICABILIDAD DE LOS DIFERENTES PARAMETROS			
TURBA	0.2	68	60	75	4000				
LIGNITO	0.3	64							
SUB - BITUMOSO	C B	60	71	25	5500				
		56							
BITUMINOSOS Altos en volátiles	C B A	52	77	6 - 10	7000				
		48							
		44							
		40							
BITUMINOSO MEDIO VOLATIL		0.8	87		8560				
		1.0							
BITUMINOSO BAJO VOLATIL		1.2							
		1.4							
SEMI ANTRACITA		1.6							
		1.8							
ANTRACITA		2.0	91		8650				
META - ANT.		4							

Tabla 3-2. Análisis próximo completo.

Muestra	%ADL	%RM	%HTC	%ASH	%MV	%S	BTU	%MVLAC	RANGO
M1	4,13	3,95	7,92	2,62	38,97	0,46	12805	43,56	Bituminoso A.V.B
M2	9,82	5,40	14,69	6,81	32,09	0,43	10953	40,88	Bituminoso A.V.A
M3	12,06	7,78	18,90	1,80	31,84	0,42	10787	40,15	Bituminoso A.V.A
M4	8,81	4,00	12,46	4,61	36,66	0,3	11899	44,21	Bituminoso A.V.C
M5	8,30	4,01	11,98	4,37	34,73	0,31	11983	41,52	Bituminoso A.V.B
M6	5,78	3,47	9,05	2,48	34,97	0,31	12719	39,53	Bituminoso A.V.A
M7	4,86	2,96	7,68	2,71	36,12	0,27	13068	40,31	Bituminoso A.V.A
M8	7,21	7,10	13,80	2,1	37,04	0,47	11795	44,04	Bituminoso A.V.C
M9	6,92	6,12	12,62	2,17	35,79	0,39	11935	42,00	Bituminoso A.V.B
M10	8,8	7,31	15,47	1,73	31,51	0,38	10841	38,06	Bituminoso A.V.A
M11	6,22	6,19	12,02	1,2	37,62	0,35	12156	43,35	Bituminoso A.V.B
M12	4,48	3,97	8,27	1,41	38,11	0,28	13032	42,19	Bituminoso A.V.B
M13	4,46	3,43	7,74	1	39,28	0,22	13347	43,04	Bituminoso A.V.B
M14	8,49	6,06	14,04	0,68	31,53	0,16	11543	36,97	Bituminoso A.V.A

Donde ADL es la humedad superficial, RM es la humedad residual, HTC es la humedad total del carbón, ASH es la ceniza, MVOL es la materia volátil, S es el azufre, BTU es el poder calorífico y MVLAC es el contenido de materia volátil libre de agua y ceniza.

3.3.2 Análisis petrográfico

Los resultados de los análisis petrográficos se muestran en la Tabla 3-3, en los cuales se tienen los porcentajes de macerales y subgrupo en las 14 muestras de estudio. Estos resultados reflejan en general una tendencia, en donde el maceral de mayor abundancia es la vitrinita, seguido de la Inertinita y por último se tiene la liptinita. La presencia de un mayor contenido de Inertinita por encima de liptinita, se puede deducir a partir del hecho de que los carbones de Cerrejón presentan características de rangos intermedios a altos.

Tabla 3-3. Resultados del análisis petrográfico (Laboratorio de Carbones- UNAL)

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14
Vitrinita (%)	71	56	63	66	63	65	57	75	58	57	75	62	52	50
Colotelinita	25	21	17	21	18	25	19	34	24	17	29	24	20	16
Vitrodetrinita	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
colodetrinita	45	35	46	45	46	40	39	40	33	39	46	37	33	35
Liptinita (%)	11	8	11	9	9	7	13	8	11	13	10	13	15	12
Esporinita	5	2	3	3	1	1	3	5	5	3	3	4	3	3
Cutinita	1	1	0	1	2	1	0	1	2	3	0	2	2	0
Resinita	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Alginita	0	0	1	0	0	1	2	1	2	2	1	1	1	1
Liptodetrinita	4	2	7	4	4	5	4	1	2	4	5	5	6	2
Exsudatinita	1	2	0	1	2	0	3	0	0	1	1	1	2	6
Inertinita (%)	19	36	26	25	28	28	30	18	31	30	15	25	33	38
Fusinita	0	1	1	0	0	0	0	0	0	3	0	1	1	2
Semifusinita	6	22	13	14	15	12	17	3	15	16	3	8	15	24
Funginita	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0
Secritinita	1	2	2	1	1	0	1	1	1	1	1	1	3	4
Micrinita	4	3	1	3	3	2	2	4	4	3	5	5	2	2
Inertodetrinita	7	8	8	7	8	13	9	9	9	7	5	10	12	7
Total (%)	100													

Los análisis petrográficos del carbón muestran que los carbones del cerrejón muestran rangos Vitrinita entre 57-75%, con subgrupos principalmente constituidos por Colotelinita y casi nula presencia de Vitrodetrinita y Colodetrinita. De Liptinita se encuentra en un intervalo de 7-15%, con subgrupo más predominante de Esporinita y Loptodetrinita. Y por último, contenidos de Inertinita de 15-38%, con los subgrupos dela semifusinita, Micrinita e Inertodetrinita.

3.3.3 Índice de molienda Hardgrove

Los resultados de índice de molienda Hardgrove se presentan en la Tabla 3-4, evidenciándose que no existe una gran variabilidad entre las 14 muestras que se analizaron provenientes de los 6 tajos. El intervalo de índice de Hardgrove está entre 46 y

55, indicando que la resistencia a la molienda que ofrecen los diferentes mantos de carbón que se analizaron es muy similar.

Tabla 3-4. Índice de molienda Hardgrove (Laboratorio de Carbones- UNAL).

MUESTRA	ÍNDICE DE MOLIENDA ASTMD 409 - 12 UNIDAD N.A.
M1	55
M2	51
M3	50
M4	53
M5	48
M6	49
M7	48
M8	53
M9	48
M10	49
M11	54
M12	55
M13	47
M14	46

3.4 Análisis multivariante de datos

A partir de la fundamentación teórica-científica acerca de los aspectos que inciden en la combustión espontánea del carbón, se realizó un trabajo de campo, en el cual se hizo la medición de múltiples variables, para así poder estudiar y determinar la contribución que tienen cada una de estas en el fenómeno en estudio. Para describir el fenómeno de combustión espontánea se requiere el análisis simultáneo de varias variables. El análisis multivariante de datos tiene por objeto el estudio estadístico de variables medidas en elementos de una población y pretende los siguientes objetivos (Daniel Peña, 2002a):

- Resumir el conjunto de variables en unas pocas nuevas variables, construidas como transformaciones de las originales, con la mínima pérdida de información.
- Encontrar grupos en los datos si existen.
- Relacionar dos conjuntos de variables.

El análisis multivariante de datos proporciona métodos objetivos para conocer cuántas variables indicadoras, que a veces se denomina factores, son necesarias para describir una realidad compleja y determinar su estructura (Daniel Peña, 2002a).

3.4.1 Descripción de las variables

Las variables analizadas están asociadas a factores extrínsecos e intrínsecos, las cuales pueden tener un impacto en el fenómeno de combustión espontánea del carbón (Kaymakçi & Didari, 2002). En la Tabla 3-5 se presenta la descripción de cada una de las variables utilizadas en el análisis estadístico, con su unidad y equipo de medición.

Tabla 3-5. Descripción de las variables utilizadas en el análisis multivariante de datos

Variable	Unidad de medición	Medición(equipo)	Tipo de variable
Susceptibilidad	N/A		Estudio
Temperatura ambiente	°C	Termohigroanemómetro.	Extrínseca
Temperatura del manto	°C	Pistola térmica.	Intrínseca
Humedad relativa del ambiente	%	Termohigroanemómetro.	Extrínseca
Presión atmosférica	Hpa	Barómetro.	Extrínseca
Velocidad del viento	m/s	Termohigroanemómetro.	Extrínseca
Oxígeno	%	Multidetector de gases.	Extrínseca
Monóxido de Carbono	ppm	Multidetector de gases.	Extrínseca
Gas metano	% de LEL	Multidetector de gases.	Extrínseca
Altura sobre el nivel del mar	m.s.n.m	G.P.S.	Extrínseca
Radiación solar	W/m ²	Estación de monitoreo.	Extrínseca
Espesor del manto	m	Flexómetro	Intrínseca
Humedad total de carbón	%	Análisis en el laboratorio	Intrínseca
Ceniza	%	Análisis en el laboratorio	Intrínseca
Materia Volátil	%	Análisis en el laboratorio	Intrínseca
Azufre	%	Análisis en el laboratorio	Intrínseca
Poder calorífico	BTU	Análisis en el laboratorio	Intrínseca
Sodio superficial	mgNa/m ²	Análisis en el laboratorio	Intrínseca
Vitrinita	%	Análisis en el laboratorio	Intrínseca
Liptinita	%	Análisis en el laboratorio	Intrínseca
Inertinita	%	Análisis en el laboratorio	Intrínseca
Pirita	%	Análisis en el laboratorio	Intrínseca
Índice Hardgrove	N/A	Análisis en el laboratorio	Intrínseca

Para el análisis estadístico de la base de datos levantada en campo y complementada con ensayos de laboratorio, se llevó a cabo la siguiente secuencia metodológica: estadística descriptiva, detección de valores atípicos, determinación de componentes principales, análisis de conglomerados y regresión logística

3.4.2 Estadística descriptiva

La estadística descriptiva es un conjunto de técnicas que tienen por objeto organizar y presentar de manera conveniente para su análisis, la información contenida en una muestra. Esta busca obtener conclusiones acerca de toda una población a partir de la información contenida en una muestra, lo cual es muy importante partiendo del hecho de que no se puede pretender describir o intuir lo que ocurre con lo desconocido, sino se logra describir y analizar primero lo que sucede con lo que sí se conoce (Becerra Espinosa, 2010). Dentro de los parámetros numéricos que más comúnmente se utilizan están las medidas de tendencia central y las medidas de dispersión.

▪ Medidas de tendencia central

Son valores que se encuentran dentro del rango de la muestra y que se pueden considerar como representativos de la misma. Estas medidas permiten resumir en un solo valor un conjunto de valores, representando un centro en torno al cual se encuentra ubicado el conjunto de los datos. Entre las más usuales están la media aritmética, la mediana y la moda.

Media aritmética: es el valor obtenido al sumar todos los datos y dividir el resultado entre el número total de datos (Buchanan, 2010).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3-2)$$

Se denota como x_i a cualquiera de los n valores x_1, x_2, \dots, x_n que toma una variable x .

Mediana: es el valor que divide el conjunto de datos de la muestra en dos conjuntos de igual tamaño, es decir, es aquel valor para el cual el 50% de los datos son menores o iguales a él (Videla Jiménez, 2011).

$$M_e = x_{i1} + \left(\frac{\left(\frac{n}{2}\right) - N_{i-1}}{f_i} \right) \cdot (x_{i2} - x_{i1}) \quad (3-3)$$

Donde x_{i1} es el límite inferior de la clase mediana, N_{i-1} es la frecuencia acumulada hasta antes de la clase mediana, $x_{i2} - x_{i1}$ es la amplitud de la clase mediana, f_i es la frecuencia absoluta de la clase mediana y n es el tamaño de la muestra.

Moda: es aquella observación que se repite con mayor frecuencia dentro de la muestra.

$$M = L_i + \left(\frac{D_1}{D_1 + D_2} \right) \cdot A_i \quad (3-4)$$

Donde L_i es el límite inferior de la clase modal, A_i es la amplitud de la clase modal, $D_1 = n_M - n_1$ y $D_2 = n_M - n_2$. En este caso n_M es la frecuencia absoluta de la clase modal, n_1 es la frecuencia absoluta de la clase anterior a la modal y n_2 es la frecuencia absoluta de la clase posterior a la modal (Buchanan, 2010).

▪ Medidas de dispersión

Existen varias medidas de dispersión, y la mayoría de ellas se miden con respecto a la media por ser esta una medida que se encuentra alrededor del centro del rango de la muestra, y considerarse una medida representativa de los datos. Estas medidas permiten describir el comportamiento de la muestra y validar la representatividad de la media como característica de todo el conjunto de datos.

Rango: es una medida de dispersión que proporciona información acerca de la variabilidad que tienen los datos entre sí (Videla Jiménez, 2011).

$$R = x_{(k)} - x_{(1)} \quad (3-5)$$

Donde $x_{(k)}$ es el mayor valor y $x_{(1)}$ es el menor valor.

Varianza: es la media aritmética del cuadrado de las desviaciones respecto a la media de una distribución estadística (Rindskopf & Shiyko, 2010).

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (3-6)$$

Desviación estándar: es la raíz cuadrada de la varianza de la muestra (Rindskopf & Shiyko, 2010)

$$S = \sqrt{S^2} \quad (3-7)$$

Coefficiente de variación: es un índice de la proporción que representa la desviación estándar con respecto a la media (Videla Jiménez, 2011)

$$C_v = \frac{S}{|\bar{x}|} \cdot 100 \quad (3-8)$$

3.4.3 Identificación de “outliers”

Para la detección de outliers o datos atípicos multivariante se utilizó el método de proyección de máxima curtosis (Daniel Peña, 2002b). Los datos atípicos son observaciones que numéricamente están distante del resto de los datos y por lo general pueden ser el resultado de errores de captura. Por otro lado, la curtosis es una medida que sirve para analizar el grado de concentración que presentan los valores de una variable analizada alrededor de la zona central de la distribución de frecuencias.

Para determinar el número de datos atípicos desde el punto de vista multivariante se realizaron 10.000 proyecciones y se eligió la de mayor curtosis. Se realizó un análisis univariante en la dirección de la proyección y se obtuvieron los puntos mayores o menores al límite superior o inferior respectivamente (D. Peña & Prito, 2001).

Este método se basa en proyectar la nube de “n” puntos en R_n sobre dos nuevos espacios n-dimensionales: el primero obtenido con las direcciones ortogonales de máxima curtosis, y el segundo obtenido de las direcciones ortogonales de mínima curtosis; coeficientes de curtosis muy altos o muy bajos, sugieren la presencia de valores atípicos; se identifican como posibles valores anómalos a aquellas observaciones que son extremas en tales direcciones (Hernández, 2005).

3.4.4 Análisis de componentes principales

Con la determinación de componentes principales se busca generar un modelo que combinando cierta cantidad de las variables explique cierto porcentaje de los datos, para realizar un proceso de reducción de dimensiones al modelo mediante el giro de los datos respectivos de los vectores propios de las variables significativas. El Análisis de Componentes Principales es una técnica estadística de síntesis de la información, o reducción de la dimensión (número de variables). Es decir, ante un banco de datos con muchas variables, el objetivo será reducirlas a un menor número perdiendo la menor cantidad de información posible. Los nuevos componentes principales serán una combinación lineal de las variables originales, y además serán independientes entre sí (Terrádez-Gurrea, 2006). Estos componentes pueden ordenarse de acuerdo con la información que llevan incorporada, la cual está relacionada con su varianza. Es decir, cuanto mayor sea su varianza mayor es la cantidad de información que contiene dicha componente. Por esta razón se selecciona como primera componente aquella que tenga mayor varianza, mientras que la última componente es la de menor varianza (De La Fuente, 2016).

