

**CARACTERIZACIÓN E IDENTIFICACIÓN DE ZONAS CON PRESENCIA DE
AUTO COMBUSTIÓN EN LA MINA LA JAGUA (PLJ) EN EL MUNICIPIO DE LA
JAGUA DE IBIRICO DEPARTAMENTO DEL CESAR.**

**CLAUDIA MARCELA RODRIGUEZ MORENO
(2092329)**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA
2015**

**CARACTERIZACIÓN E IDENTIFICACIÓN DE ZONAS CON PRESENCIA DE
AUTO COMBUSTIÓN EN LA MINA LA JAGUA (PLJ) EN EL MUNICIPIO DE LA
JAGUA DE IBIRICO DEPARTAMENTO DEL CESAR.**

**TRABAJO DE GRADO EN LA MODALIDAD PRÁCTICA EMPRESARIAL PARA
OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA**

**CLAUDIA MARCELA RODRIGUEZ MORENO
(2092329)**

**DIRECTOR:
GEÓLOGO MARIO GARCIA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2015

DEDICATORIA

A Dios por la vida, por todas las oportunidades que pone en mi camino llenas de bendición y amor.

A mis padres Gladys Marina y Pedro Elías que son el motor de mi vida y jamás me han dejado rendir ante ninguna adversidad, son el regalo más perfecto se me ha dado, los amo con todo mi corazón.

A mi hermano Pedro Elías por estar apoyándome a pesar de las dificultades.

A toda mi familia que de una manera u otra siempre han estado a mi lado para darme voces de aliento para alcanzar mis objetivos a lo largo de este proceso.

A mi novio, Darío José que me ha brindado todo su amor y apoyo de manera incondicional para poder alcanzar esta meta.

Para finalizar a todos mis amigos con los que reí, disfrute y sufrí, permitiendo que este recorrido fuese uno de los mejores en mi vida, gracias en especial a Aleja, Moris, Anita por ser esas bonitas personas que siempre estuvieron de manera desinteresada en mi vida.

Claudia Marcela Rodríguez Moreno

AGRADECIMIENTOS

A la empresa La mina La Jagua la cual me dio la oportunidad de desarrollar mi práctica en este grato lugar donde pude llenarme de mucho conocimiento.

Gracias a Sandra, Hugo, Juan Carlos, Dubier, Sr Herman que con su alegría y risas hicieron que la estadía fuera mucho más amena y agradable.

A Pedro, Roger, Claudia, Jessica, Luis Carlos, Wilfram, Luis Alejandro quienes me ayudaron y compartieron todo su conocimiento en campo de manera muy desinteresada, así como también todo el equipo de topografía que fueron una ayuda increíble en la realización de mi práctica.

A todas las personas de la mina con las que estuve en contacto las cuales ayudaron a enriquecer mi vida de alguna manera.

A mi director Mario García por su diligencia en todos los análisis que necesite desarrollar.

A los profesores de la escuela de geología por la formación que me brindaron durante mi paso por esta universidad.

Claudia Marcela Rodríguez Moreno

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	18
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	19
2. JUSTIFICACIÓN.....	20
3. OBJETIVOS.....	21
3.1 OBJETIVO GENERAL	21
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
4. LOCALIZACIÓN.....	22
5. METODOLOGÍA	23
6. GEOLOGÍA REGIONAL	24
6.1 PALEOGENO	26
6.1.1 Formación Barco (E1b).....	26
6.1.2 Formación Los Cuervos (E1c)	26
6.1.3 Formación Cuesta (N2c).....	28
7. MARCO TECTÓNICO	29
7.1 LA FALLA BUCARAMANGA – SANTA MARTA	30
7.2 FALLA PERIJÁ	30
7.3 FALLA ARENAS BLANCAS.....	31
7.4 FALLA LOS CORAZONES.....	31
7.5 ESTRUCTURAS	32
7.5.1 Sinclinal La Jagua.....	32

7.5.2 Falla Canime.....	32
7.5.3 Falla la Victoria	32
7.5.4 Falla Graben	33
8. ESTRATIGRAFÍA DEL DEPÓSITO	34
8.1 MANTOS DEL DEPÓSITO	35
8.2 INTERBURDEN DEL DEPÓSITO.....	36
9. CARACTERISTICAS	38
9.1 CARBÓN.....	38
9.2 FORMACIÓN DEL CARBÓN.....	38
10. COMBUSTION ESPONTÁNEA	45
10.1 FACTORES QUE INCIDEN EN LA AUTO COMBUSTIÓN DEL CARBÓN ...	46
10.2 CLINKER	49
11. RESULTADOS Y ANÁLISIS	51
11.1 TRABAJO DE LEVANTAMIENTO DE ÁREAS DE CLINKER.....	51
11.1.1 delimitación de las áreas de Clinker	51
11.1.2 levantamiento de imágenes a partir de Sirovision.....	54
11.2 PLAN DE PERFORACIONES.....	61
11.3 REGISTROS ELECTRICOS	64
11.3.1 registró gamma Ray.....	64
11.4 PERFILES GEOLÓGICOS	68
11.5 MODELAMIENTO 3D DE LOS MANTOS AFECTADOS POR LA AUTO COMBUSTION.....	71
11.6 AFECTACIONES DE LA CALIDAD DEL CARBÓN A PARTIR DE MUESTREOS EN CANAL	73
11.7 HIPÓTESIS DE LA COMBUSTIÓN ESPONTÁNEA EN LA MINA LA JAGUA	79

11.8 ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN PARA ZONAS AFECTADAS POR
EVENTOS DE AUTO COMBUSTIÓN.....81

12. CONCLUSIONES83

BIBLIOGRAFIA.....84

ANEXOS.....88

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Localización detallada del área de estudio ortofotomapa Sinclinal de la Jagua Proyecto La Jagua.	22
Figura 2. Formaciones presentes en áreas aledañas al sinclinal de la Jagua (círculo rojo) que van desde el Paleozoico (color morado) hasta depósitos cuaternarios (color gris).	24
Figura 3. Columna estratigráfica generalizada de la cuenca Cesar – Ranchería, hacia la parte superior en el Paleoceno se va a tener la formación cuervos donde se ubica el sinclinal de la Jagua y donde se desarrolla el presente estudio.....	25
Figura 4. Mapa de localización de cuenca Cesar – Ranchería.	29
Figura 5. Fallas que limitan el depósito de la mina la Jagua.	30
Figura 6. Trazo de la falla victoria y la falla Graben a medida que avanza la minería.	33
Figura 7. Sinclinal la jagua, explotación actual de la mina la Jagua.	34
Figura 8. Columna estratigráfica de la mina la jagua.	37
Figura 9. Esquema de la depositación y sedimentación de plantas superiores para la formación del carbón.	40
Figura 10. Propiedades características de los carbones las cuales permiten determinar su calidad.	41
Figura 11. Columna estratigráfica de valores de calidad de la mina la jagua.	43
Figura 12. Esquema del rango de los diferentes carbones y la ubicación del carbón de la mina la jagua.	44
Figura 13. Triángulo de fuego que muestra los tres elementos esenciales para desencadenar cualquier reacción que desencadene fuego.	46
Figura 14. Esquema de minería abandonada con pilares, factor importante para generación de auto combustión.	49

Figura 15.	Clinker roca producto de la auto combustión de mantos de carbón de la mina la Jagua.....	50
Figura 16.	Áreas identificadas de Clinker en afloramientos producto de la combustión espontánea en mina la Jagua.....	52
Figura 17.	Evidencia en superficie de las zonas afectadas por auto combustión en los diferentes mantos de carbón en la mina la Jagua A. Contacto entre Clinker de manto 2U con el manto sin ninguna afectación. B. Contacto del Clinker de manto 15 con la zona que no presenta afectación.	53
Figura 18.	Auto combustión manto 5 bloque oriental. A. llama resultado de la auto combustión. B. humo blanco productos de la combustión de un carbón.....	54
Figura 19.	Distribución de los diferentes puntos donde se hicieron las fotografías en áreas de presencia de Clinker.	55
Figura 20.	Ubicación espacial de los puntos de toma de las fotografías con respecto al punto de control.....	56
Figura 21.	Georeferenciación de imágenes. A. ubicación en planta de los puntos en tierra y el punto de control. B. Georeferenciación y superposición de imágenes.	57
Figura 22.	imagen en 3D generada a partir del software Sirovision.....	58
Figura 23.	evidencia del resultado producto de la auto combustion. Manto 2U perrdida de todo el manto.	59
Figura 24.	Clinker dejado como producto de la auto combustión en este caso hace referencia a M15.	60
Figura 25.	Contacto irregular del Clinker con el manto 15.	60
Figura 26.	Perforaciones antiguas del área donde se identificaron las zonas de auto combustión.....	61
Figura 27.	Distribución pozos perforados y registrados para la zona con presencia de Clinker.	62