Las rotaciones de un espacio vectorial son transformaciones lineales del espacio vectorial sobre sí mismo y están asociadas con matrices cuadradas, unitarias y ortogonales. Una matriz Q , tiene tantas filas y columnas como sea la dimensión del espacio. Sus columnas son vectores unitarios y tiene la particularidad de que al ser multiplicada por su transpuesta produce la matriz identidad. En cambio, las traslaciones no son transformaciones lineales, pero tienen la propiedad de no modificar la variabilidad de la nube de puntos. Es decir, las varianzas y covarianzas en la nube son las mismas antes y después de una traslación. Lo expuesto anteriormente, junto con algunas propiedades de la matriz de covarianzas Σ , constituye las bases sobre las cuales descansa la técnica de componentes principales.

La matriz de covarianza Σ es definida positiva, es decir, la forma cuadrática asociada a ella tiene todas sus raíces positivas. Lo anterior hace que esta matriz tenga p valores propios reales y diferentes, lo cual garantiza que sea diagonalizable (De La Fuente, 2016; Terrádez-Gurrea, 2006). En términos matemáticos significa que existe una matriz A ortogonal, tal que:

$$\Sigma = ADA^{-1} \quad (3-9)$$

donde D es la matriz diagonal formada por los valores propios de Σ , denotados por $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p$. Es posible reordenar de acuerdo con su magnitud los valores propios de la matriz de covarianza de tal manera que $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_p$. Esto simplemente se traduce en un reordenamiento de las columnas de la matriz A de manera que la primera sea el vector propio o componente asociado con λ_1 , la segunda sea un vector propio asociado con λ_2 y así sucesivamente. En particular, dichas columnas pueden estar formadas por vectores propios normalizados, es decir, perpendiculares entre sí y de magnitud igual a la unidad. De esta manera se construye una matriz que produce la rotación deseada ya que, como puede probarse, el primer vector propio $a_1 = (a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1p})'$ apunta en la dirección de máxima variabilidad de la nube centrada. Esta dirección se llama primera dirección principal. El segundo vector propio $a_2 = (a_{21}, a_{22}, \dots, a_{2p})'$ apunta en la siguiente dirección de máxima variabilidad de la nube centrada, llamada segunda dirección principal y así sucesivamente (León González, Llinás Solano, & Tilano, 2011).

Luego de resolver el tema de la rotación, se multiplica la variable centrada:

$$X_c = X - \mu = (X_1, X_2, \dots, X_p) \quad (3-10)$$

por la matriz de rotación A para obtener la nueva variable:

$$Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_p) \quad (3-11)$$

llamada variable de componentes principales (León González et al., 2011). Cada componente Y_i del vector aleatorio Y se llama una componente principal, cumpliéndose que:

$$Y_j = a_{j1}X_c + a_{j2}X_{c2}, \dots, + a_{jp}X_{cp}, \quad (3-12)$$

es decir, cada componente principal es una combinación lineal de las variables originales centradas. La traza de Σ , por ser la suma de las varianzas de las variables originales Y_i recibe el nombre de varianza total (León González et al., 2011), por tanto:

$$\text{traza}(\Sigma) = \text{traza}(ADA^{-1}) = \Sigma \lambda_i. \quad (3-13)$$

Se puede probar además que:

$$V(Y_i) = \lambda_i \text{ para } i = 1, 2, \dots, p \quad (3-14)$$

y que:

$$Cov(Y_i, Y_j) = 0 \quad (3-15)$$

Esto implica que la varianza total es igual a la suma de los valores propios de λ_i e igual a la suma de las varianzas de las componentes principales, es decir, la varianza total es la misma con las variables originales que con las variables transformadas Y_i . Las componentes principales son variables aleatorias no correlacionadas entre sí, obtenidas mediante la transformación lineal del vector de las variables originales centradas por la matriz de vectores propios (León González et al., 2011).

3.4.5 Análisis de conglomerados

Esta parte del análisis se encarga de determinar el número de grupos óptimos de clasificación usando *K-means* como el método de agrupamiento que tiene como objetivo la partición de un conjunto de n observaciones en k grupos en el que cada observación pertenece al grupo cuyo valor medio es más cercano (De la Fuente Fernández, 2011). Este método clásico de partición de datos, introduce aleatoriamente dos centroides, posteriormente inicia un proceso iterativo como se describe a continuación: a partir de la ecuación (3-16) se ingresa un punto de la base de datos para proceder al cálculo de distancias Euclidianas entre un punto ingresado y los centroides y así del mismo modo calcula el centro de los grupos formados por la clasificación de los puntos.

$$\text{Distancia Euclidianas} = \sqrt{\sum_{j=1}^J (X_{rj} - X_{sj})^2} \quad (3-16)$$

Se ingresa el dato siguiente, de acuerdo a la menor distancia, entre el punto y los centros, se clasifica como grupo 1 o grupo 2 o grupo n . Se repite el procedimiento hasta ingresar el último de los datos (De la Fuente Fernández, 2011).

3.4.6 Regresión logística

La regresión logística es un caso especial del análisis de regresión donde la variable dependiente es binaria (1 o 0), en la cual se busca calcular la probabilidad en la que una de las opciones de la variable respuesta dependiente sucederá en función de cómo puntúa en una serie de variables independientes que pueden estar en diferentes escalas de medida. Por lo tanto, es una técnica multivariante de dependencia ya que trata de estimar

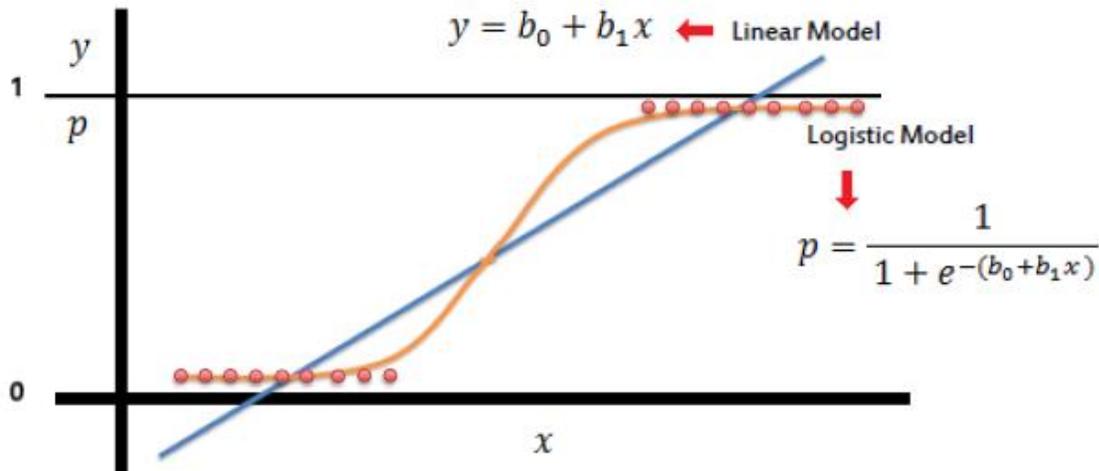
la probabilidad de que ocurra un suceso en función de la dependencia de otras variables (Whitehead, 1999).

Si tenemos un conjunto de variables independientes x_1, x_2, \dots, x_p que clasifica a los n sujetos, se desea saber a cuál de las dos categorías de la variable Y pertenece. La probabilidad de que un sujeto i pertenezca a una de ellas será la combinación lineal $Z = b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_px_p + b_0$ y será igual a la ecuación (3-17) (Whitehead, 1999):

$$p = \frac{1}{1 + e^{-(b_0 + b_1x)}} \quad (3-17)$$

La distribución "logit" restringe las probabilidades entre 0 y 1. Si $b_0 + b_1x = 0$, la probabilidad será igual a 0,5, si $b_0 + b_1x$ es grande, la probabilidad estimada se aproxima a 1, y si $b_0 + b_1x$ es pequeño, la probabilidad se aproxima a 0 (J, Q, R, J, & S, 2017). En la Figura 3-2 se muestra una representación del modelo logístico comparado con el modelo lineal.

Figura 3-2. Modelo de regresión logística (Rincón, Castrillón, & Rivera, 2016)



Se utilizó una regresión logística para determinar la incidencia de cada una de las variables tanto intrínsecas como extrínsecas en el fenómeno de combustión espontánea. Para esto se utilizó una prueba de hipótesis, donde se eligió un estadístico de prueba (Z) para una población de media y varianza conocida, se designó una región de rechazo y se definió un nivel de confianza de confianza del 95 %. Por tanto, el valor de α es igual a 0.05, teniendo

en cuenta que este se halla al restar 1 al nivel de confianza, sirviendo como valor de comparación para determinar si las variables son significativas en la susceptibilidad de los mantos de carbón a la combustión espontánea (Gómez Giraldo, 2009).

Una hipótesis estadística es una afirmación sobre el valor de un parámetro de una distribución de probabilidad. En cualquier problema de prueba de hipótesis, se tienen dos hipótesis contradictorias que se contrastan entre sí. La hipótesis nula (H_0), es la pretensión que inicialmente se supone cierta. Es una afirmación de igualdad o desigualdad no estricta sobre el valor del parámetro, el cual es una característica de una población o una distribución de probabilidad. Por otro lado, la hipótesis alternativa (H_a) es aquella que contradice la hipótesis nula y generalmente tiene en cuenta una afirmación de desigualdad estricta o diferente sobre el valor del parámetro. La prueba de hipótesis es un método utilizado en datos muestrales para decidir si H_0 debe ser rechazada. El estadístico de prueba es una función de los datos muestrales en los cuales debe basarse la decisión de rechazar o no la hipótesis nula. La región de rechazo consiste en el conjunto de todos los valores estadísticos de prueba por los cuales H_0 será rechazado. En este sentido, la hipótesis nula será rechazada si el valor estadístico de prueba observado o calculado queda en la región de rechazo (Gómez Giraldo, 2009).

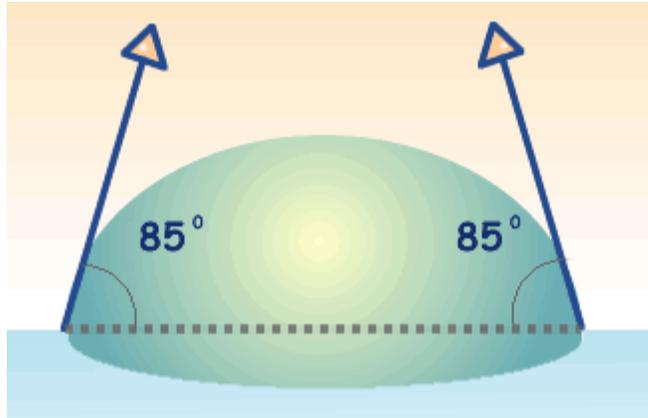
En este caso para el desarrollo de la prueba de hipótesis, se tomó que H_0 manifiesta que la variable en cuestión no es significativa en la alta susceptibilidad del manto de carbón a la combustión espontánea, mientras que H_a considera que la variable si es significativa. Por tal razón, se rechaza H_0 si el valor de P es menor que α (0.05) y no se rechaza si es mayor que dicho valor. Entre más pequeño sea el valor de P comparado con α , existe una mayor evidencia en contra de la hipótesis nula y a favor de la hipótesis alternativa (Gómez Giraldo, 2009).

3.5 Ángulo de contacto del bitumen

El ángulo de contacto se refiere al ángulo que forma la superficie de un líquido al entrar en contacto con un sólido (ver Figura 3-3). El valor del ángulo de contacto depende principalmente de la relación que existe entre las fuerzas adhesivas entre el líquido y el sólido y las fuerzas cohesivas del líquido. Cuando las fuerzas adhesivas con la superficie del sólido son muy grandes en relación a las fuerzas cohesivas, el ángulo de contacto es

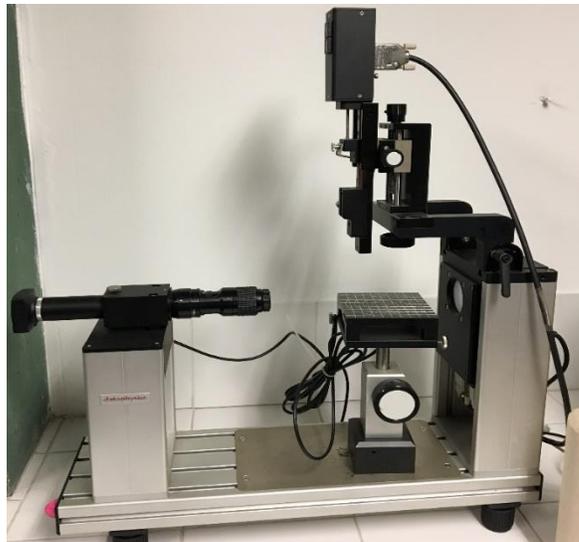
menor de 90 grados, teniendo como resultado que el líquido moja la superficie (Mirzaei, 2017). Se midió el ángulo de contacto para el bitumen (emulsión asfáltica) en diferentes concentraciones, teniendo en cuenta que es el producto utilizado para los sellamientos de los mantos de carbón.

Figura 3-3. Esquema de ángulo de contacto.



Se utilizó el equipo Dataphysics OCA 14 para medir los ángulos de contacto del bitumen en concentraciones de 50%, 70% y 100% diluido con agua (ver Figura 3-4).

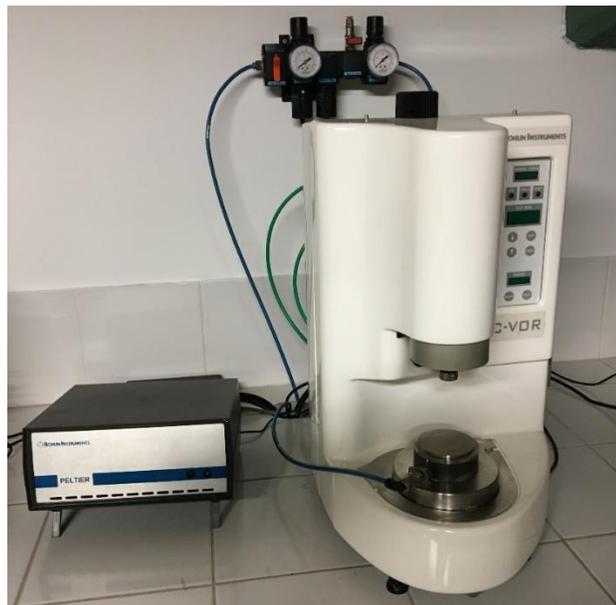
Figura 3-4. Equipo utilizado para medir ángulos de contacto.