Figura 28.	evidencia de Clinker en las perforaciones realizadas en bloque 6 hacia el flanco oriental. A. ripio de de pozo perforado muestra la presencia de clinker. B. contacto entre el clinker y el carbón en los ripios.....	63
Figura 29.	Comportamiento de la respuesta de un registro gamma ray al paso por diferente tipos de litologías.	65
Figura 30.	Pozo JL8505, en rojo se muestra todo el ripio que salió del pozo perforado, en verde se marcó donde deberían aparecer los mantos según el modelo de la mina, que para el caso hace referencia al manto 10, manto 11 y manto 15, los cuales se encuentran quemados.	67
Figura 31.	Plano de localización de las secciones realizadas para la zona de auto combustión.....	68
Figura 32.	Perfil geológico de la sección B7-S2, muestras áreas de Clinker en profundidad.	70
Figura 33.	Perfil geológico de la sección B7-S5, muestras áreas de Clinker en profundidad.	71
Figura 34.	Representación gráfica del muestreo en canal. A. esquema de cómo se debe tomar la muestra en canal. B. recolección de muestras en campo.	74
Figura 35.	Muestro de canal para manto 2L, se ve el Clinker hacia la parte superior producto de la auto-combustión de 2U.	76
Figura 36.	Resultados de comparación de ceniza en dos muestreos de manto 2L en condiciones normales y afectado con auto combustión.....	77
Figura 37.	Resultados de comparación de poder calorífico en dos muestreos de manto 2L en condiciones normales y afectado con auto combustión.	77
Figura 38.	Resultados de comparación de sulfuros en dos muestreos de manto 2L en condiciones normales y afectado con auto combustión.....	78
Figura 39.	Secciones pulidas de mantos afectados por auto combustión. A. pirita diseminada de manto 5. B. abundante pirita diseminada presente en	

partes de manto 5. C. Franja amplia de pirita presente en el manto 10.
D. pirita en proporciones menores diseminada por todo el manto 35. 80

Figura 40. Secciones pulidas. A. Manto 45 no se encuentra afectado por auto combustión y presenta escasa pirita diseminada. B. Manto 10 afectado por auto combustión con presencia de pirita diseminada.81

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Descripción de los mantos de carbón del depósito de la mina La Jagua.	35
Tabla 2. Descripción detallada de los interburden del depósito de la mina la Jagua.	37
Tabla 3. Tabla de calidad de la mina la Jagua para cada uno de los mantos del depósito.	42
Tabla 4. Datos de los espesores y toneladas obtenidas para la zona de auto combustión y para la zona en caso que no se presentara auto combustión.....	73
Tabla 5. Comparación de las toneladas obtenidas para poder determinar las toneladas totales que se perdieron producto de la auto combustión.	73
Tabla 6. Resultados de análisis realizados a el manto 2L.	76
Tabla 7. Resultados obtenidos de azufre total de seis mantos diferentes de la mina la Jagua.....	79

LISTA DE ANEXOS

Anexo A	88
Anexo B	89
Anexo C	90
Anexo D	91
Anexo E	92
Anexo F	93

RESUMEN

TITULO: CARACTERIZACIÓN E IDENTIFICACIÓN DE ZONAS CON PRESENCIA DE AUTO COMBUSTIÓN EN LA MINA LA JAGUA (PLJ) EN EL MUNICIPIO DE LA JAGUA DE IBIRICO DEPARTAMENTO DEL CESAR*.

AUTORA: Claudia Marcela Rodriguez Moreno**

Palabras clave: auto combustión, Clinker, carbón, La Jagua

La auto combustión es un proceso desarrollado en superficie donde el carbón se encuentra en contacto con el oxígeno produciendo una reacción exotérmica, donde se genera un calentamiento del manto de carbón el cual afecta de manera directa las rocas adyacentes que pueden variar de areniscas, lodoitas o arcillolitas haciendo que con el calor y la temperatura liberada alteren su composición original dando como resultado el Clinker (roca pirometamorfica) que se presenta en tonalidades rojas y es muy compacto.

El sinclinal de la mina La Jagua ubicado en el departamento del Cesar, muestra evidencia de zonas que presentaron procesos de auto combustión de ocho mantos de carbón hacia la zona oriental del depósito, esta evidencia se encuentra dada por la presencia de Clinker en superficie y en profundidad mostrando un comportamiento irregular en dirección del buzamiento, llegando a alcanzar extensiones de 175m y 36m de espesor, las áreas de Clinker están asociadas a la presencia de pirita diseminada en el carbón la cual ayuda a acelerar los procesos de auto calentamiento al igual que la exposición de los carbones en superficie donde entraron en contacto con el aire dando paso a la generación de procesos de auto combustión; producto de estos eventos de auto calentamiento se da una pérdida de toneladas de carbón las cuales no van a ser recuperables lo que afecta directamente la cantidad de carbón que se tenía planeada para la parte oriental de la mina la Jagua.

*Proyecto de grado

**Facultad de ingenieras Físico químicas. Escuela de Geología. Director Ph.D. Mario García Gonzales.

ABSTRACT

TITLE: CHARACTERIZATION AND IDENTIFICATION OF THE SPONTANEOUS COMBUSTION ZONES IN LA JAGUA MINE AT THE TOWN LA JAGUA DE IBIRICO, DEPARTMENT OF CESAR.*

AUTHOR: Claudia Marcela Rodríguez Moreno.**

KEYWORDS: Spontaneous combustion, Clinker, Coal, La Jagua.

The spontaneous combustion is a process developed on the coal surface where is in contact with oxygen generating an exothermic reaction, this produces a heating of the coal seam which directly affects the adjacent rocks that can vary from sandstone, muddy or claystones, making that with heat and temperature released alter their original composition resulting the Clinker (pyro metamorphic rock) which has red hues and is very compact.

The syncline of the La Jagua mine located in the department of Cesar, shows zones with evidence of spontaneous combustion processes in eight coal seams towards the eastern zone of the deposit, this evidence is given by the presence of clinker in surface and in depth showing an irregular behavior in the direction of the dip, reaching extensions of 175 m and 36 m of thickness, Clinker areas are associated with the presence of disseminated pyrite in coal which helps to accelerate the processes of self-heating as well as coals exposure in the surface where contacted with the air making way for the generation of spontaneous combustion processes; product of these self-heating events there's a loss of tons of coal which will not be recoverable which directly affects the amount of coal that was planned for the eastern part of the La Jagua mine.

*Research Project

**Faculty of Physicochemical Engineering. School of Geology. Director Ph.D. Mario García Gonzales.

INTRODUCCIÓN

El carbón a través de la historia ha sido el combustible fósil más antiguo utilizado por el hombre y que hoy en día aún sigue siendo parte fundamental para el desarrollo energético de la humanidad, es uno de los recursos no renovables más valiosos que han permitido el desarrollo de las sociedades a través de los tiempos.

La combustión espontánea se da como resultado de la combustión in situ de los mantos de carbón en áreas donde el oxígeno ha sido introducido al sistema por discontinuidades tectónicas o por su exposición en superficie (Candela and Quintero 2004), puede ocurrir en casi todos los tipos de carbones, es producto del auto calentamiento del mismo al entrar en contacto con la superficie donde factores como la temperatura del medio, el agua y la geología van a permitir que con el tiempo se desencadene una reacción exotérmica (Stracher, Prakash and Sokol, 2011); este fenómeno genera un problema para la industria del carbón tanto en la parte ambiental, operacional y económica, produciendo pérdidas considerables en las toneladas de carbón que se tienen proyectadas en los yacimientos.