3.6 Viscosidad del bitumen

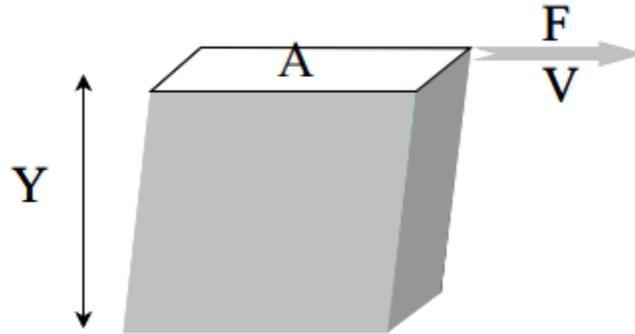
La viscosidad es la resistencia que tienen las moléculas que conforman un fluido para separarse unas de otras, es decir, es la oposición de un fluido a deformarse. Esta oposición es debida a las fuerzas de adherencia que tienen unas moléculas de un fluido con respecto a otras moléculas del mismo fluido. En este caso, se realizaron mediciones de viscosidad del bitumen para conocer su comportamiento reológico. El equipo utilizado para medir la viscosidad en el laboratorio en este caso fue el reómetro Bohlin C-VOR 200-Malvern Instruments que se presenta en la Figura 3-5.

Figura 3-5. Reómetro utilizado para las mediciones de viscosidad.



De este modo, se establece la proporcionalidad existente entre el esfuerzo por unidad de área (F/A) necesario para producir un gradiente de velocidades en un fluido, siendo la constante de proporcionalidad un factor que describe "la capacidad de deslizamiento de un fluido" y se conoce como viscosidad. La hipótesis propuesta por Newton puede representarse a partir del esquema utilizado en la Figura 3-6, en el que se muestra dos superficies de A , separadas por una distancia Y , estando una de ellas sometida a una fuerza F que le provoca una velocidad V (Universidad de Alicante, 2008).

Figura 3-6. Experimento hipotético basado en las leyes de Newton (Universidad de Alicante, 2008).



Matemáticamente, de acuerdo a los principios establecidos por Newton se expresa según la ecuación (3-18).

$$\sigma = \mu \frac{dY}{dt} \quad (3-18)$$

Donde σ es el esfuerzo por unidad de área o esfuerzo de cizalla (F/A), dY/dt es el gradiente de velocidades, también llamado velocidad de deformación o velocidad de cizalla (dV/dX) y μ es la viscosidad.

Para fluidos newtonianos, la curva de esfuerzo de cizalla y tasa de cizalladura es lineal, teniendo en cuenta que la viscosidad se mantiene constante, mientras que para fluidos no newtonianos, esta depende de la temperatura y del esfuerzo al que es sometido el fluido (Universidad de Alicante, 2008).

4.Resultados y discusión

4.1 Análisis multivariante de datos

El análisis multivariante de datos se llevó a cabo en el software Matlab para hallar las medidas de localización, identificar datos atípicos, analizar las componentes principales y conglomerados, mientras que la regresión logística se realizó a partir del software RStudio.

4.1.1 Medidas de localización

En la Tabla 4-1 se presentan las medidas de tendencia central y de dispersión para cada una de las variables cuantitativas continuas que fueron objeto de estudio. Estas mediciones sirvieron de base para el análisis multivariante de datos.

Tabla 4-1. Medidas de localización para las variables cuantitativas continuas (Mathworks, 1994)

Nombre de la variable	Media	Mediana	Moda	Varianza	Desviación estándar	Rango	Coef. de variación
Temperatura ambiente	33,88	33,8	32,8	7,55	2,75	36,6	0,07
Temperatura del manto	41,43	37,15	32	93,97	9,69	33,9	0,23
Humedad relativa	44,46	43,3	42,4	66,95	8,18	48,2	0,18
Presión	1008,77	1006	1006	83,38	9,13	35	0,01
Velocidad del viento	3,11	2,5	2	3,38	1,84	11,3	0,59
Oxígeno	21	21,1	21,1	0,04	0,19	1,2	0,01
Monóxido de Carbono	0,84	0	0	11,09	3,33	45	3,97
Gas metano	1,29	1	1	0,44	0,66	3	0,51
Altura sobre el nivel del mar	-1,63	23,5	-110	5603,66	74,86	245	-45,83
Radiación solar	245,66	277,50	2,10	18729,21	136,85	437,90	0,56
Espesor	5,48	5,00	6,00	11,72	3,42	11,10	0,62
Humedad total del carbón	11,79	12,02	8,27	10,50	3,24	11,22	0,27
Ceniza	2,47	2,10	1,20	2,52	1,59	6,13	0,64
Materia volátil	35,61	36,12	37,62	7,00	2,65	7,77	0,07
Azufre	0,34	0,33	0,31	0,01	0,09	0,31	0,25
Poder calorífico	12097	11983	12156	653636	808	2560	0,07
Sodio	68,54	55,44	26,76	2062,26	45,41	171,65	0,66
Vitrinita	64,73	67,80	72,00	72,37	8,51	24,22	0,13
Liptinita	9,39	10,36	10,16	12,62	3,55	11,60	0,38
Inertinita	25,01	25,07	15,04	37,53	6,13	22,13	0,24
Pirita	0,30	0,32	0,0	0,12	0,34	1,01	1,15
Índice Hardgrove	50,70	50,00	48,00	9,16	3,03	9,00	0,06

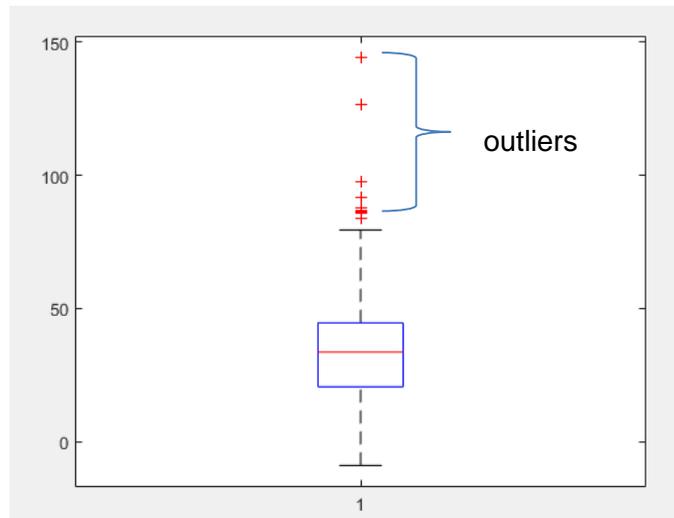
4.1.2 Identificación de outliers

Luego de aplicar el algoritmo con el método de proyecciones de máxima curtosis, el resultado es el siguiente:

- **Variables extrínsecas**

Se obtuvieron 9 datos atípicos para las variables extrínsecas, cuyos índices fueron 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 12 y 32. Estos índices representan las filas de los datos que son considerados erróneos en la base de datos, por lo tanto, son eliminados para no generar distorsión en la información. En la Figura 4-1 se presenta el box-plot donde se pueden identificar los datos atípicos relacionados con las variables extrínsecas. Además, se observan los valores máximos y mínimos y los cuartiles.

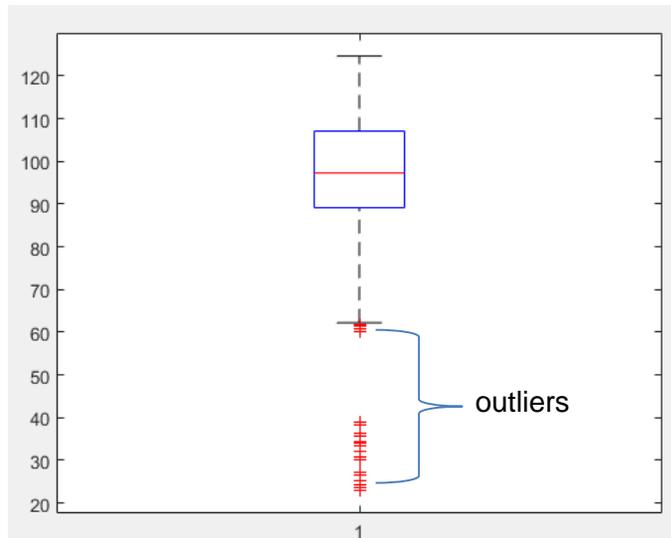
Figura 4-1. Outliers en variables extrínsecas (Mathworks, 1994).



- **Variables intrínsecas**

Se obtuvieron 58 datos atípicos para las variables intrínsecas, cuyos índices fueron 505, 506, 507, 508, 509, 510, 511, 512, 513, 514, 515, 516, 517, 518, 519, 520, 521, 522, 523, 524, 525, 526, 527, 528, 529, 530, 531, 532, 533, 534, 535, 536, 537, 538, 539, 540, 541, 542, 543, 544, 545, 546, 548, 550, 552, 554, 555, 557, 558, 559, 560, 561, 562, 563, 564, 565, 566 y 567. Al igual que en el caso de las variables extrínsecas, estos datos se eliminaron de la base de datos. En la Figura 4-2 se presenta el box-plot donde se pueden identificar los datos atípicos relacionados con las variables intrínsecas.

Figura 4-2. Outliers en variables intrínsecas (Mathworks, 1994).



4.1.3 Componentes principales

A partir del análisis de componentes principales, se obtuvieron los resultados para las variables extrínsecas e intrínsecas.

- **Variables extrínsecas**

Este análisis se realizó en el software Matlab luego de haber ejecutado la limpieza de la base de datos a las 10 variables extrínsecas cuantitativas continuas del estudio.

La matriz de covarianza se utilizó para calcular los errores estándar de los estimadores. De esta manera se creó una matriz para los coeficientes estimados, lo que permitió ver las varianzas de los coeficientes y las covarianzas entre todos los pares posibles de coeficientes como se observa en la ecuación (4-1). Los elementos de la diagonal de la matriz contienen las varianzas de las variables, mientras que los elementos que se encuentran fuera de la diagonal contienen las covarianzas entre todos los pares posibles de variables.

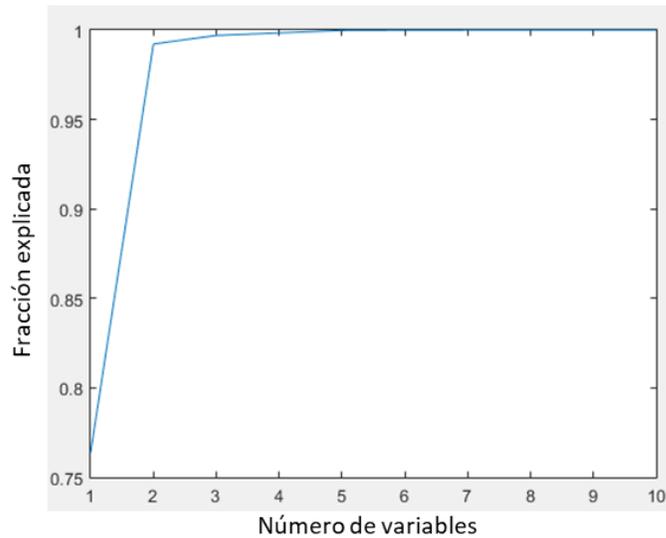
$$c = \begin{bmatrix} 6,11 & 14,42 & -17,86 & 2,83 & -0,81 & -0,01 & 0,11 & 0,20 & -13,36 & 114,34 \\ 14,42 & 92,33 & -39,89 & 14,85 & -2,26 & -0,18 & -0,95 & 0,08 & -172,34 & 232,34 \\ -17,86 & -39,89 & 67,80 & 8,55 & 1,03 & -0,04 & -1,52 & -0,25 & -69,01 & -189,55 \\ 2,83 & 14,85 & 8,55 & 84,54 & -0,91 & -0,42 & -1,27 & 0,66 & -513,07 & 164,77 \\ -0,81 & -2,26 & 1,03 & -0,91 & 3,39 & 0,05 & -0,22 & 0,14 & 10,16 & -6,44 \\ -0,01 & -0,18 & -0,04 & -0,42 & 0,05 & 0,04 & 0,04 & 0,02 & 5,79 & 5,41 \\ 0,11 & -0,95 & -1,52 & -1,27 & -0,22 & 0,04 & 1,40 & -0,23 & -0,15 & -8,60 \\ 0,20 & 0,08 & -0,25 & 0,66 & 0,14 & 0,02 & -0,23 & 0,44 & 3,87 & 27,78 \\ -13,36 & -172,34 & -69,01 & -513,07 & 10,16 & 5,79 & -0,15 & 3,87 & 5641,05 & 566,58 \\ 114,34 & 232,34 & -189,55 & 164,77 & -6,44 & 5,41 & -8,60 & 27,78 & 566,58 & 18912,34 \end{bmatrix} \quad (4-1)$$

Para determinar las varianzas de las componentes principales se procede a hallar los valores propios como se observa en la ecuación (4-2). Los valores propios de cada componente no indican la cantidad de varianza o la cantidad de información que tiene cada componente (Lopez Pérez Jaime, 2013). Los vectores propios asociados se presentan en la ecuación (4-3).

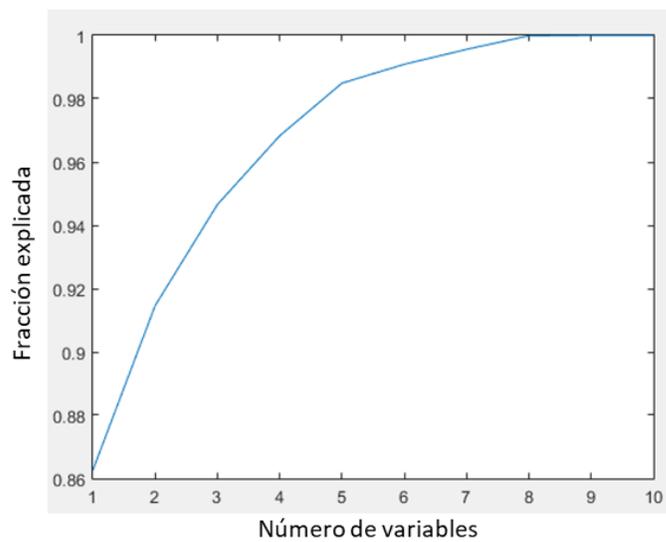
$$valor = \begin{bmatrix} 0,03 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,34 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,68 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1,34 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3,42 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 33,99 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 35,61 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 119,12 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5671,97 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 18942,95 \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

$$vector = \begin{bmatrix} 0,01 & -0,06 & -0,91 & -0,29 & -0,14 & -0,15 & 0,07 & -0,18 & 0 & 0,01 \\ 0 & 0,01 & 0,02 & 0,04 & 0,02 & 0,43 & -0,48 & -0,76 & -0,03 & 0,01 \\ 0,01 & 0 & -0,23 & -0,03 & -0,04 & 0,56 & -0,49 & 0,62 & -0,01 & -0,01 \\ 0 & -0,01 & 0,03 & 0,05 & 0 & -0,68 & -0,72 & 0,07 & -0,09 & 0,01 \\ 0,02 & -0,04 & -0,17 & 0,06 & 0,98 & 0 & 0,01 & 0,02 & 0 & 0 \\ 1 & 0,05 & -0,03 & 0,04 & 0,01 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,05 & 0,18 & -0,29 & 0,93 & -0,1 & -0,01 & 0,06 & 0 & 0 & 0 \\ 0,04 & 0,98 & -0,01 & -0,19 & 0,05 & -0,02 & -0,01 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,04 & -0,09 & -0,01 & 0,99 & 0,04 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,01 & 0,01 & 0,02 & -0,04 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-3)$$

En la Figura 4-3 se presenta el análisis de componentes principales de las variables extrínsecas.

Figura 4-3. Análisis de componentes principales variables extrínsecas (Mathworks, 1994).

Como se evidencia en la Figura 4-3 en el comportamiento de los datos, hay una variable que está absorbiendo toda la variabilidad, por lo que se hacen transformaciones a los valores de varias variables para llevarlas a una escala similar. En la Figura 4-4 se presenta el análisis de componentes principales de las variables extrínsecas con las respectivas transformaciones.

Figura 4-4. Análisis de componentes principales variables extrínsecas con transformaciones realizadas (Mathworks, 1994).

Según los resultados obtenidos se tiene que para explicar el 96% de los datos se deben usar 4 variables, para explicar el 98% de los datos se deben usar 5 variables y para explicar el 99,9% de los datos se deben usar 6 variables.

▪ **Variables intrínsecas**

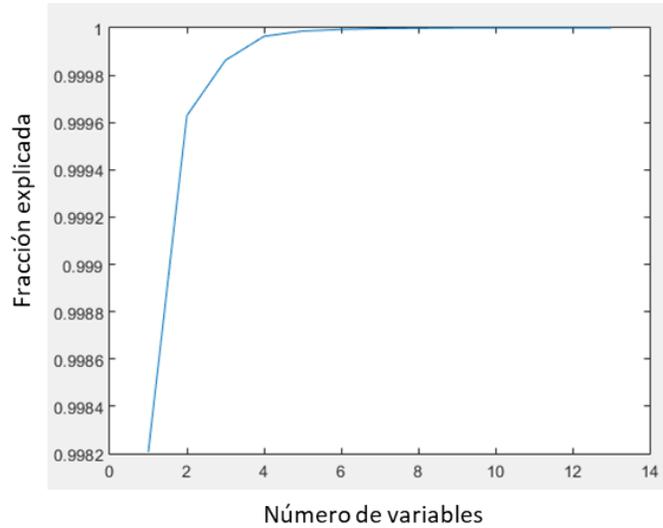
Este análisis se realiza luego de haber ejecutado la limpieza de la base de datos a las 13 variables extrínsecas cuantitativas continuas del estudio. Al igual que en el caso de las variables extrínsecas, se halla la matriz de covarianza, los valores propios y los vectores propios, respectivamente.

$$c = \begin{bmatrix} 95,88 & 13,85 & -12,52 & -2,77 & 6,41 & -0,18 & 3472,5 & 58,84 & -25,79 & 8,5 & 15,63 & 1,00 & -3,25 \\ 13,85 & 12,54 & -8,14 & -1,02 & 4,24 & -0,16 & 2041,58 & -0,09 & -11,35 & 7,14 & 3,37 & 0,49 & 1,52 \\ -12,52 & -8,14 & 9,36 & -0,08 & -5,59 & 0,07 & -2225,7 & 21,29 & 5,23 & -4,31 & 0,02 & -0,55 & -1,76 \\ -2,77 & -1,02 & -0,08 & 1,29 & 0,06 & 0,02 & -44,62 & -6,63 & 4,81 & -2,36 & -2,24 & -0,18 & 0,15 \\ 6,41 & 4,24 & -5,59 & 0,06 & 6,27 & 0,03 & 1474,83 & -19,79 & 5,34 & 1,85 & -7,66 & 0,59 & 4,56 \\ -0,18 & -0,16 & 0,07 & 0,02 & 0,03 & 0,01 & -19,68 & -0,08 & 0,43 & -0,10 & -0,35 & 0 & 0,13 \\ 3472,5 & 2041,58 & -2225,7 & -44,62 & 1474,83 & -19,68 & 561063,36 & -2843,8 & -1052,2 & 957,55 & -77,4 & 144,63 & 439,05 \\ 58,84 & -0,09 & 21,29 & -6,33 & -19,79 & -0,08 & -2843,8 & 804,63 & 9,02 & -20,25 & 14,81 & -3,73 & -29,16 \\ -25,79 & -11,35 & 5,23 & 4,81 & 5,34 & 0,43 & -1052,2 & 9,02 & 75,86 & -22,05 & -50,55 & -0,63 & 17,16 \\ 8,50 & 7,14 & -4,31 & -2,36 & 1,85 & -0,10 & 957,55 & -20,25 & -22,05 & 11,73 & 8,51 & 0,64 & -1,44 \\ 15,63 & 3,37 & 0,02 & -2,24 & -7,66 & -0,35 & -77,40 & 14,81 & -50,55 & 8,51 & 41,26 & -0,16 & -15,85 \\ 1,05 & 0,49 & -0,55 & -0,18 & 0,59 & 0 & 144,63 & -3,73 & -0,63 & 0,64 & -0,16 & 0,12 & 0,35 \\ -3,25 & 1,52 & -1,76 & 0,15 & 4,56 & 0,13 & 439,05 & -29,16 & 17,16 & -1,44 & -15,85 & 0,35 & 10,07 \end{bmatrix} \quad (4-4)$$

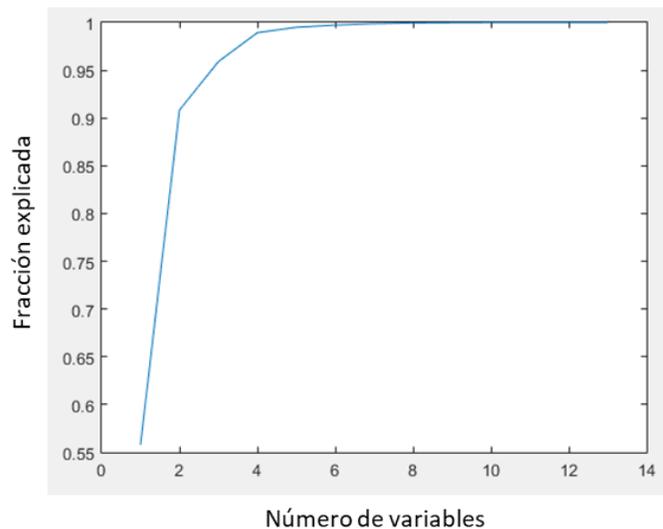
$$valor = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,05 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,07 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,56 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,80 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2,19 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3,81 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 12,52 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 57,02 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 131,53 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 800,4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 561123,42 \end{bmatrix} \quad (4-5)$$

$$vector = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,05 & 0 & 0,01 & -0,93 & 0,35 & 0,11 & 0,01 \\ 0,02 & -0,08 & -0,07 & 0,15 & 0,02 & 0,29 & -0,44 & -0,74 & 0,37 & 0,06 & 0,06 & 0,01 & 0 \\ -0,02 & -0,01 & -0,28 & -0,72 & -0,21 & 0,58 & 0,15 & 0 & -0,01 & -0,01 & -0,01 & 0,01 & 0 \\ -0,01 & 0,29 & 0,02 & -0,40 & 0,77 & -0,13 & -0,31 & -0,05 & -0,18 & 0 & -0,04 & -0,01 & 0 \\ 0,01 & -0,13 & 0,15 & 0,37 & 0,50 & 0,64 & 0,27 & 0,24 & 0,15 & -0,05 & -0,08 & -0,02 & 0 \\ 1,00 & -0,05 & -0,06 & -0,03 & 0,03 & -0,03 & 0,01 & 0,02 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,01 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0,01 & 0,01 & 0 & 0,02 & -0,02 & 0,03 & 0,01 & 0,03 & 0,09 & -0,05 & 0,99 & -0,01 \\ 0,05 & 0,27 & 0,39 & 0,03 & -0,22 & 0,17 & -0,12 & -0,13 & -0,25 & -0,27 & -0,72 & 0 & 0 \\ 0,05 & 0,39 & 0,48 & -0,18 & -0,14 & 0,02 & -0,18 & 0,33 & 0,62 & 0,08 & 0,18 & -0,02 & 0 \\ 0,06 & 0,29 & 0,43 & -0,04 & -0,06 & 0,18 & 0,25 & -0,31 & -0,47 & 0,18 & 0,52 & 0,02 & 0 \\ 0,02 & 0,75 & -0,57 & 0,31 & -0,05 & 0,09 & 0,07 & 0,05 & 0,04 & -0,01 & 0 & 0 & 0 \\ -0,01 & 0,1 & 0,07 & -0,16 & 0,16 & -0,29 & 0,70 & -0,41 & 0,39 & -0,11 & -0,19 & -0,04 & 0 \end{bmatrix} \quad (4-6)$$

En la Figura 4-5 se presenta el análisis de componentes principales de las variables intrínsecas.

Figura 4-5. Análisis de componentes principales variables intrínsecas (Mathworks, 1994).

Como se evidencia en el comportamiento de los datos, al igual que en el caso de las variables extrínsecas, hay una variable que está absorbiendo toda la variabilidad, por lo tanto, se requiere realizar algunas transformaciones, con el fin de llevarlas a una escala similar. En la Figura 4-6 se presenta el análisis de componentes principales de las variables intrínsecas con las respectivas transformaciones.

Figura 4-6. Análisis de componentes principales variables intrínsecas con transformaciones realizadas (Mathworks, 1994).

Según los resultados obtenidos se tiene que para explicar el 95% de los datos se deben usar 3 variables, para explicar el 98% de los datos se deben usar 4 variables y para explicar el 99,9% de los datos se deben usar 5 variables.

4.1.4 Conglomerados

En la Tabla 4-2 se presentan las variables categóricas y binarias de la base de datos que se utilizaron para comparar los resultados obtenidos de la clasificación K means.

Tabla 4-2. Variables categóricas y binarias de la base de datos.

Variable	Tipo	Valores	Cantidades
Tajo	Categórica	1 a 6	1= 126 2= 126 3= 168 4= 42 5= 84 6= 84
Punto dentro del tajo	Categórica	1 a 3	1= 273 2= 210 3= 147
Subpunto del tajo	Categórica	1 a 21	Para cada subpunto hay 30 registros.
Hora 1(Mañana)-2(Tarde)-3(Noche)	Categórica	1 a 3	1= 294 2= 294 3= 42
Susceptibilidad (SI-0, NO-1)	Binaria	0 -1	0= 273 1= 357
Dirección del viento (0 Paralelos-1 Perpendicular)	Binaria	0 -1	0= 588 1= 42
Rango (1 Bituminoso A.V.A, 2 Bituminoso A.V.B, 3 Bituminoso A.V.C)	Categórica	1 a 3	1=252 2=294 3=84

En la Tabla 4-3 se presenta el resumen de la clasificación K-means, obtenido del análisis de conglomerados para encontrar grupos óptimos.

Tabla 4-3. Resumen de Clasificación K-means (Mathworks, 1994).

Cantidad de grupos	Cantidad por Subgrupo	Poblaciones que representa
2	273	Susceptible o no susceptible a la combustión
	357	
3	231	N/A
	294	
	105	
4	168	N/A
	105	
	51	
	306	
5	231	N/A
	40	
	168	
	84	
	107	
6	84	Numero de tajos en la mina
	105	
	168	
	103	
	126	
	44	

Comparando la clasificación de K-means con la clasificación original de la base datos, se observa que para una cantidad de grupos igual a 2, K-means separa idénticamente según

la variable susceptibilidad. Esto es muy importante ya que indica que hay dos poblaciones que tienen un comportamiento similar y el factor diferenciador en este caso es la variable susceptibilidad que se refiere a que si el manto es altamente susceptible o poco susceptible a la combustión espontánea.

4.1.5 Regresión logística

Para realizar el análisis de regresión logística, se utilizó el software RStudio especializado en lenguaje de programación, en el cual se hizo de manera discriminada un análisis para las variables extrínsecas, intrínsecas y la base datos completa.

▪ Variables extrínsecas

En la Tabla 4-4 se muestra el modelo de regresión logística desarrollado para las variables extrínsecas.

Tabla 4-4. Modelo de regresión logística variables extrínsecas (RStudio, 2016).

	Valor estimado	Error estándar	Valor z	Pr(> z)
(Intercepto)	-16,038	21,623	-0,742	0,4583
Temperatura ambiente	0,038570	0,108956	0,354	0,7233
Temperatura del manto	0,064653	0,014243	4,539	5,65e-06 ***
Humedad relativa	-0,035993	0,030637	-1,175	0,2401
Presión atmosférica	-0,050072	0,019731	-2,538	0,0112 *
Velocidad del aire	0,584867	0,072348	8,084	6,26e-16 ***
Oxígeno	3,069	0,686253	4,472	7,73e-06 ***
Metano	-1,925	0,209155	-9,206	<2 e-16***
Altura	0,00619	0,002445	2,531	0,0114 *

De los resultados obtenidos a partir del modelo de regresión logística, se puede observar que las variables extrínsecas que son significativas en el fenómeno de combustión espontánea son la temperatura del manto, la presión, la velocidad del aire, el oxígeno, el metano y la altura, ya que el valor P utilizado para la prueba de hipótesis refleja un valor menor que α (0.05). En este caso la temperatura ambiente y la humedad relativa se rechazan al no ser tan significativas.

▪ Variables intrínsecas

En la Tabla 4-5 se muestra el modelo de regresión logística desarrollado para las variables intrínsecas.

Tabla 4-5. Modelo de regresión logística variables intrínsecas (RStudio, 2016).

	Valor estimado	Error estándar	Valor z	Pr(> z)
(Intercepto)	-22,756	0,3744	-6,078	1,22e-09 ***
Temperatura del manto	13,438	0,2264	5,937	2,91e-09 ***
Humedad total del carbón	-10,294	17,813	-0,578	0,563319
Ceniza	-43,918	0,7456	-5,890	3,86e-09 ***
Materia volátil	-53,097	0,8546	-6,213	5,19e-10 ***
Azufre	39,528	0,5867	6,738	1,61e-11 ***
Poder calorífico	44,701	18,482	2,419	0,015582 *
Vitrinita	70,425	10,933	6,442	1,18e-10 ***
Liptinita	24,015	0,6694	3,588	0,000334 ***
Índice Hardgrove	-54,583	10988	-4,967	6,78e-07 ***

De igual manera, se realiza el análisis a partir del modelo de regresión logística, obteniéndose que dentro de las variables intrínsecas significativas en el fenómeno de combustión espontánea se encuentran la temperatura del manto, la ceniza, la materia volátil, el azufre, el poder calorífico, la vitrinita, la liptinita y el índice de molienda Hardgrove, ya que presentan para la prueba de hipótesis un valor P menor que α (0.05). En este sentido, se descarta la humedad total del carbón al no ser tan significativa, teniendo en cuenta la variable respuesta que se plantea en este caso que es la susceptibilidad a la combustión espontánea.