El informe a continuación muestra el trabajo desarrollado durante seis meses en la mina La Jagua donde se realizó una cartografía de las áreas con presencia de Clinker (roca pyrometamorfica) en superficie y en profundidad, permitiendo así tener cálculos acerca de las reservas de carbón que se tienen para la zona sur oriental de la mina, donde esta evidenciada la auto combustión de una serie de mantos de carbón, así como también una ayuda a la planeación minera al momento de minar determinados mantos de carbón.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Tener un mayor conocimiento de las causas del porque se generan procesos de auto combustión en la mina la jagua partiendo de hipótesis tales como: estructuras (fallas), características propias de los carbones, minerías antiguas, exposición en superficie, presencia de sulfuros diseminados; que están afectando directamente las reservas de carbón debido a que estas no pueden ser ya recuperables, dicho proceso está afectando de manera directa los problemas a la hora del minado y la recuperación de los mantos de carbón debido a que la auto combustión se presenta de forma irregular en profundidad.

2. JUSTIFICACIÓN

La industria de la minería del carbón, presenta diversos problemas como es el caso de la auto combustión in situ de los mantos de carbón, lo que genera pérdidas a nivel económico y afecta la calidad de los carbones cercanos. Las posibles causas de estos eventos son muy variadas, teniendo en cuenta que el carbón es un combustible fósil y tiene la facilidad de reaccionar con el oxígeno.

El proyecto La Jagua en la actualidad presenta evidencia de zonas donde los carbones han sufrido auto combustión, esta evidencia se encuentra registrada en pozos perforados y en afloramientos que han permitido una delimitación general de donde se encuentran las zonas de quema. Es de gran ayuda ampliar y mejorar la información que se tiene acerca de estos eventos que han sucedido y que afectan de manera directa la minería.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Caracterizar y delimitar las zonas de auto combustión presentes en la mina la Jagua (PLJ) en el municipio de La Jagua de Ibirico departamento del Cesar.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las posibles causas por las cuales se dio inicio a los procesos de auto combustión en determinadas zonas.
- Identificar y analizar registros eléctricos de pozos perforados en las zonas de auto combustión.
- Interpretar y procesar imágenes para mapeo de zonas de auto combustión a partir del programa Siro Vision.
- Generar un modelo en 3D para las zonas afectadas por la auto combustión.
- Calcular las pérdidas de carbón que se generan debido a la auto combustión en los mantos de carbón.
- Mostrar cómo se está viendo afectada la calidad de los carbones que se encuentran cerca de la zona donde se presenta la auto combustión.
- Presentar posibles alternativas de mitigación para las zonas donde actualmente se están presentando eventos de auto combustión.

4. LOCALIZACIÓN

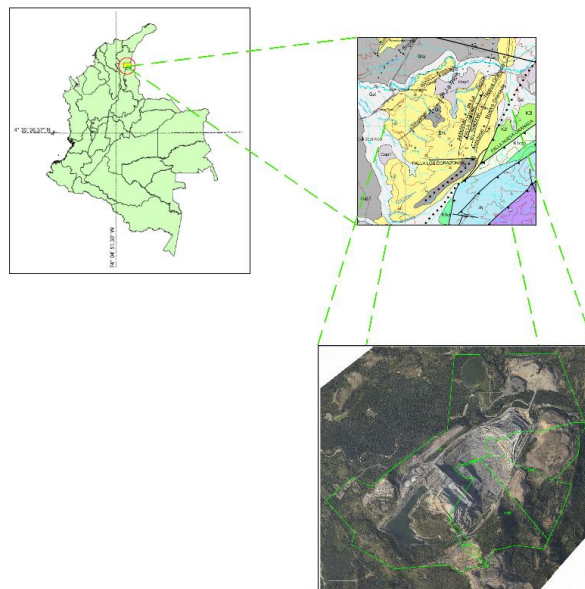
El proyecto La Jagua hace parte de la cuenca Cesar – Ranchería y la Serranía de Perijá; geográfica y tectónicamente se encuentra limitada por la Sierra Nevada de Santa Marta al noreste, la serranía de Perijá al este, la Falla de Oca al norte y la Falla de Bucaramanga – Santa Marta al suroeste.

La mina se encuentra localizada en el departamento del Cesar, nororiente del municipio de La Jagua de Ibirico, a 120 kilómetros de su capital Valledupar, comprendiendo una de las zonas carboníferas más importantes del país (Figura1).

El área el proyecto se encuentra demarcado por las siguientes coordenadas:

- E: 1´084.000 N: 1´548.500
- E: 1´090.000 N: 1´554.000

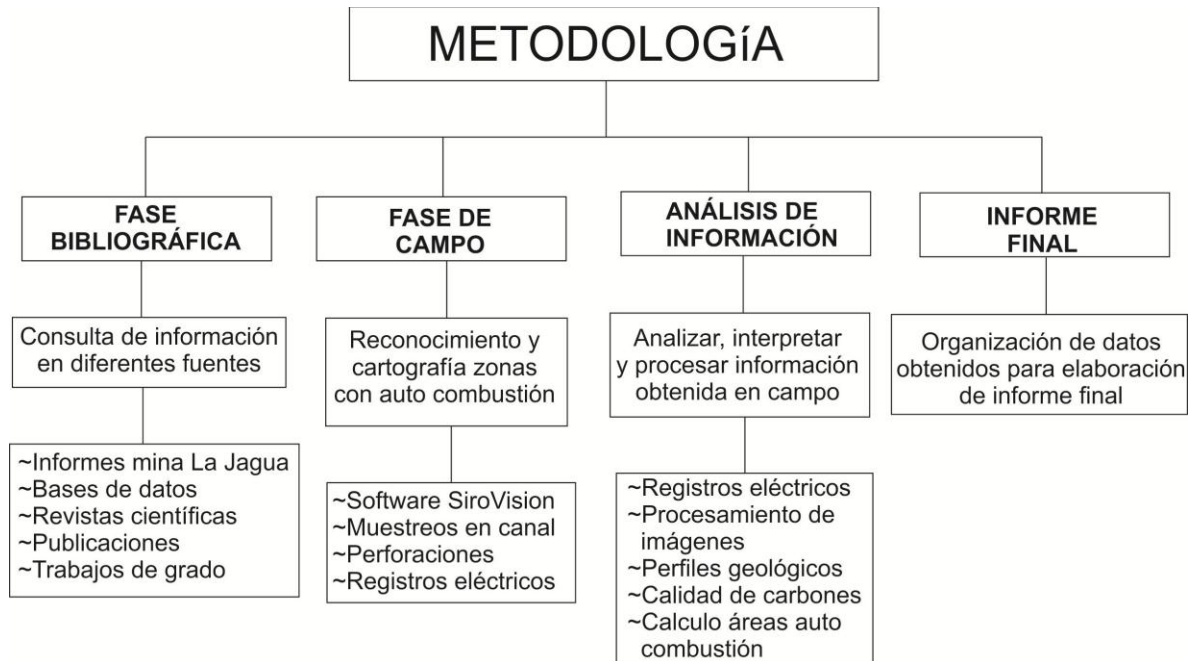
Figura 1. Localización detallada del área de estudio ortofotomapa Sinclinal de la Jagua Proyecto La Jagua.