▪ Variables extrínsecas e intrínsecas

Se realizó una regresión logística adicional considerando variables tanto extrínsecas como intrínsecas, pero excluyendo las variables que resultaron ser no significativas dentro del estudio de combustión espontánea, también algunas que mostraron dependencia a través de los coeficientes de correlación y las relacionadas a los análisis petrográficos, debido a la distorsión que se evidenció que generan a partir de análisis previos.

En la Tabla 4-6 y la Tabla 4-7 se presentan los coeficientes de correlación que se hallaron para descartar del análisis aquellas variables que muestren cierta dependencia con otras.

Tabla 4-6. Coeficientes de correlación variables extrínsecas

	Tamb	HR	Atmo	Vaire	O2	CO	CH4	ALT	RS
Tamb	1								
HR	-0,80637192	1							
Atmo	0,1190733	0,11265657	1						
Vaire	-0,1703482	0,07054643	-0,05263598	1					
O2	-0,0248511	-0,02655059	-0,23570638	0,14117448	1				
CO	0,05664578	-0,07356523	-0,05650766	-0,10776246	0,11819984	1			
CH4	0,13635614	-0,04345014	0,10780532	0,12238744	0,15383066	-0,12501702	1		
ALT	-0,07739009	-0,11323569	-0,74127097	0,06485077	0,40293347	0,07557611	0,07411741	1	
RS	0,2903265	-0,16941285	0,13072287	-0,02916546	0,20417573	-0,00710234	0,29842376	0,056288436	1

Tabla 4-7. Coeficientes de correlación variables intrínsecas

	Tmanto	Espesor	HTC	Ceniza	MV	Azufre	BTU	Na	VITR	LIPT	INERT	Pirita	IHARD
Tmanto	1												
Espesor	0,41115467	1											
HTC	-0,44535774	-0,73551418	1										
Ceniza	-0,21352185	-0,19167184	0,14776679	1									
MV	0,29816569	0,47853321	-0,76657629	-0,23825315	1								
Azufre	-0,24504736	-0,54259425	0,37285779	0,33151545	-0,0344643	1							
BTU	0,48101768	0,72994444	-0,96378054	-0,29826075	0,82876148	-0,41276484	1						
Na	0,01521435	-0,07306786	0,41047228	0,46514699	-0,48452194	0,24443826	-0,43147516	1					
VITR	-0,32250873	-0,38413393	0,26510469	0,43920066	0,12058165	0,60170639	-0,24200966	0,18546355	1				
LIPT	0,29755818	0,59266963	-0,51150534	-0,55511335	0,34341157	-0,40697169	0,48333814	-0,38784349	-0,74849453	1			
INERT	0,24275089	0,14780455	-0,0104898	-0,24161436	-0,41269655	-0,60852137	0,00318145	0,0141956	-0,88817873	0,36687554	1		
Pirita	0,31624299	0,41264542	-0,55703377	-0,46509117	0,70979151	-0,08361347	0,60150438	-0,4322778	-0,25426764	0,58149732	-0,05622621	1	
IHARD	-0,09624458	0,13851785	-0,17021039	0,04845119	0,51676797	0,45331997	0,16296248	-0,18216297	0,6042111	-0,1177399	-0,77713814	0,30697747	1

A partir de los coeficientes de correlación, se tiene que, en las variables extrínsecas, la temperatura ambiente y la humedad relativa se relacionan de forma inversa. Por otro lado, dentro de las variables intrínsecas se encontraron correlaciones entre la humedad total del carbón y el poder calorífico (relación inversa), la materia volátil y el poder calorífico (relación directa); y la vitrinita y la Inertinita (relación inversa).

En la Tabla 4-8 se muestra el modelo de regresión logística desarrollado para las variables extrínsecas e intrínsecas.

Tabla 4-8. Modelo de regresión logística variables extrínsecas e intrínsecas RStudio, 2016).

	Valor estimado	Error estándar	Valor z	Pr(> z)
(Intercepto)	-0,9282	0,1704	-5,448	5,10e-08 ***
Temperatura del manto	0,5670	0,1985	2,857	0,004275**
Presión atmosférica	-12,470	0,2876	-4,336	1,45e-05 ***
Velocidad del viento	13,319	0,2150	6,196	5,79e-10 ***
Oxígeno	0,5846	0,1614	3,621	0,000293 ***
Metano	-16,192	0,2159	-7,498	6,46e-14 ***
Altura	0,3465	0,3230	1,073	0,283451
Espesor	0,2685	0,2964	0,906	0,364991
Ceniza	-0,5734	0,1821	-3,149	0,001639 **
Materia volátil	-26,091	0,6479	-4,027	5,66e-05 ***
Azufre	0,1264	0,2344	0,539	0,589824
Poder calorífico	16,996	0,5203	3,266	0,001089 **
Radiación solar	0,1703	0,1502	1,134	0,256962
Índice Hardgrove	13,400	0,4452	3,010	0,002613 **

A partir de los resultados obtenidos del modelo de regresión logística, se puede observar que la altura, el espesor del manto, el azufre contenido en el carbón y la radiación solar, no son influyentes dentro del fenómeno de combustión espontánea, ya que no son significativas en la susceptibilidad del carbón.

4.2 Resultados del análisis multivariante de datos

De acuerdo a los resultados obtenidos del análisis multivariante (variables extrínsecas, variables intrínsecas y ambas), se encontraron un conjunto de variables que constituyen un escenario de ignición, ya que al realizar el análisis de regresión logística se pudo evidenciar que son significativas en la susceptibilidad de los mantos de carbón a la combustión espontánea. En este sentido, en la medida que se logren controlar algunas de estas variables se generarán condiciones en las cuales no se desencadenará el fenómeno.

Es importante resaltar, que para el análisis final se descartaron algunas variables por tener cierta dependencia con otras, ya que no aportaban información adicional al modelo. Esta dependencia se pudo corroborar a partir de los coeficientes de correlación que se calcularon previamente. Por otro lado, durante el proceso de incorporación de variables, se encontró que, al excluir una variable de uno de los modelos de regresión estimados, los coeficientes asociados al resto de variables cambiaron significativamente respecto al modelo que incluía dicha variable, por tanto, esta es considerada un factor de confusión al no mostrar una relación significativa con la variable susceptibilidad, pero sí indirectamente al relacionarse con otras variables que si son significativas en el fenómeno (Peláez, 2006).

A continuación, en la Tabla 4-9 se presentan las variables definitivas que resultan ser las más influyentes en el fenómeno de combustión espontánea y algunas medidas de control que se podrían implementar.

Tabla 4-9. Variables influyentes en la combustión espontánea y medidas de control.

Variable	Medida de control	Relación	Tipo de relación
Temperatura del manto	Se puede controlar por la compañía mediante el sellamiento de las paredes del manto, a través de un material que recubra la superficie. Este material debe tener propiedades de aislamiento térmico, de tal manera que pueda evitar la transferencia de calor desde el exterior hacia el interior producto de la radiación solar. Esto se debe realizar cuando se tengan condiciones normales de temperatura en el manto, es decir, que no haya un sufrido un proceso de calentamiento inicial, ya que de lo contrario se favorecería a la acumulación de calor.	liptinita	Directa
Presión	N/A	Altura sobre el nivel del mar	Inversa
Velocidad del aire	Teniendo en cuenta que esta variable se relaciona directamente con la cantidad de oxígeno que pueda ingresar al manto de carbón y generar la reacción de oxidación, es muy importante evitar que en las paredes finales se tenga una corriente de aire perpendicular al manto. Esto es una consideración que debe tener el equipo de planeamiento a la hora de diseñar los pit, de tal forma que puedan dejar la menor área expuesta del pit al choque perpendicular de la corriente de aire.	N/A	N/A
Oxígeno	A partir del sellamiento, se debe evitar el ingreso de oxígeno al manto, con el fin de evitar la reacción de oxidación, producto de la interacción carbón – oxígeno.	N/A	N/A
Metano	N/A	N/A	N/A
Ceniza	N/A	N/A	N/A
Materia volátil	N/A	Poder calorífico	Directa
Poder calorífico	N/A	Humedad total del carbón - Pirita.	Inversa con Humedad- Directa con Pirita
Índice Hardgrove	Se debe tener un mejor control de la voladura debido al efecto de disipación de energía que se produce cuando esta se desarrolla de forma adecuada, implementando detonadores electrónicos y utilizando pre-corte y/o buffer. Si no se logra una buena disipación de energía, aquellos mantos que tienen un índice alto se podrán fracturar fácilmente y permitir el ingreso de oxígeno al manto, favoreciendo la combustión espontánea.	Rango, Inertinita.	Directa

5.Estrategia para la prevención de la combustión espontánea en los mantos de carbón

5.1 Estrategia actual implementada por Cerrejón

El producto que se ha venido implementado en Cerrejón para el sellamiento en los mantos de carbón es la emulsión asfáltica, también conocida como bitumen, el cual es una mezcla compleja de hidrocarburos de petróleo y agua. Se trata de un producto líquido de color café oscuro a negro, de olor dulce y de carácter ácido. Es una dispersión acuosa de asfalto con una mezcla de surfactantes biodegradables catiónicos y no iónicos. El producto se estabiliza por medio de una solución de tensoactivos que produce abundante espuma y superficies deslizantes, por lo que se recomienda el uso de botas de seguridad antideslizantes. También puede causar irritaciones en ojos, por tanto, se requiere el uso de gafas de seguridad industrial. El contacto con el producto caliente producirá quemaduras intensas. A exposición directa y prolongada con la piel puede causar una leve irritación cutánea, por lo que se sugiere el uso de guantes plásticos industriales. En espacios confinados se debe utilizar equipo de respiración autónoma por presencia de sulfuro de hidrogeno

5.1.1 Aplicación del bitumen

El proceso de sellado consiste en la aplicación de bitumen sobre las paredes de los mantos de carbón que van a quedar expuestas durante un período de tiempo prolongado, garantizando el impedimento de ingreso de oxígeno sobre la superficie del manto, que en últimas es el causante de que se lleve a cabo la reacción de oxidación y posterior ignición. El procedimiento que se utiliza se basa inicialmente en la dilución del bitumen con agua

hasta llevarlo a una concentración del 70% producto y el porcentaje restante de agua. La mezcla se realiza en unos tanques donde se agita hasta obtener una solución homogénea. Posteriormente, se conecta la manguera a la bomba, y se procede al cubrimiento del manto con la solución preparada. Este proceso es realizado por el grupo de control de incendios (Mendoza Daza, 2009).

Figura 5-1. Manto sellado con bitumen en manto de carbón (Mendoza Daza, 2009).



Tal como se puede apreciar en la Figura 5-1, se ha evidenciado que la implementación del bitumen sobre el carbón aísla de manera efectiva el ingreso de oxígeno a los mantos, previniendo la combustión espontánea de carbón, la cual se refleja en los controles realizados luego de que se aplica el producto, donde se evidencia la poca susceptibilidad de incendios sobre las zonas que han sido tratadas con este producto.

5.1.2 Mediciones de ángulo de contacto de bitumen diluido con agua

Inicialmente se realizaron mediciones de ángulo de contacto para determinar las propiedades de adherencia del bitumen a diferentes concentraciones. A continuación en la Figura 5-2 se presentan los resultados obtenidos de las mediciones de ángulo de contacto de bitumen a diferentes concentraciones y al transcurrir 10 segundos de haber caído la gota.

Figura 5-2. (a) Ángulo de contacto bitumen 50% diluido con agua, (b) ángulo de contacto bitumen 70% diluido con agua, (c) ángulo de contacto bitumen 100%.



(a)



(b)



(c)



En la Tabla 5-1 se presenta el resumen de los resultados obtenidos de las mediciones de ángulos de contacto del bitumen sobre la superficie del carbón proveniente de Cerrejón.

Tabla 5-1. Ángulos de contacto bitumen a diferentes concentraciones.

Razón bitumen/agua (Volumen)	Ángulo de contacto bitumen	
	Ángulo izquierdo	Ángulo derecho
50/50	65,6°	61,8°
70/30	57,2°	55,9°
100/0	43,6°	44,4°

De lo anterior, se puede evidenciar que a medida que se diluye la concentración de bitumen en la solución, se disminuye su capacidad de adherencia, pero aun en concentraciones de 70% y 50% el bitumen diluido con agua mantiene propiedades de adherencia sobre la superficie del carbón.

5.2 Propuestas para evitar la ignición en los mantos de carbón de la mina Cerrejón

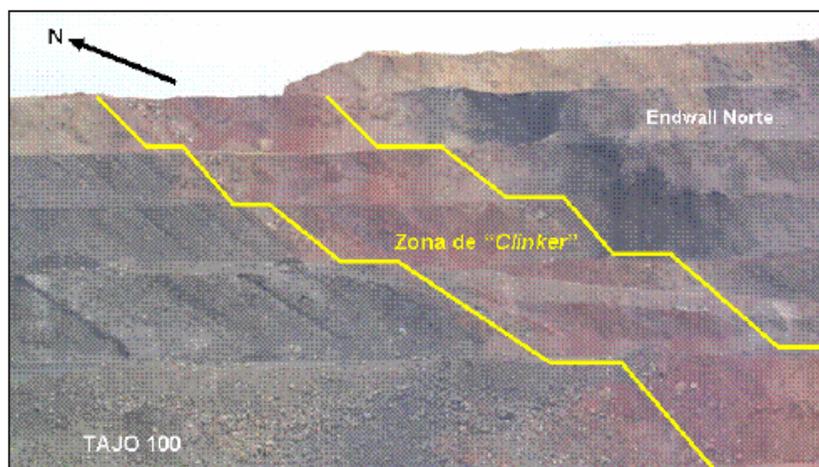
Para mejorar la estrategia implementada actualmente por Cerrejón con el fin de evitar la ignición en los mantos de carbón de la mina, se analizaron diferentes estrategias de sellamientos y se llevaron a cabo en campo a través de pruebas pilotos que permitieran medir la eficiencia de cada una de estas. Dentro de las pruebas realizadas en la mina se incluyeron las de bitumen con agua con la finalidad de observar las diferencias de estos sellamientos con las alternativas propuestas. Algunas de las pruebas pilotos que se desarrollaron fueron las siguientes:

- Bitumen-agua (70/30)
- Bitumen-agua (50/50)
- Bitumen-salmuera (70/30)
- Bitumen-salmuera (50/50)
- Cemento-Arena fina (Relación 1 a 10)
- Cemento-cal (Relación 2 a 1)

- Suspensión de clinker

El clinker es un producto que se encuentra de forma abundante en Cerrejón, debido a que es una roca pirometamórfica formada por la alteración térmica extrema de lodolitas y areniscas durante la combustión natural de los mantos de carbón (Quintero, Candela, Ríos, Montes, & Uribe, 2009), por lo tanto no debe confundirse con el producto clinker que se utiliza en la industria del cemento, el cual resulta de la calcinación de caliza y arcilla a alta temperatura. Durante la combustión, la roca a su alrededor alcanza temperaturas de aproximadamente 350°C a unos 20 o 30 metros del incendio, pero es solo cuando alcanza 600°C que empieza a sufrir alteraciones térmicas notables. En el hogar de la combustión o del incendio, especialmente en aquella zona que recibe suministro permanente de oxígeno, la temperatura se incrementa drásticamente en un rango que varía entre 1500 y 2100 °C, por lo cual la roca sufre una fusión parcial (Angel & Herrera, 2004). El clinker un material poroso, de color rojo y con alta resistencia térmica, el cual podría ser aprovechado para generar una suspensión que sirva como cubrimiento a los mantos de carbón, evitando el fenómeno de ignición. Se han identificado 16 zonas de clinker, las cuales están controladas estructuralmente por las discontinuidades tectónicas, asociadas a los sistemas de fallas del cinturón Cerrejón-Ranchería y a los plegamientos del sector. En la Figura 5-3 se observa un cuerpo de clinker ubicado en el tajo 100 de Cerrejón.

Figura 5-3. Zona de clinker en el tajo 100 de Cerrejón (Angel & Herrera, 2004).



En la Tabla 5-2 se presentan las cantidades utilizadas de cada producto en las diferentes pruebas. Cabe resaltar, que la relación que se utilizó para la preparación de la salmuera fue 24 gramos de sal por 1 litro de agua.

Tabla 5-2. Cantidades utilizadas de los productos en cada prueba.

Prueba	Producto aplicado	Materiales	Cantidad	Unidades
1	Bitumen-Agua (70/30)	Bitumen	210	Litros
		Agua	90	Litros
2	Bitumen-Agua (50/50)	Bitumen	210	Litros
		Agua	210	Litros
3	Bitumen-Salmuera (50/50)	Bitumen	210	Litros
		Salmuera	210	Litros
4	Bitumen-Salmuera (70/30)	Bitumen	210	Litros
		Salmuera	90	Litros
5	Cemento-Arena fina	cemento	9	Kilos
		Arena	90	Kilos
		Cemento	25	Kilos
6	Cemento-Cal (Relación 2 a 1)	Cal	12.5	Kilos
		Agua	40	Litros
		Clinker	40	Kilos
7	Suspensión de clinker	Cal	20	Kilos
		Agua	88	Litros

A cada una de las pruebas se le realizó un seguimiento periódico semanal, para evaluar aspectos como la adherencia, consistencia, erosión eólica y grosor de la capa formada.

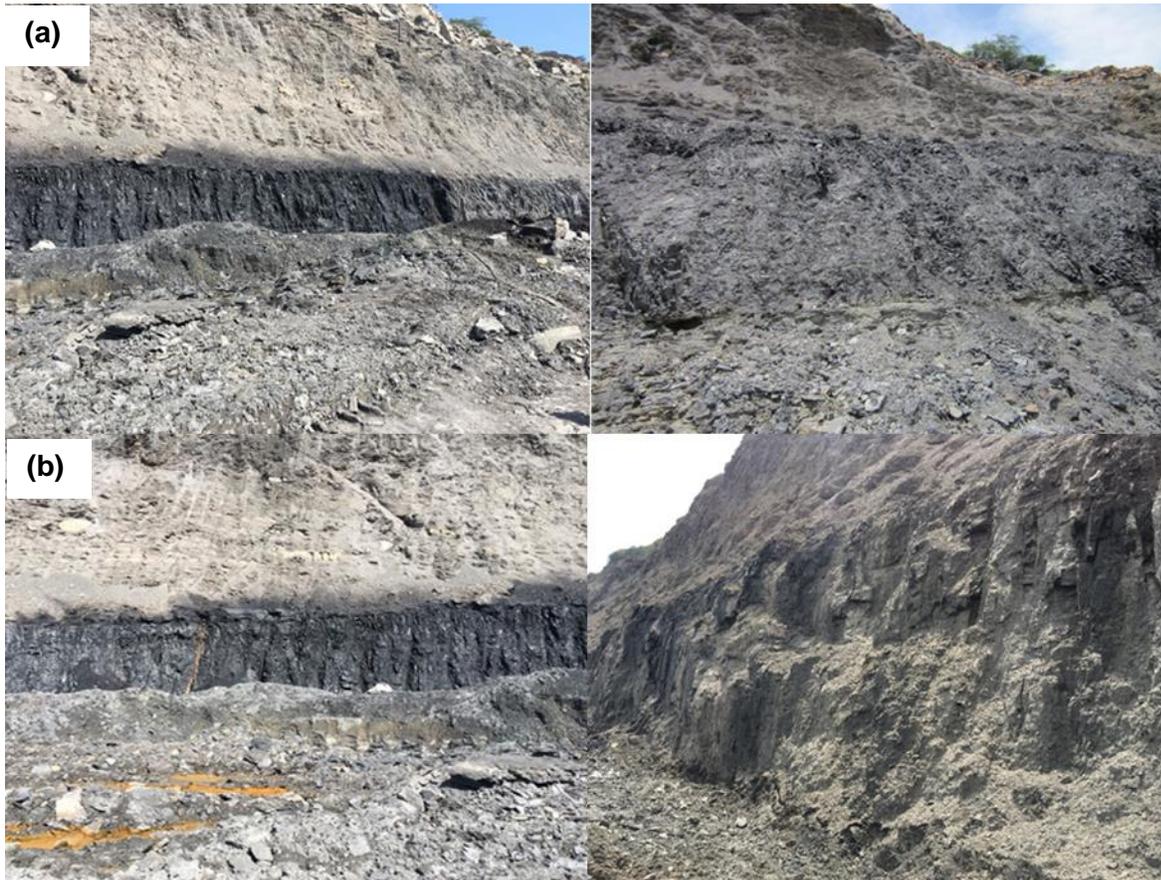
En la Figura 5-4a se presenta el sellamiento realizado con bitumen-agua en una relación 70/30 el día que se aplicó el producto y dos meses después de la aplicación, y en la Figura 5-4b se observa el sellamiento realizado con bitumen-agua en una relación 50/50 en los mismos instantes de tiempo.

Figura 5-4. (a) (Izq.) Sellamiento bitumen-agua 70/30 día de la prueba y (Der.) dos meses después, (b) (Izq.) Sellamiento bitumen-agua 50/50 día de la prueba y (Der.) dos meses después.



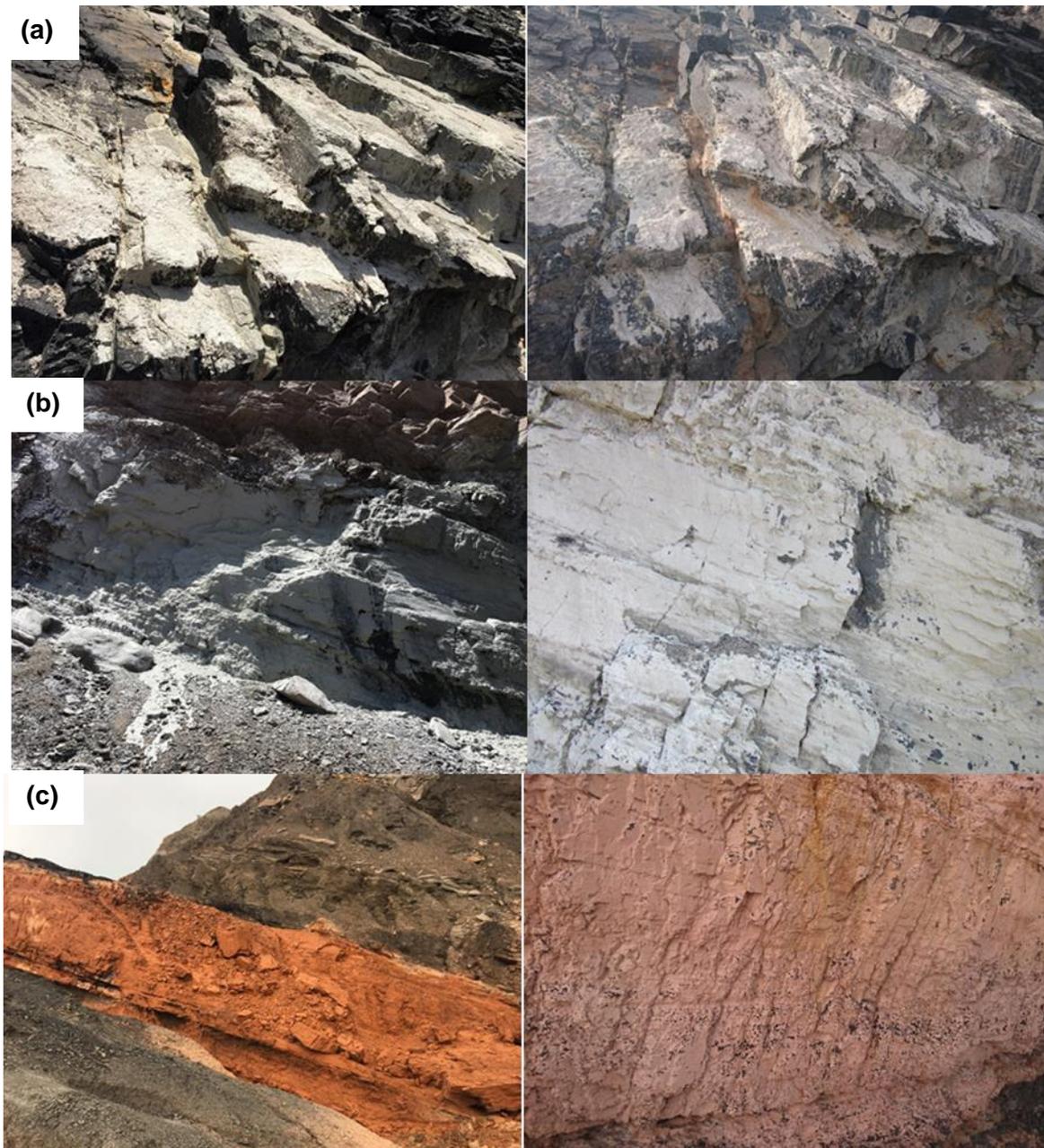
En la Figura 5-5a se presenta el sellamiento realizado con bitumen-salmuera en una relación 50/50 el día que se aplicó el producto y dos meses después de la aplicación, y en la Figura 5-5b se observa el sellamiento realizado con bitumen-agua en una relación 70/30 en los mismos instantes de tiempo.

Figura 5-5. (a) (Izq.) Sellamiento con bitumen-salmuera 50/50 día de la prueba y (Der.) dos meses después. (b) (Izq.) Sellamiento con bitumen-salmuera 70/30 día de la prueba y (Der.) dos meses después.



En la Figura 5-6a se presenta el sellamiento realizado con suelo cemento el día que se aplicó el producto y dos meses después de la aplicación, y en la Figura 5-6b se observa el sellamiento realizado con cemento-cal en una relación 2 a 1 en los mismos instantes de tiempo y en la Figura 5-6c se tiene el sellamiento con la suspensión de clinker bajo las mismas condiciones

Figura 5-6. (a) (Izq.) Sellamiento con suelo cemento día de la prueba y (Der.) dos meses después. (b) (Izq.) Sellamiento con relación 2 a 1 cemento-cal día de la prueba y (Der.) dos meses después. (c) (Izq.) Sellamiento con suspensión de clinker de la prueba y (Der.) dos meses después.



5.2.1 Alternativa de sellamiento seleccionada según los resultados de las pruebas piloto

Los seguimientos realizados sobre los diferentes mantos donde se aplicaron los sellamientos permitieron evidenciar que la suspensión de clinker y de cemento-cal fueron fuertemente afectados por la erosión eólica, debido a que la capa formada no era lo suficientemente gruesa para evitar que la acción del viento actuara directamente sobre las aristas del manto de carbón donde se reflejaba la mayor irregularidad. Esta condición es desfavorable teniendo en cuenta que el manto de carbón queda con zonas expuestas que pueden entrar en contacto con el oxígeno del aire y facilitar la reacción de combustión. El suelo cemento por su parte tuvo algunas dificultades en la aplicación, debido a que no se tuvieron los equipos apropiados, pero alcanzó buenas propiedades de adherencia y consistencia en las zonas del manto donde fue aplicado.

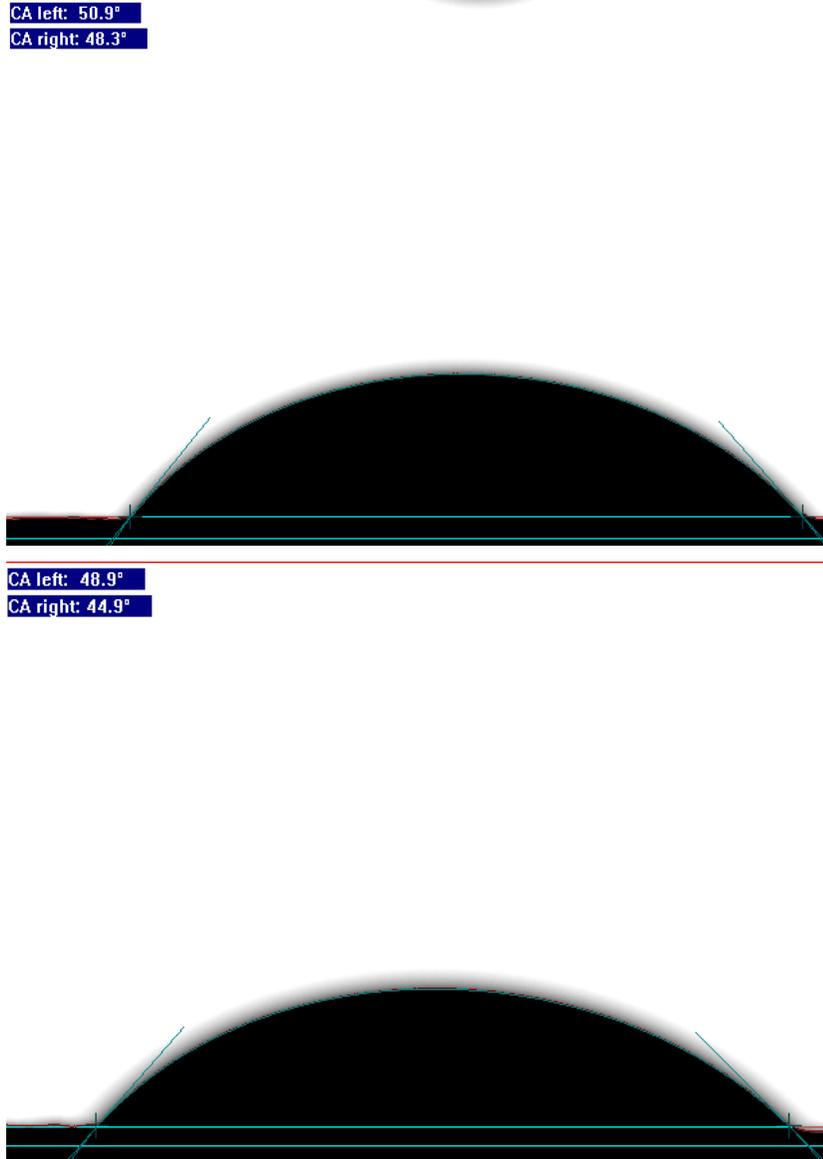
El bitumen diluido con salmuera en una concentración 50/50 es la mejor alternativa de sellamiento que se obtuvo a partir de las pruebas desarrolladas, puesto que alcanza una mejor adherencia y consistencia que el bitumen con agua a la misma concentración. Se evidenció a su vez que la salmuera mejora el rendimiento del bitumen durante la aplicación, al abarcar mayor área con la misma cantidad de producto. En la prueba realizada con bitumen y salmuera en una relación 50/50 se utilizaron 420 litros de solución para abarcar un área de 210 metros cuadrados, la cual sería la cantidad necesaria que se requeriría para cubrir dicha área, si se utilizara bitumen con agua en igual concentración. Se logró un ahorro de 80 litros de solución, que demuestran que el uso de la salmuera aporta beneficios muy importantes en el sellado. Adicionalmente, se tiene que la sal actúa como sustancia inhibidora de la combustión espontánea de carbón, aumentando la energía que requiere el sistema para alcanzar el proceso de ignición. Es importante resaltar que el bitumen con salmuera 70/30 a pesar de presentar muy buenas propiedades no fue seleccionado, puesto que genera un gasto mayor de producto innecesariamente al formar una capa extremadamente gruesa.