Fuente: Modificado INGEOMINAS 2003

5. METODOLOGÍA

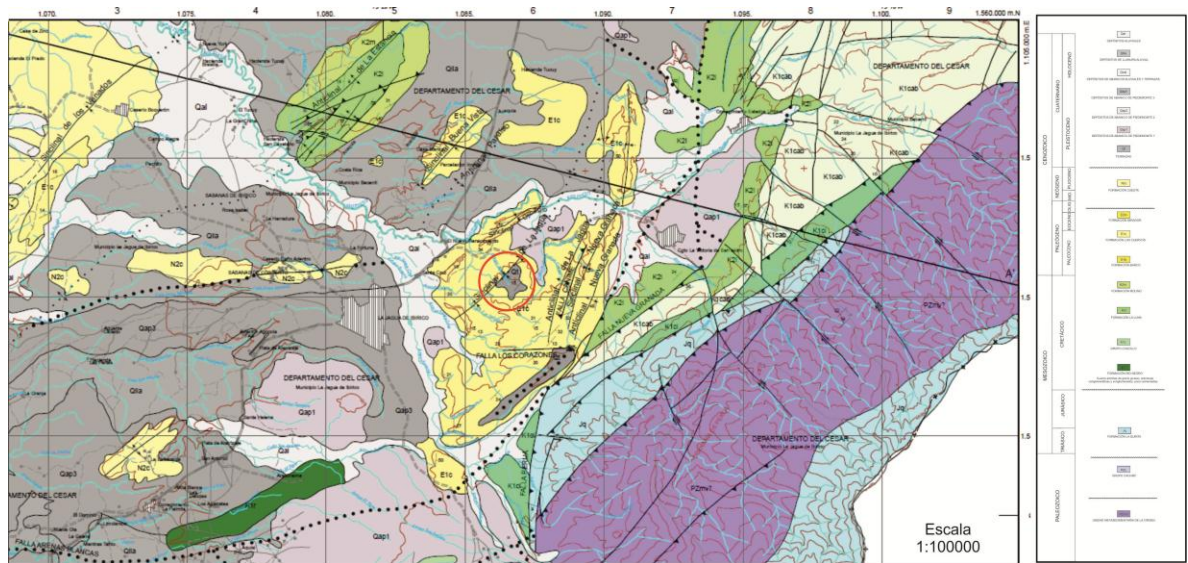
El presente informe se realizó mediante cuatro fases metodológicas con las cuales se dio cumplimiento a cabalidad de los objetivos propuestos.



6. GEOLOGÍA REGIONAL

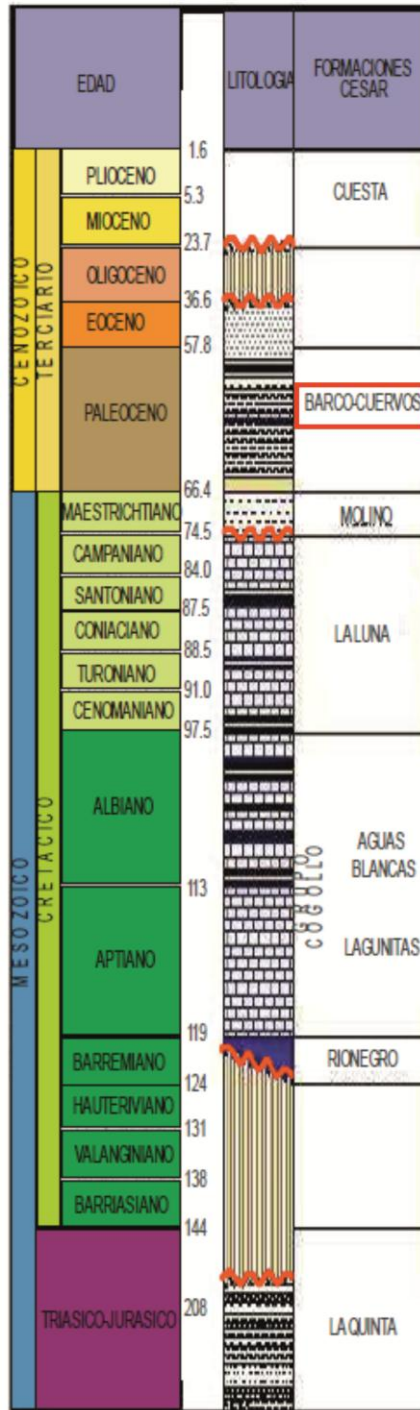
El sinclinal de la Jagua se encuentra ubicado en la cuenca cesar ranchería donde están aflorando diferentes tipos de rocas que van desde el Paleozoico hasta el Paleogeno – Neogeno así como también depósitos cuaternarios (figura 2) (figura 3), para el presente estudio se hizo énfasis en las rocas sedimentarias de la Formación Barco, la Formación los Cuervos y la Formación Cuesta.

Figura 2. Formaciones presentes en áreas aledañas al Sinclinal de la Jagua (círculo rojo) que van desde el Paleozoico (color morado) hasta depósitos cuaternarios (color gris).



Fuente: Modificado INGEOMINAS 2002

Figura 3. Columna estratigráfica generalizada de la Cuenca Cesar – Ranchería, hacia la parte superior en el Paleoceno se va a tener la Formación Cuervos donde se ubica el sinclinal de la Jagua y donde se desarrolla el presente estudio.



Fuente: Tomado y Modificado ICP 1990.

6.1 PALEOGENO

6.1.1 Formación Barco (E1b)

Definida por Notestein et al. (1944), En el flanco oriental del Anticlinal de Petrólea, en la sierra Barco del este (Cuenca del Catatumbo), Arias & Morales (1994) la cartografiaron en la Loma de San José, al sur de La Jagua de Ibirico y al norte del Río Tucuy.

La formación se encuentra compuesta principalmente por areniscas amarillas de grano fino subangulares, ligeramente arcillosas y micáceas, con una estratificación cruzada y laminación plano paralela continua, presenta delgadas intercalaciones de arcillolitas, lutitas generalmente grises, en parte limosas, micácea y carbonaceas, localmente son ricas en pequeños nodulos de siderita.

Esta unidad mide 1000 m aproximadamente en el departamento del Cesar (Hernández, 2003), esta formación se encuentra suprayacida por un contacto transicional por la formación cuervos y hacia la parte inferior con la formación molinos no se encuentra determinado.

La edad para la Formación Barco corresponde a Paleoceno temprano según De Porta et al. (1974).

6.1.2 Formación Los Cuervos (E1c)

Definida por Notestein et al. (1944), se encuentra aflorando al noreste, este y sureste de la Jagua de Ibirico, que corresponde a la zona carbonífera y en la loma de los venados, al sureste de Boqueron, en la formación se pueden distinguir tres miembros de acuerdo a su composición y morfología diferente, miembro inferior (carácter lodoso), miembro medio (carácter arenoso) y miembro superior (carácter lodocarbonoso), (Hernández, M. Ingeominas, 2003).

Miembro Inferior

Esta caracterizado por la presencia de lodolitas, areniscas bioclásticas, shale carbonoso y se identifica por la presencia de cintas de carbón, glauconita en los niveles arenosos y los niveles arcillosos moteados grises rojizos. Se encuentra aflorando en el área del sinclinal de La Jagua, donde se encuentran las explotaciones carboníferas.

Este miembro presenta características litológicas como subarcosas a arcosas de grano fino a medio, compuesta por cuarzo, laminación plana a ondulosa continua, limolita gris oscura con nódulos ferruginosos, materia orgánica en algunas capas, laminación plana paralela continua y estratificación cruzada, arcillolita, shale carbonoso, arcillolitas abirragadas y pequeñas cintas de carbón, las cuales permiten definir el limite aproximado con el miembro medio. El espesor máximo que se tiene para este miembro es de 200m (Hernández, M. Ingeominas, 2003).

Miembro Medio

Se encuentra caracterizado por abundantes mantos gruesos de carbón de hasta 6 m de espesor interestratificados con arcillolitas y lodolitas color gris medio, con restos de plantas, madrigueras y nódulos de siderita. Las intercalaciones arcillolita-arenisca generan laminación heterolítica con moderada bioperturbación, y las capas de areniscas presentan granodecrecimiento. Localmente se presentan paquetes potentes de areniscas con estratificación inclinada planar hacia la base y ondulosa hacia el tope (Ayala, R, 2009).