El rendimiento del bitumen diluido con salmuera es igual a 0,62 m²/litro, mientras que el rendimiento del bitumen diluido con agua en igual concentración es de 0,5 m²/litro. En este sentido, teniendo en cuenta que el valor aproximado de bitumen es \$ 1.817/litro y que en el año 2017 se selló un área total de 146.343 m², se tiene que la empresa Cerrejón se hubiese ahorrado un valor de \$ 101.297.231 si se hubiese implementado durante todo el año la propuesta de bitumen diluido con salmuera.

5.2.2 Mediciones de ángulo de contacto de bitumen diluido con salmuera

Se preparó una salmuera en el laboratorio con el fin de evaluar las propiedades de adherencia del bitumen cuando es diluido con esta solución. En la Figura 5-7a se presenta el resultado obtenido de la medición de ángulo de contacto del bitumen en una concentración de 50% diluido con salmuera y en la Figura 5-7b se muestra el resultado de la medición de ángulo de contacto del bitumen en una concentración de 70% diluido con salmuera.

Figura 5-7. (a) Ángulo de contacto bitumen 50% diluido con salmuera. (b) Ángulo de contacto bitumen 70% diluido con salmuera.



En la Tabla 5-3 se presenta el resumen de los resultados obtenidos de las mediciones de ángulos de contacto del bitumen sobre la superficie del carbón proveniente de Cerrejón.

Tabla 5-3. Ángulos de contacto bitumen diluido con salmuera.

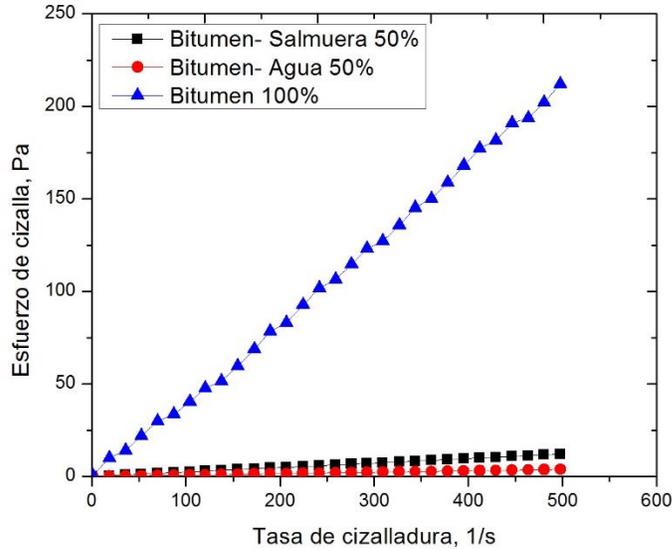
Razón bitumen/agua (Volumen)	Ángulo de contacto bitumen	
	Ángulo izquierdo	Ángulo derecho
50/50	50,9°	48,3°
70/30	48,9°	44,9°

Se observa que el uso de salmuera sobre el bitumen mejora las propiedades de adherencia con respecto al agua.

5.2.3 Viscosidad del bitumen

Las mediciones de viscosidad se realizaron con la finalidad de comparar el comportamiento de las soluciones conformadas de bitumen con salmuera y bitumen con agua. Para esto fue necesario el estudio del flujo y la deformación de la materia sometidas a fuerzas (Méndez, A., Pérez, L., Paniagua, 2010).

Según los modelos de viscosidad, se encontró que el bitumen en diferentes concentraciones diluido con agua o salmuera, presenta comportamiento de fluidos newtonianos generalizado, donde la relación entre el esfuerzo de corte y la rapidez de deformación es lineal, por tanto, la viscosidad depende de la tasa de cizalladura a la cual son sometidos. Los resultados de la viscosidad de los productos se muestran en la Figura 5-8 y en la Tabla 5-4.

Figura 5-8. Esfuerzo de cizalla vs tasa de cizalladura (OriginLab Corporation, 1992)**Tabla 5-4.** Viscosidad del bitumen en diferentes concentraciones diluido con agua o salmuera.

Soluciones	Viscosidad (Centipoise)
Bitumen 100%	428400
Bitumen 50%-Salmuera 50%	24200
Bitumen 50%- Agua 50%	7600

Se obtuvo que el bitumen al ser diluido con agua o salmuera a una concentración de 50%, disminuye su viscosidad, con respecto al bitumen puro. Esto es muy importante, teniendo en cuenta que estas soluciones requieren ser bombeadas y aplicadas sobre los mantos de carbón que son propensos a la combustión espontánea. El bitumen con salmuera adquiere una viscosidad mayor que el bitumen con agua a la misma concentración, pero ambas soluciones pueden ser bombeadas sin problema en la aplicación de los sellamientos.

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

Los mantos de Cerrejón son escenarios de combustión espontánea por las condiciones ambientales, estructurales y aspectos intrínsecos del carbón, promovidas por sinergias del sistema que impulsan que ocurra el fenómeno, demostrado desde la génesis del depósito donde se han presentado paleoincendios y se han identificado incluso zonas de clinker, que permiten entender que la actividad minera no es la única causante de la problemática, y por tal razón es importante establecer medidas de prevención para evitar futuros incendios.

A partir de la termodinámica, se pudo evidenciar que la reacción de oxidación de carbón es factible incluso a temperatura ambiente, puesto que la energía libre de gibbs en el intervalo de temperatura de 0-200 °C indica la espontaneidad de la reacción, lo cual sumado a que el valor de la constante de equilibrio es muy grande en todo el intervalo de temperatura y la presión parcial de oxígeno es muy cercana a cero, se tiene que la reacción tiende a la formación de productos como el dióxido de carbono y el monóxido de carbono, siendo fuertemente irreversible.

Analizando la reacción de oxidación del carbón que produce dióxido de carbono en una partícula esférica y en una placa de carbón, se encontró que la etapa controlante en ambos casos son los procesos difusionales, relacionados con la difusión de oxígeno desde el seno del fluido hasta la superficie del manto de carbón, lo cual está relacionado con las altas temperaturas que alcanza el carbón producto de la acumulación de calor, favoreciendo a que el sistema tenga la suficiente energía de activación para que la reacción química se pueda desarrollar fácilmente. A su vez se encontró que la geometría influye en la cinética de la reacción, siendo más rápida para partículas esféricas que pueden asemejarse al

polvo de carbón, que para una placa que puede representar al manto de carbón propiamente.

Los rangos que se obtuvieron a partir del análisis próximo completo fueron de carbones bituminosos alto en volátiles A, B y C, repartidas en las 14 muestras que se tomaron en los diferentes tajos, encontrándose en general carbones con alto contenidos en humedad, materia volátil y poder calorífico.

El contenido de pirita en las muestras de carbón es inferior al 1%, por tanto, el aporte que presenta al fenómeno de combustión espontánea es mínimo, teniendo en cuenta que la concentración debe ser superior al 2% para ser significativa en el proceso de autocalentamiento del carbón. Esto a su vez se pudo evidenciar en los resultados de la regresión logística al no ser directamente una variable influyente en la susceptibilidad de los carbones a la combustión.

En general, se encontró que el índice de molienda de las 14 muestras de carbón analizadas en el laboratorio es muy similar, variando entre valores de 46 y 55, lo que les confiere a los mantos de Cerrejón una resistencia media al fracturamiento, por lo tanto, si en las voladuras no hay una buena disipación de energía, los mantos cercanos a las zonas intervenidas tenderán a fracturarse, permitiendo el ingreso de oxígeno y facilitando la reacción de oxidación.

Los resultados del análisis multivariante de datos arrojaron que las variables más influyentes en el fenómeno de combustión espontánea de carbón son la temperatura del manto, la presión atmosférica, la velocidad del viento, el oxígeno, el metano, la altura, la ceniza, la materia volátil, el poder calorífico, la vitrinita, la liptinita y el índice de Hardgrove. La sinergia entre este conjunto de variables constituye un escenario que favorece a la ignición del carbón, por lo cual se deben establecer medidas para controlar aquellas variables que estén al alcance. En la medida en que se controlen algunas de estas, se impide la conformación de dicho escenario de ignición. Las variables que podrían ser controladas son la temperatura del manto, la velocidad del viento y el oxígeno.

Según los resultados del análisis multivariante de datos, se encontró que la radiación solar no es una variable determinante en el fenómeno de combustión espontánea de carbón, lo cual se debe a que los diferentes mantos que fueron considerados en el estudio tanto

altamente susceptibles como poco susceptibles a la combustión presentaron niveles de radiación similares en la escala de tiempo en la que se desarrollaron las mediciones.

La medida de control más importante para evitar la ignición del carbón, es a través de los sellamientos a las paredes de los mantos de carbón. Este producto debe ser altamente impermeable, con el fin que se evite el ingreso de oxígeno al manto de carbón, favoreciendo la reacción de oxidación.

El uso de inhibidores en el agua utilizada para la preparación de los productos de sellado es una medida adicional para prevenir el fenómeno de combustión espontánea, ya que aumenta la energía de activación que debe alcanzar el carbón para generar la ignición.

El uso de cementos pobres sobre los mantos de carbón es una alternativa que a largo plazo puede resultar más económico por las condiciones de durabilidad y resistencia que tiene el propio cemento.

A partir del desarrollo de las pruebas piloto y sus respectivos seguimientos, se pudo concluir que el bitumen en concentraciones de 50% y 70% diluido con salmuera, presentan mejores propiedades de adherencia y consistencia, comparado con el bitumen diluido con agua en las mismas concentraciones. Esto se pudo corroborar en campo, evaluando aspectos como la resistencia, la erosión del viento y el grosor de la capa formada después de la aplicación. Se evidenció a su vez que la salmuera mejora el rendimiento del bitumen durante la aplicación, al abarcar mayor área con la misma cantidad de producto. En la prueba realizada con bitumen y salmuera en una relación 50/50 se utilizaron 420 litros de solución para abarcar un área de 210 metros cuadrados, la cual sería la cantidad necesaria que se requeriría para cubrir dicha área, si se utilizara bitumen con agua en igual concentración. Se logró un ahorro de 80 litros de solución, que demuestran que el uso de la salmuera aporta beneficios muy importantes en el sellado. Adicionalmente, se tiene que la sal actúa como sustancia inhibidora de la combustión espontánea de carbón, aumentando la energía que requiere el sistema para alcanzar el proceso de ignición.

Los sellamientos desarrollados con los productos cemento-cal y suspensión de clinker, no brindaron resultados satisfactorios con los seguimientos realizados, ya que se observó que los productos presentaron muy baja adherencia y consistencia con el tiempo, y, además, se vieron muy fuertemente afectados por la erosión eólica, debido a la concentración de energía que se produce por el viento en las aristas de los mantos.

El sellado con suelo-cemento, a pesar de no haber sido realizado correctamente con el equipo apropiado, mostró muy buenas propiedades de adherencia y consistencia al transcurrir el tiempo. Se pudo evidenciar que en aquellas zonas donde se logró una mezcla homogénea, el producto alcanzó una alta resistencia, por lo cual sería una excelente alternativa para establecer sellamientos definitivos dentro de la mina en aquellos mantos de carbón que no van a ser intervenidos posteriormente.

Dada la importancia de la geometría y la regularidad de los mantos de carbón en la cinética de la reacción de oxidación y el alcance del punto de ignición, es pertinente establecer como medidas preventivas para evitar la combustión espontánea de carbón el uso de detonadores electrónicos y la implementación de precorte y/o buffer en la voladura, ya que de esta manera se logra un mejor aprovechamiento de la energía liberada en la fragmentación de la roca, se genera un menor daño al macizo rocoso y se logra un mayor control en el nivel de vibraciones, imposibilitando la aparición de nuevas grietas, la apertura de fracturas preexistentes en el macizo rocoso y la irregularidad en la pared final, que en últimas favorecen la interacción del carbón y el oxígeno.

6.2 Recomendaciones

A partir del trabajo desarrollado, se pueden plantear algunas recomendaciones para futuros trabajos de investigación:

- Evaluar la factibilidad de la implementación de nuevas tecnologías como las barreras de viento que se puedan desarrollar para la prevención de la combustión espontánea en mantos de carbón, teniendo en cuenta los beneficios que estas pueden otorgarle.
- Dentro de los inhibidores además del cloruro de sodio que pueden contribuir al aumento de la energía de activación para la ignición del carbón se encuentran el cloruro de potasio, el cloruro de litio, el cloruro de magnesio, cloruro de zinc, cloruro de calcio, sulfato de magnesio, sulfato ferroso, fosfato de magnesio, el clorato de hierro y el sulfato de hierro. Por lo tanto, se sugiere realizar estudios combinando varios de los inhibidores, evaluando la eficiencia de estos como mecanismos de prevención de incendios.

- Evaluar los efectos en el fenómeno de ignición que se generan en los mantos de carbón cuando las paredes finales quedan bien definidas (pocas rugosidades) y cuando quedan fuertemente afectadas por la voladura.
- Evaluar la probabilidad de uso del producto clinker obtenido de la combustión en los mantos de carbón en el aprovechamiento de las propiedades puzolánicas en la industria del cemento
- Evaluar la durabilidad de los sellamientos en los mantos de carbón con bitumen y suelo cemento, de tal manera que se pueda establecer el tiempo en el cual estos deben ser reemplazados.