Este miembro aflora en el área de explotación de Proyecto La Jagua, al norte del Río Tucuy, y hacia el norte de Cerro Largo, es el miembro más importante de la Formación Los Cuervos, pues en este se encuentran los mantos de carbón económicamente explotables. El espesor varía de 200 y 280 m. (Hernández, M. Ingeominas, 2003). Según Mejía & Mateus (1978) y Ruíz et al. (1993), la edad del Miembro Superior de la secuencia carbonosa de La Jagua corresponde al Paleoceno; según Urdinola (1993, en Hernández & Maldonado, 1995), es del

Paleoceno superior –Eoceno inferior, Según Van der Hammen (1958) es Paleoceno medio al Eoceno inferior.

Miembro Superior

Este miembro se compone de arcillolitaslimolitas masivas, bioturbadas, con una coloración verdosa-azulosa. Localmente muestra intercalaciones con arcillolitas abigarradas y areniscas de grano muy fino con abundante matriz arcillosa (Ayala, R, 2009).

6.1.3 Formación Cuesta (N2c)

Definida por Notestein et al. (1944), consiste de unas interdigitaciones de conglomerados ferruginosos con areniscas caracterizadas por presentar estratificación cruzada ondulosa, evidenciada por un fuerte color morado que sigue la estructura sedimentaria y se caracteriza por formar crestas de tono rojizo. La Formación Cuesta está constituida por sedimentos semiconsolidados, mal calibrados con algunas intercalaciones de conglomerados y areniscas. La formación es netamente continental.

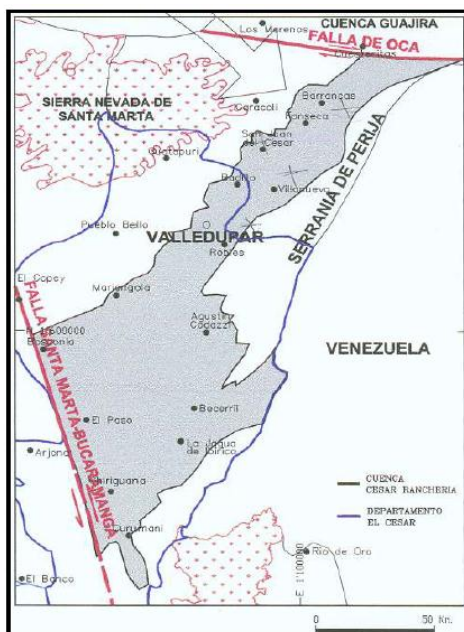
La edad posiblemente corresponde al Mioceno medio a Plioceno, según las relaciones estratigráficas.

7. MARCO TECTÓNICO

La Cuenca Cesar – Ranchería se encuentra limitada geográficamente y tectónicamente por la Falla de Oca al norte, la Sierra Nevada de Santa Marta al noreste, la Serranía de Perijá al este y la Falla Bucaramanga – Santa Marta al suroeste (figura 4).

Las estructuras tectónicas regionales de la zona carbonífera del departamento del Cesar, se conforman por cuatro estructuras que afectan unidades con niveles carbonosos definidas como son los sinclinales de La Jagua, El Descanso, La Loma y El Boqueron, las estructuras de esta zona consisten en una serie de sinclinales y anticlinales que muestran una dirección NE-SW, las cuales forman un sinclinorio elongado con una dirección N35E, separadas por fallas inversas (Hernández, M. Ingeominas, 2003).

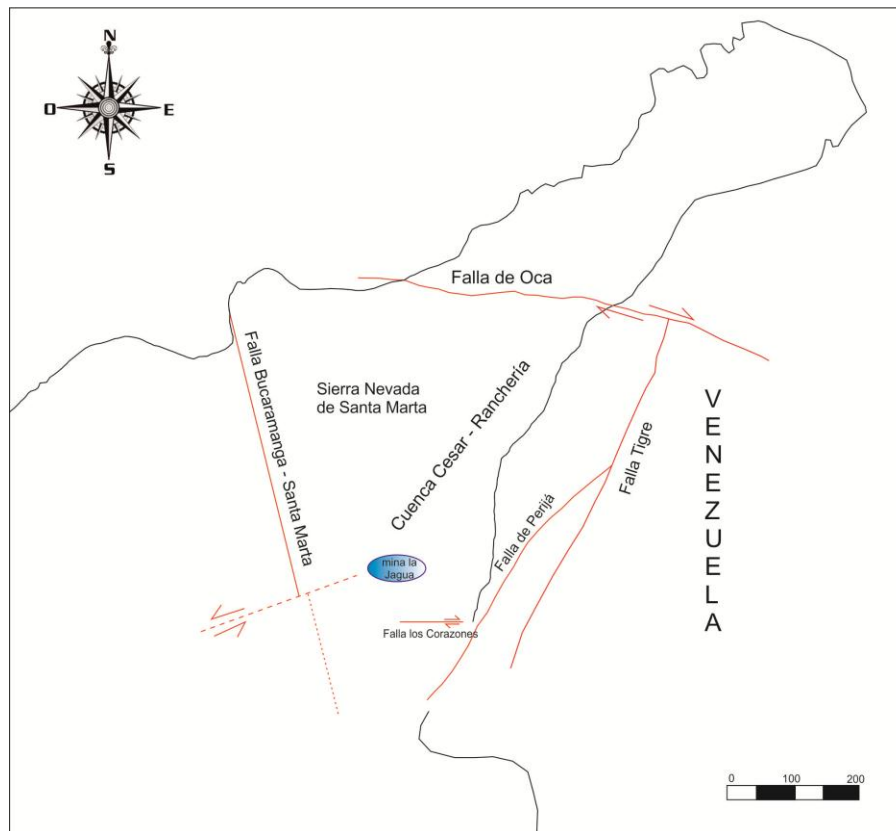
Figura 4. Mapa de localización de cuenca Cesar – Ranchería.



Fuente: ECOPETROL 1998.

Para el Sinclinal de la Jagua se encuentra limitado por fallas como lo son la Falla Bucaramanga – Santa Marta, Falla Perijá, Falla Arenas Blancas, Falla los Corazones, (figura 5) las cuales se encuentran explicadas a continuación.

Figura 5. Fallas que limitan el depósito de la mina la Jagua.



Fuente: Modificado INGEOMINAS 2003

7.1 LA FALLA BUCARAMANGA – SANTA MARTA

Corresponde a una falla transcurrente de desplazamiento sinistral de dirección NNW-SSE, constituye la margen suroccidental de los macizos de Santa Marta y Santander (Irving, 1975) y con información estratigráfica obtenida a partir de núcleos de perforación (Kellogg, 1984); se le ha calculado un desplazamiento lateral de 110 a 115 kilómetros.

7.2 FALLA PERIJÁ

Falla inversa de alto ángulo de carácter regional, tiene una traza rectilínea curva con dirección N18°E hacia el sur y N26°-30°E hacia el norte. Hacia el sureste de cerro Largo, esta estructura se encuentra desplazada por la Falla Arenas Blancas.

Afecta las rocas de la Formación La Quinta y junto con la Falla Arenas Blancas constituye una zona de falla de tipo regional, en la cual se observa un alto grado de trituración y un cerro de presión con capas de alto buzamiento.

7.3 FALLA ARENAS BLANCAS

La Falla Arenas Blancas se localiza en la Serranía de Perijá, tiene un trazo bien definido desde el oriente de La Jagua de Ibirico, y se prolonga hacia el norte hasta la frontera con Venezuela.

Miller (1960) le da un comportamiento de tipo inverso, con componente de rumbo, argumentado por el desplazamiento en sentido dextral de la Falla Perijá, determina una edad más reciente para la falla Arenas Blancas.

7.4 FALLA LOS CORAZONES.

Está ubicada al este de Cerro Largo, y alinea a la quebrada Santa Cruz, con una dirección E-W. La falla es evidenciada por plegamientos en los mantos de carbón en el margen izquierdo de la quebrada. La falla es inversa, con un salto de aproximadamente 40 m.

7.5 ESTRUCTURAS

Las estructuras principales que se encuentran en el área del sinclinal la Jagua corresponden a la falla Canime, Falla la victoria y un sistema de fallas NE-SW (figura 6).

7.5.1 Sinclinal La Jagua

Se encuentra al NE del Municipio de La Jagua de Ibirico, aproximadamente a 5 km. Presenta forma un alargamiento hacia el norte, es ligeramente asimétrico, con un eje mayor de aproximadamente 10,4 km y más de 4 km de ancho. Hacia el sur, la estructura es amplia y se cierra al norte con un cabeceo al W. La dirección del eje es N55°E (+10°). El sinclinal afecta rocas de la Formación Los Cuervos. Es un sinclinal abierto con un buzamiento en sus dos flancos entre 10° y 35°.

7.5.2 Falla Canime

Es de tipo normal y alto ángulo, pone en contacto los miembros Medio y Superior de la Formación Los Cuervos, sigue una dirección N20°-30°E, su trazado es rectilíneo y se extiende cerca de 3 km, con punto de inicio en cerro Largo y finalizando su trazo cerca al cierre del Anticlinal Loma Corazones. Representa un plano de debilidad sobre el que las quebradas Canime y Ojinegro han labrado su curso, sobre éstos se pueden apreciar zonas de brecha de falla, rocas altamente diaclasadas y estructuras miloníticas en carbones y arcillolitas (Hernández, M. Ingeominas, 2003).

7.5.3 Falla la Victoria

Es una falla normal con un rumbo y buzamiento promedio de N70E/ 48NW, presenta estructuras secundarias ramificadas, resultantes de los procesos de propagación del plano principal, también fallas sintéticas asociadas con rumbo y buzamiento promedio N83E/52NW (figura 6).

7.5.4 Falla Graben

Es una falla normal con un rumbo y buzamiento N67E/52SE, esta falla se encuentra uniéndose a la falla victoria permitiendo que se forme un pequeño graben (figura 6), esta falla solo afecta los mantos más superiores del depósito, ha llegado a generar desplazamientos máximos hasta de 6m.

Figura 6. Trazo de la falla victoria y la falla Graben a medida que avanza la minería.



8. ESTRATIGRAFÍA DEL DEPÓSITO

El depósito de Proyecto La Jagua se encuentra conformado por el Sinclinal de La Jagua. La explotación de carbón que se lleva a cabo en el depósito esta estratigráficamente ubicada en el Miembro Medio de la Formación Cuervos.

El deposito se encuentra caracterizado por presentar un carbón de tipo sub-bituminoso, los mantos de carbón están distribuidos de manera uniforme, donde se puede apreciar la forma del sinclinal de manera clara a medida que la minería se profundiza (figura 7) en el depósito cuenta con 23 mantos explotables los cuales se encuentran distribuidos desde el manto 00 siendo el más superior hasta manto 45 el más profundo del depósito (figura 8), teniendo como criterio de la mina que los mantos con espesor superior a 0.3m son aptos para ser recuperados, los interburden (capas sedimentarias que separan un carbón de otro) de los mantos están dados por areniscas y lodolitas, se tiene hacia la parte media del depósito el manto 15 el cual es el más potente y el que produce mayor cantidad de volumen de carbón debido a su espesor que varía entre 4.60 m y 5.70 m, el deposito está presentando valores altos de poder calorífico (12600 BTU/LB) lo que hace que sean carbones de muy buena calidad y de alto reconocimiento a nivel mundial.

Figura 7. Sinclinal la jagua, explotación actual de la mina la Jagua.



8.1 MANTOS DEL DEPÓSITO

La determinación de los mantos de carbón en la mina se realizó a partir de una clasificación y correlación de registros eléctricos tomados en los pozos perforados por CARBONES DEL CARIBE LTDA., en las diferentes etapas durante los años 1987 y 1996. Los mantos de carbón se nombraron primeramente de techo a piso así: M-00, M-01, M-02, M-03, M-04, M-05, M-10, M-15, M-20, M-25, M-28, M-30, M-35, M-40, M-45, en la actualidad existen otras subdivisiones entre algunos mantos que presentan la misma estructura pero con algunas intercalaciones arcillosas entre ellos quedando clasificados de la siguiente manera M-00, M-01, M-02U, M02L, M-03U, M03A, M03B, M-04, M-05, M08, M09, M-10, M11, M-15, M17, M-20, M-25(1a), M25(2a), M-28, M-30, M-35(1a), M35(2a), M-40, M-45 (Tabla 1) (figura 8).

Tabla 1. Descripción de los mantos de carbón del depósito de la mina La Jagua.

MANTO	DESCRIPCIÓN
M01	Presenta un espesor promedio de 0.7 m, es de los mantos con espesores delgados, en ocasiones presenta nódulos de siderita y hacia la parte del eje presenta un fallamiento desplazándolo aproximadamente 3m.
M01	Presenta un espesor aproximado de 0.64 m, es de los mantos delgados del depósito se tiene cuidado al momento del minado, tiene presencia de un piso arcilloso lo cual lo hace blando, ocasionalmente presenta nódulos de siderita.
M02U/M02L	El manto 02U presenta un espesor que varía entre 2.48 y 3.35m separado por una intercalación de arcillolitas con un espesor de 40 cm en la base de este, donde continúa un segundo segmento de carbón correspondiente a manto 02L con un espesor de 0.30 m.
M03U	Su espesor varía entre 1.35 y 1.79, con tendencia a presentar mayores espesores hacia la parte sur del depósito. Los respaldos son arcillolita que pasa gradualmente a lutita carbonosa hacia el piso.
M03A/M03B	Están separados desde el piso de manto 03U hacia el techo de manto 03A una distancia promedio de 8 m, el manto 03A tiene un espesor promedio de 0.45 m y el manto 03B de 0.55 m. ambos se encuentran separados entre sí por una distancia variable entre desde 0.40 m hasta 3.5 m.
M04	Su espesor varía entre 0.6 y 1.2 m está respaldado por areniscas masivas friables hacia el techo y en el piso por limolitas arcillosas.
M05	Presenta un espesor variable entre 1.73 y 2.28 m. Se encuentra respaldado por limolitas que son carbonosas hacia el contacto con el carbón.
M08 M09	Desde la base de manto 05 hasta el techo del 08 existe una separación promedio de 10 m, manto 08 tiene un espesor de 0.60m seguido del manto 09 con un espesor de 0.35 m. El manto 08 es un tipo de carbón bastante frágil, debido que se parte con facilidad a comparación de otros mantos.

M10/M11	Se encuentran separados entre sí por una intercalación de 0.07m a 0.13 m constituida por arcillolitas de alta plasticidad, lo cual dificulta la extracción del manto 11. El manto 10 tiene un espesor de 1.20 m y el manto 11 de 0.51 m.
M15	Es el manto más potente del depósito, con un espesor variable de 4.65 a 5.70 m. Los respaldos son estratos de arcillolitas con intercalaciones de arenisca fina con gradaciones a limolitas, a pesar de ser un manto tan potente no presenta intercalaciones estériles separables.
M17	Presenta un espesor variable de 0.48 m se encuentra a una distancia de 3m por encima del techo de manto 20, ocasionalmente presenta nódulos de siderita.
M20	Su espesor es de 2 m, los respaldos son de arcillolita con intercalaciones delgadas de arenisca hacia el piso; al contacto con el carbón los estratos se tornan carbonosos.
M25	Su espesor es de 1.55 m y presenta una intercalación de lutita carbonosa aproximadamente a 0.85 m de su techo.
M28	Su espesor promedio es de 0.49m, tiende a disminuir el espesor hacia el flanco oriental.
M30	Su espesor varía entre 2.49 y 3.72 m, presenta intercalaciones discontinuas de lutita carbonosa en proximidades del piso del manto con espesores promedios 0.10 y 0.15 m
M35	Su espesor promedio de 3.14 m, presenta una intercalación de arcillolitas aproximadamente de 6 cm que separa 35(1a) de 35(2a).
M40	Su espesor varía entre 1.61 y 2.46 m los respaldos son arcillolitas con laminaciones carbonosas; no muestra intercalaciones de estériles separables.
M45	Su espesor varía entre 1.21 y 2.16 posee una división de 2 partes una parte superior de dureno y una parte inferior de vitrinita, no presenta intercalaciones de estériles separables.