Bibliografía

- Adamus, A., Šancer, J., Guřanov, P., & Zubiček, V. (2011). An investigation of the factors associated with interpretation of mine atmosphere for spontaneous combustion in coal mines. *Fuel Processing Technology*, 92(3), 663–670. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.11.025>
- Angel, S. O. L., & Herrera, C. (2004). *CARTOGRAFIA DE LAS ZONAS DE “CLINKER” EN LAS ÁREAS DE MINERÍA DE LA MINA EL CERREJON*. Albania, Guajira.
- Angelone, S., Garibay, M. T., & Cauhapé C., M. (2006). *Geología y Geotecnia*. Universidad Nacional de Rosario. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Geolog+a+y+Geotecnia#4>
- ANM. (2017). Colombia registra producción récord de carbón en 2016 | Agencia Nacional de Minería ANM. Retrieved October 12, 2017, from https://www.anm.gov.co/?q=colombia_registra_produccion_record_de_carbon_en_2016_principal2
- Beamish, B. (2015). Spontaneous Combustion of Coal - General Background.
- Beamish, B. B. (2015). Spontaneous Combustion of Coal - Strategy for Assessing Propensity.
- Beamish, B. B., Barakat, M. A., & St. George, J. D. (2001). Spontaneous-combustion propensity of New Zealand coals underadiabatic conditions. *International Journal of Coal Geology*, 45(2–3), 217–224. [https://doi.org/10.1016/S0166-5162\(00\)00034-3](https://doi.org/10.1016/S0166-5162(00)00034-3)
- Becerra Espinosa, J. M. (2010). Estadística descriptiva. In *Facultad De Contaduria Y Administracion-UNAM* (Vol. I, pp. 1–30).
- Berranco Melendez, R. (2011). *THE CHARACTERISATION AND COMBUSTION OF SOUTH AMERICAN COALS*. UNIVERSITY OF NOTTINGHAM.
- Blandón Montes, A. (2015). Notas de clase de Caracterización avanzada de Carbones. Medellín.

- Borghi, M. D. E. L. (1976). A technique for solution of the equations for fluid-solid reactions with diffusion, 31.
- Bravo Rodriguez, J. (2014). analisis próximos. Retrieved October 8, 2017, from <https://es.scribd.com/document/243144454/analisis-proximos-pdf>
- Buchanan, J. R. (2010). Measures of Central Tendency, 264–266.
- Bustamante Rúa, M. O. (2016a). Notas de clase de Introducción de sistemas heterogéneos. Medellín.
- Bustamante Rúa, M. O. (2016b). Notas de clase flotacion avanzada de minerales. Medellín.
- Carras JN, Day S, Saghafi A, R. O. C. (2005). Spontaneous Combustion in Open Cut Coal Mines -- Recent Australian Research Spontaneous Combustion in Open Cut Coal Mines — Recent. *COAL2005 Conference*, 195–200.
- Cort, V. J. (1978). Prof. Dr. Vicente J. Cortés 1. *Carbón*, 1–47.
- Cortes Ibarra, M. de los A., & Baribay, R. (2015). Temperatura. In *Academia Bioinstrumental* (p. 176).
- De La Fuente, L. (2016). *Análisis Componentes Principales*.
- De la Fuente Fernández, S. (2011). Análisis De Conglomerados. *Fac. Ciencias Económicas Y Empresariales*, 55. Retrieved from <http://www.fuenterrebollo.com/Economicas/ECONOMETRIA/SEGMENTACION/CONGLOMERADOS/conglomerados.pdf>
- Deng, J., Zhao, J., Zhang, Y., Huang, A., Liu, X., Zhai, X., & Wang, C. (2016). Thermal analysis of spontaneous combustion behavior of partially oxidized coal. *Process Safety and Environmental Protection*, 104, 218–224. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.09.007>
- Dodamani, S. (2014). Controlling spontaneous combustion of coal by pyro-seizure method using brine freezing process and low temperature CO 2 injection Shankar Dodamani. *Journal of Applied Chemistry*, 51–53. Retrieved from www.iosrjournals.org
- Finkelman, R. B. (2004). Potential health impacts of burning coal beds and waste banks. *International Journal of Coal Geology*, 59(1–2), 19–24. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2003.11.002>
- Gómez Giraldo, H. (2009). Estadística, 271. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/2010/>
- Gómez Rojas, O. P., Carmona Lopez, I., & Bustamante Rúa, M. O. (2007). ANALYSIS OF LIBERATION OF THE GROUPS OF MACERALES OF THE COAL:COLOMBIAN

- COALS. *Boletín Ciencias de La Tierra* *Ciencias de La Tierra*, 21, 14.
- Gupta, O. P. (1990). *Fuels, Furnaces and Refractories* (4th Editio). Delhi: Khanna Publications.
- Hernández, S. (2005). *Biplots robustos*. Universidad de Salamanca, España.
- Huo, H., Ni, Z., Gao, C., Zhao, E., Zhang, Y., Lian, Y., ... Cui, T. (2015). A study of coal fire propagation with remotely sensed thermal infrared data. *Remote Sensing*, 7(3), 3088–3113. <https://doi.org/10.3390/rs70303088>
- Huw, P., Sezer, U., & Kelello, C. (2009). *Prevention and Control of Spontaneous Combustion*. Johannesburg. Retrieved from [http://www.coaltech.co.za/chamber_databases/coaltech/Com_DocMan.nsf/0/AAB37D3149EC72FE42257839002F59BB/\\$File/Spontaneous Combustion Guidelines - Feb 2011.pdf](http://www.coaltech.co.za/chamber_databases/coaltech/Com_DocMan.nsf/0/AAB37D3149EC72FE42257839002F59BB/$File/Spontaneous%20Combustion%20Guidelines%20-%20Feb%202011.pdf)
- Instituto Tecnológico GeoMinero de España. (2015). *Manual de Perforación y Voladuras en rocas*. Madrid, España.
- Inzunza, J. (2005). Radiación solar y terrestre. *Ciencias Integradas II*, 1–15.
- Inzunza R, J. (2002). Mecanismos De Transferencia De Calor. *Física: Introducción a La Mecánica*, 407–427.
- J, E., Q, C., R, S., J, H., & S, L. (2017). Logistic regression model for detecting radon prone areas in Ireland. *Science of the Total Environment*, 13.
- Kaymakçi, E., & Didari, V. (2002). Relations between coal properties and spontaneous combustion parameters. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 26(1), 59–64. [https://doi.org/10.1016/S0140-6701\(03\)90480-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6701(03)90480-2)
- Kuenzer, C., & Stracher, G. B. (2012). Geomorphology of coal seam fires. *Geomorphology*, 138(1), 209–222. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.09.004>
- León González, Á., Llinás Solano, H., & Tilano, J. (2011). Multivariate analysis playing main components to homeless people case. *Revista Científica Ingeniería Y Desarrollo*, 23(23), 119–142. Retrieved from <http://rcientificas.uninorte.edu.co/index.php/ingenieria/article/viewArticle/2098/4467>
- Levenspiel, O. (1986). *Ingeniería de las reacciones químicas*.
- Levenspiel, O. (2012). *Ingeniería de las reacciones químicas*. (S. . REVERTÉ, Ed.) (6th ed.). Barcelona.
- Lopez Pérez Jaime. (2013). Tema 17: ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES | LA ESTADÍSTICA: UNA ORQUESTA HECHA INSTRUMENTO. Retrieved October 11,

- 2017, from <https://estadisticaorquestainstrumento.wordpress.com/2012/12/29/tema-17-analisis-de-componentes-principales/>
- Mantri, V. B., Gokarn, A. N., & Doraiswamy, L. K. (1976). Analysis of Gas-Solid reactions: Formulation of a general model, *31*, 779–785.
- Mathworks. (1994). MATLAB - El lenguaje del cálculo técnico. Retrieved October 8, 2017, from <https://es.mathworks.com/products/matlab.html>
- Méndez, A., Pérez, L., Paniagua, A. (2010). Determinación de la viscosidad de fluidos newtonianos y no newtonianos (una revisión del viscosímetro de Couette). *Latin-American Journal of Physics Education*, *4*, 237–245.
- Mendoza Daza, A. D. (2009). Prevención y control de autocombustión del carbón in situ en la mina carbones del Cerrejón. Medellín.
- Mine Safety Operations Branch Industry and Investment NSW. (2011). Technical Reference for Spontaneous Combustion Management Guideline. New South Wales.
- Mirzaei, M. (2017). A new method for measuring the contact angles from digital images of liquid drops. *Micron*, *102*(August), 65–72. <https://doi.org/10.1016/j.micron.2017.09.001>
- Moretton, J. (1996). Monóxido de carbono. Retrieved March 6, 2017, from <http://www.cricyt.edu.ar/enciclopedia/terminos/MonoxiCar.htm>
- Moxon, N. T., & Richardson, S. B. (1985). Development of a self-heating index for coal. *Coal Preparation*.
- OriginLab Corporation. (1992). OriginLab. Massachusetts.
- Peláez, I. M. (2006). Modelos de regresión: lineal simple y regresión logística (pp. 195–214).
- Peña, D. (2002a). Análisis de datos multivariantes. <https://doi.org/8448136101>
- Peña, D. (2002b). ANÁLISIS DE DATOS MULTIVARIANTES.
- Peña, D., & Prito, F. (2001). Multivariate outlier detection and robust covariance matrix estimation. *Technometrics*.
- Pone, J. D. N., Hein, K. A. A., Stracher, G. B., Annegarn, H. J., Finkleman, R. B., Blake, D. R., ... Schroeder, P. (2007). The spontaneous combustion of coal and its by-products in the Witbank and Sasolburg coalfields of South Africa. *International Journal of Coal Geology*, *72*(2), 124–140. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2007.01.001>
- Qi, G., Wang, D., Zheng, K., Xu, J., Qi, X., & Zhong, X. (2015). Kinetics characteristics of coal low-temperature oxidation in oxygen-depleted air. *Journal of Loss Prevention in*

- the Process Industries*, 35, 224–231. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2015.05.011>
- Qi, X., Xin, H., Wang, D., & Qi, G. (2013). A rapid method for determining the R 70 self-heating rate of coal. *Thermochimica Acta*, 571, 21–27. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2013.08.008>
- Quintero, J. A., Candela, S. A., Ríos, C. A., Montes, C., & Uribe, C. (2009). Spontaneous combustion of the Upper Paleocene Cerrejón Formation coal and generation of clinker in La Guajira Peninsula (Caribbean Region of Colombia). *International Journal of Coal Geology*, 80(3–4), 196–210. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2009.09.004>
- Ren, W., Shi, J., Guo, Q., Zhao, Q., & Bai, L. (2017). The influence of dust particles on the stability of foam used as dust control in underground coal mines. *Process Safety and Environmental Protection*, 111, 740–746. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.08.043>
- Revista seguridad minera. (2018). Ventajas de los detonadores eléctricos en actividades mineras. Retrieved March 5, 2018, from <http://www.revistaseguridadminera.com/operaciones-mineras/ventajas-de-los-detonadores-electricos-en-actividades-mineras/>
- Rincón, F., Castrillón, L., & Rivera, M. (2016). *Método estadístico multivariado-regresión logística para estudio de susceptibilidad ante deslizamientos de la cuenca La Loma en el municipio de Santa Bárbara , Antioquia Conceptos previos Movimientos en masa*. Medellín, Colombia.
- Rindskopf, D., & Shiyko, M. (2010). Measures of Skewness and Kurtosis. *E-Handbook of Statistical Methods*, (page 260), 267–273. Retrieved from <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda35b.htm>
- RStudio. (2016). RStudio – Open source and enterprise-ready professional software for R. Retrieved October 8, 2017, from <https://www.rstudio.com/>
- Senneca, O., Scala, F., Chirone, R., & Salatino, P. (2017). Relevance of structure, fragmentation and reactivity of coal to combustion and oxy-combustion. *Fuel*, 201, 65–80. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.11.034>
- SGS. (1995). Índice de molturabilidad Hardgrove (HGI) | Minería | SGS Colombia. Retrieved October 19, 2017, from <http://www.sgs.co/es-es/mining/analytical-services/coal-and-coke/hardgrove-grindability-index-hgi>
- Singh, P. (2014). An Investigation into Spontaneous Heating Characteristics of Coal and its Correlation with Intrinsic Properties An Investigation into Spontaneous Heating

- Characteristics of Coal and its Correlation with Intrinsic Properties. Rourkela.
- Singh, R. V. K. (2013a). Spontaneous heating and fire in coal mines. *Procedia Engineering*, 62, 78–90. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.046>
- Singh, R. V. K. (2013b). Spontaneous Heating and Fire in Coal Mines. *Procedia Engineering*, 62, 78–90. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.046>
- Szekely, J., Evans, J., & Sohn, H. Y. (1976a). *Gas-solid reactions*.
- Szekely, J., Evans, J., & Sohn, H. Y. (1976b). *GAS-SOLID REACTIONS*. (H. B. Jovanovich, Ed.). New York.
- Terrádez-Gurrea, M. (2006). Analisis De Componentes Principales. *Revista Chilena de Obstetricia Y Ginecolog*, 71(1), 1–11. <https://doi.org/10.4067/S0717-75262006000100004>
- Universidad de Alicante. (2008). Fluidos Viscosos. *Fluidos Viscosos*, 19. Retrieved from <http://rua.ua.es/dspace/simple-search?query=fluidos+viscosos>
- Universidad de Castilla-La Mancha. (2011). Energía eólica. Retrieved from https://previa.uclm.es/profesorado/ajbarbero/faa/eeolica_febrero2012_g9.pdf
- UPME. (2016). *Informe departamental minero La Guajira*.
- Varela, R. (2014). Manual de geología. *Miscelánea*, 21, 109–120.
- Videla Jiménez, P. (2011). Medidas de Tendencia Central y dispersión.
- Villadiego Ruiz, O. S. (2000). *Estudio Cinético De La Oxidación De Carbones a Bajas Temperaturas Obtención De Ácidos Húmicos Regenerados*. Universidad Nacional de Colombia.
- Warren M, R., James P, H., & Young I, C. (2008). *Handbook of Heat Transfer Calculations* (MCGRAW-HIL, Vol. 99). New York San Francisco Washington, D.C. Auckland Bogota Caracas Lisbon London Madrid Mexico City Milan Montreal New Delhi San Juan Singapore Sydney Tokyo Toronto.
- Whitehead, J. (1999). An Introduction to Logistic Regression. Retrieved October 16, 2017, from <http://www.appstate.edu/~whiteheadjc/service/logit/>
- Wu, D., Norman, F., Schmidt, M., Vanierschot, M., Verplaetsen, F., Berghmans, J., & Van den Bulck, E. (2017). Numerical investigation on the self-ignition behaviour of coal dust accumulations: The roles of oxygen, diluent gas and dust volume. *Fuel*, 188, 500–510. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.10.063>
- Xuyao, Q., Wang, D., Milke, J. A., & Zhong, X. (2011). Crossing point temperature of coal. *Mining Science and Technology*, 21(2), 255–260.

- <https://doi.org/10.1016/j.mstc.2011.02.024>
- Zhao, H., Yu, J., Liu, J., & Tahmasebi, A. (2015). Experimental study on the self-heating characteristics of Indonesian lignite during low temperature oxidation. *Fuel*, *150*, 55–63. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.01.108>
- Zhao, X., Wang, Q., Xiao, H., Mao, Z., Chen, P., & Sun, J. (2013). Prediction of coal stockpile autoignition delay time using micro-calorimeter technique. *Fuel Processing Technology*, *110*, 86–93. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.11.007>