8.2 INTERBURDEN DEL DEPÓSITO

Los mantos de carbón del depósito presentan unos interburden característicos para cada manto de carbón los cuales van a tener unas propiedades características (Tabla 2) que pueden llegar a ser un agente facilitador para generar las condiciones en las que puede desarrollarse eventos de auto combustión en algún manto, un ejemplo sería si en un manto de carbón el material que lo suprayase corresponde a una arenisca las cuales tienen tendencia a ser materiales más frágiles ocasionando que se den pequeños fracturamientos formando así familias de diaclasas que son estructuras características que se presentan en la Mina la Jagua, las cuales van a facilitar la percolación de aire o agua donde se encuentra el oxígeno que es el agente principal para desarrollar una reacción en cadena que con las condiciones adecuadas puede llegar a dar como resultado la oxidación del carbón desencadenando así la auto combustión.

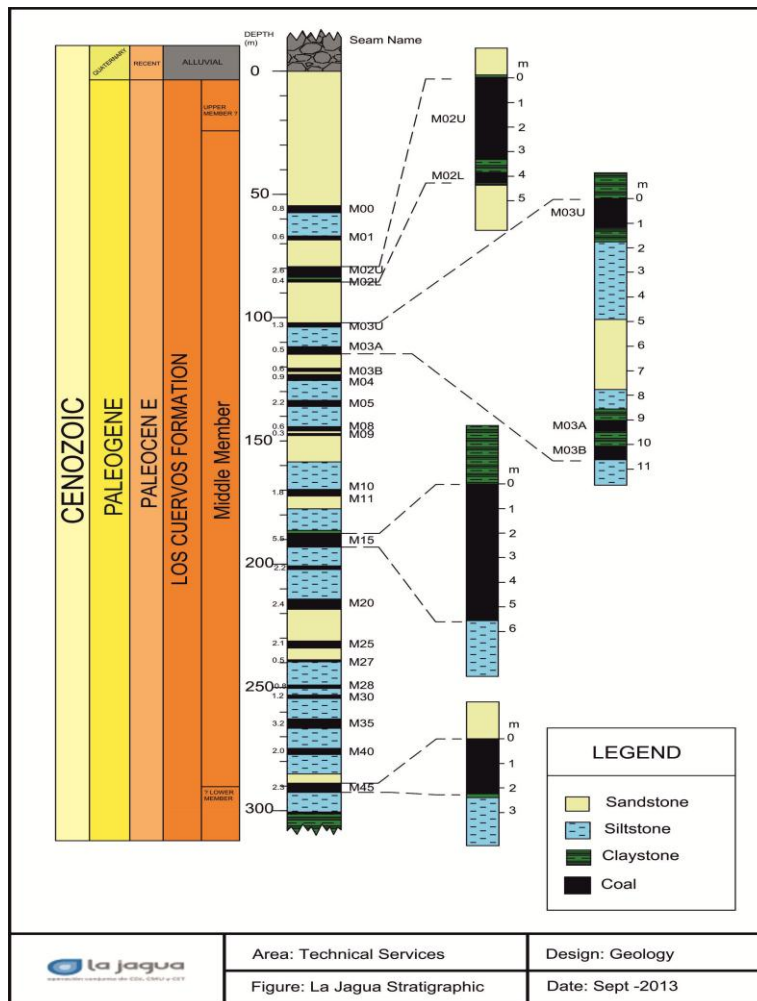
Tabla 2. Descripción detallada de los interburden del depósito de la mina la Jagua.

DESCRIPCION DETALLADA INTERBURDEN DEL DEPOSITO

M00-M02	Arenisca. Cuarzo feldespática friable, inestable, fácilmente derrumbable
M02-M05	Arcillolita semilaminar, nodulos ferruginosos, restos orgánicos
M05-M10/11	Arenisca de grano medio, planos de debilidad, estratificación cruzada
M10/11-M15	Arenisca finogranular, laminar dura y resistente, estratificación cruzada
M15-M20	Arcillolita y areniscas competentes
M20-M25	Arcillolita semilaminar, horizontes ferruginosos
M25-M30	Limolita arenosa, con lentes de óxidos de hierro
M30-M35	Arcillolita orgánica hacia la base
M35-M40	Lutita carbonosa
M40-M45	Arenisca

Fuente: modificado de informe final, Carbones del Caribe S.A, Estudio Geotécnico (1995).

Figura 8. Columna estratigráfica de la mina la jagua.



Fuente: columna estratigráfica Mina la Jagua 2013.

9. CARACTERISTICAS

9.1 CARBÓN

El carbón es un combustible fósil de origen orgánico, corresponde a una roca sedimentaria organoclástica de grano fino, compuesta esencialmente por restos carbonizados de plantas. Estas rocas organoclásticas suelen constituir secuencias estratigráficas características que reciben el nombre de ciclotema, es decir, una secuencia litológica que se repite en el tiempo (Corona et al 2006).

La materia mineral que se encuentra asociada al carbón esta constituida generalmente por aluminosilicatos, carbonatos, sulfuros, sulfatos, feldespatos, silicatos y trazas de otros minerales. El carbon de la Jagua contiene principalmente arcillas, cuarzo, dolomita, piritita y siderita (Campo, C. Y Zuleta, O. 1994).

9.2 FORMACIÓN DEL CARBÓN

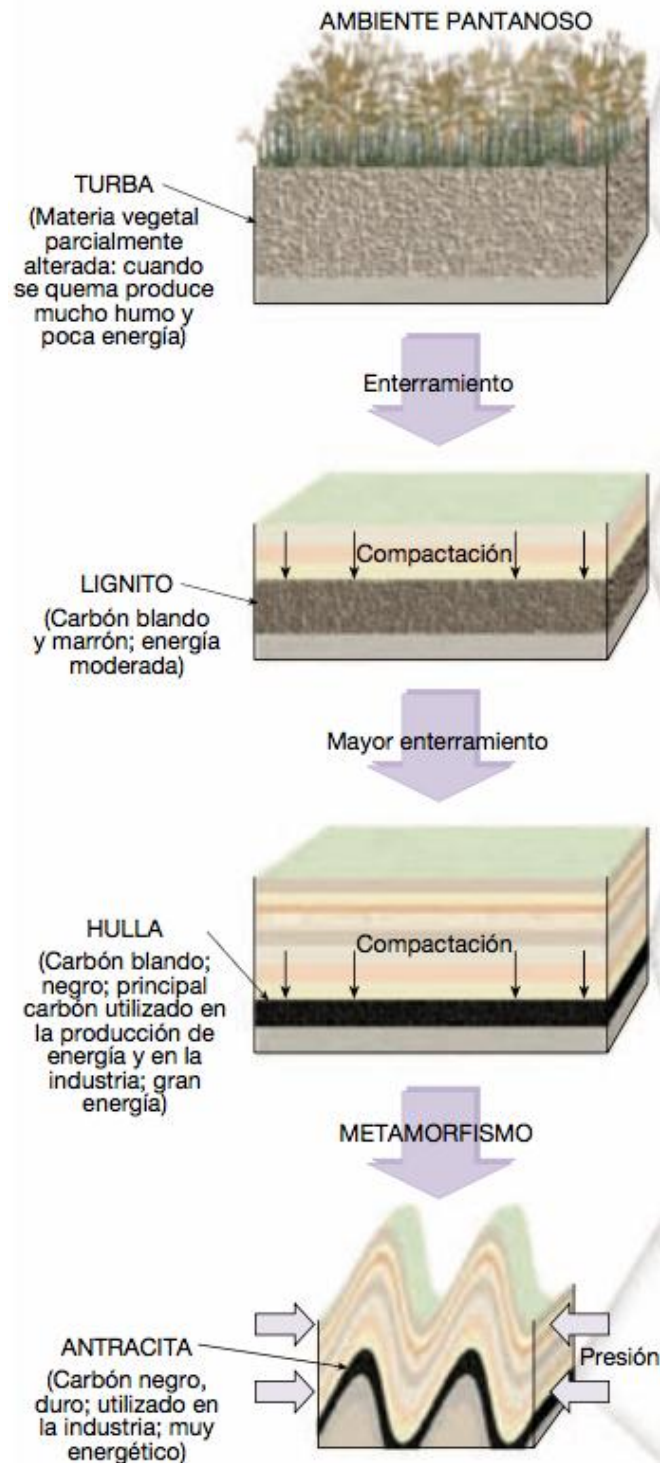
Para la formación del carbón se conocen dos etapas las cuales van a determinar el tipo de carbón que se va a generar; la primera es la etapa bioquímica en la cual las plantas son transformadas bajo condiciones principalmente anaeróbicas, donde se va a determinar la composición de los macerales (propiedades petrográficas), posterior a esto se encuentra la etapa geoquímica donde se dan transformaciones debido a cambios de temperatura y presiones a lo largo de millones de años (Figura 9) (Thomas, 2002); cada tipo de carbón va a presentar diferentes propiedades tales como contenido de azufre, poder calorífico, contenido de ceniza, humedad (figura 10), las cuales van a permitir determinar la clase y la calidad de cada carbón.

El desarrollo de plantas superiores en la tierra se dio durante el Silúrico y el Devónico, donde se proporcionó el material necesario para la formación de los diferentes tipos de carbón que van desde la turba (menor contenido de carbono), lignito, hulla y antracita (mayor contenido de carbono) (figura 10). Los periodos donde se dieron las mayores cantidades de carbón son del Carbonífero y Cretácico Tardío (Cooper y Murchison, 1969; van Krevelen, 1963).

Según Corona et al 2006 Los medios mas propicios en los cuales pueden darse procesos de acumulacion vegetal corresponden a los siguientes:

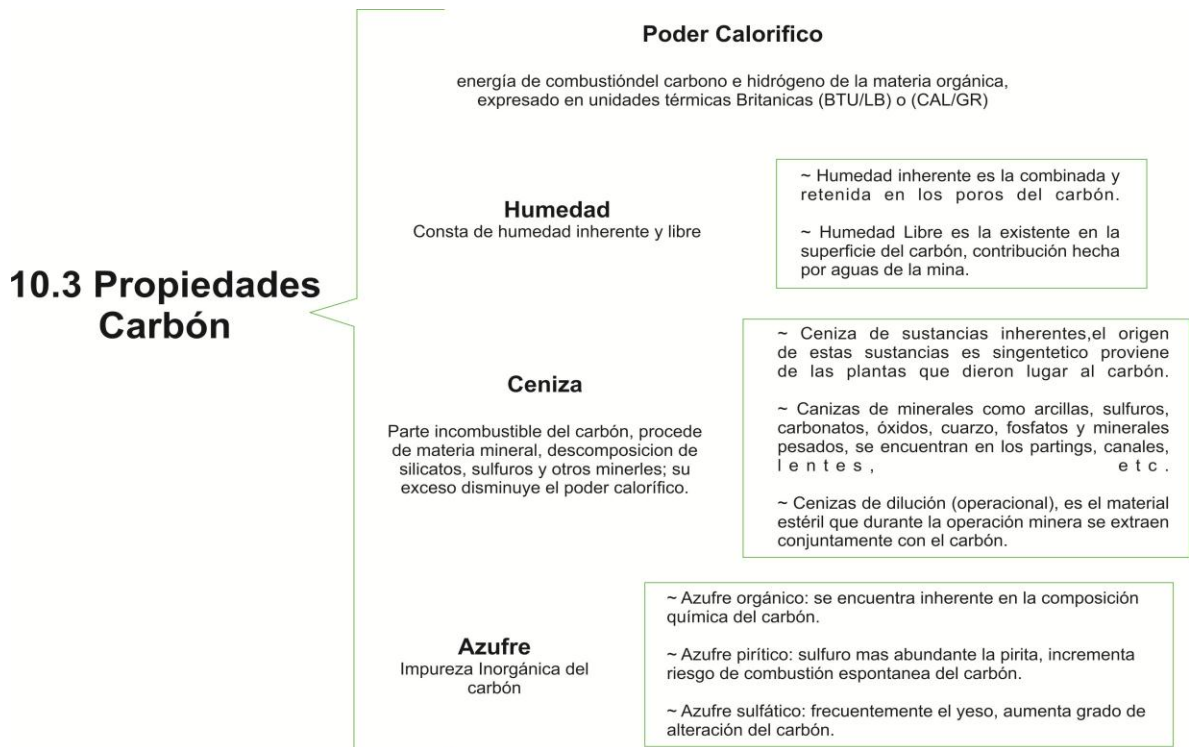
- Zonas pantanosas, ciénagas, canales, lagos y charcas intercontinentales, con vegetación de tipos diversos (herbácea o leñosa) controlada por la profundidad del medio, sus condiciones del fondo, temperatura de las aguas, etc.
- Lagunas, estuarios y marismas, saladas o salobres. Éstas son zonas con comunicación ocasional con el mar, en las que se produce una importante actividad biológica vegetal.
- Manglares de las zonas tropicales que se encuentran bordeando a las lagunas y a los estuarios.
- Ambientes fluviales y deltaicos.

Figura 9. Esquema de la depositación y sedimentación de plantas superiores para la formación del carbón.



Fuente: Tomado Tarbuck 2005

Figura 10. Propiedades características de los carbones las cuales permiten determinar su calidad.



Fuente: Tomado y modificado de <http://carbon-unilibre.webnode.com.co/clasificacion/propiedades-del-carbon-/>


Para la mina la Jagua cada carbón presente en el depósito tiene identificadas cada una de las diferentes propiedades (tabla 3) mencionadas en figura, en la cual se muestran valores promedios para cada uno con respecto a cada una de sus propiedades tales como azufre (TS) el cual va a determinar a qué tipo de carbón corresponde cada manto ya sea tipo A (alto contenido de azufre, > 0.76%) o tipo B (menor contenido de azufre, < 0.76%), ceniza (ASH) muestra el porcentaje de parte incombustible del carbón, el alto contenido de ceniza afecta el poder calorífico haciendo que este disminuya, la ceniza en el depósito disminuye con la profundidad, poder calorífico (BTU/LB) es la energía de combustión del carbono, la mina la Jagua presenta valores altos de poder calorífico mayores a 12000 BTU/L, humedad es un componente no combustible que consume calor de la parte

combustible y debilita su estructura física, para el caso de la mina la Jagua la humedad tiende a disminuir a mayor profundidad (figura 11), materia volátil son aquellas sustancias que se desprenden al calentar el carbón en ausencia de aire su comportamiento en el sinclinal la Jagua muestra que a mayor profundidad menor es la cantidad de materia volátil (figura 11).

Tabla 3. Tabla de calidad de la mina la Jagua para cada uno de los mantos del depósito.

TABLA DE CALIDAD PLJ

MANTO	ESP	TS	ASH	BTU/LB	TONS
M00	0,80	0,89	2,71	12,580	711
M01	0,58	1,05	2,68	12,821	516
M02U	2,42	0,47	1,48	12,949	2.152
M02L	0,59	2,94	5,76	12,517	525
M03U	1,53	0,43	1,85	13,051	1.360
M03A	0,46	0,86	4,91	12,574	409
M03B	0,58	0,74	6,02	12,378	516
M04	0,99	2,65	4,37	12,852	880
M05	2,25	0,62	2,73	12,893	2.001
M08	0,57	0,71	4,22	12,619	507
M09	0,35	0,78	9,00	11,963	311
M10	1,20	0,84	3,63	12,844	1.067
M11	0,63	3,16	5,29	12,844	560
M15	5,54	0,32	2,21	13,251	4.926
M20	2,38	0,42	2,84	13,106	2.116
M25	2,10	1,13	4,20	12,854	1.867
M27	0,33	0,53	23,93	9,926	293
M28	0,53	0,82	8,29	12,444	471
M30	1,29	0,46	3,83	13,002	1.147
M35	3,23	0,70	3,54	12,981	2.872
M40	2,04	1,13	4,29	13,394	1.814
M45	2,13	0,66	1,77	13,781	1.894

 Tipo B < 0.76% Azufre


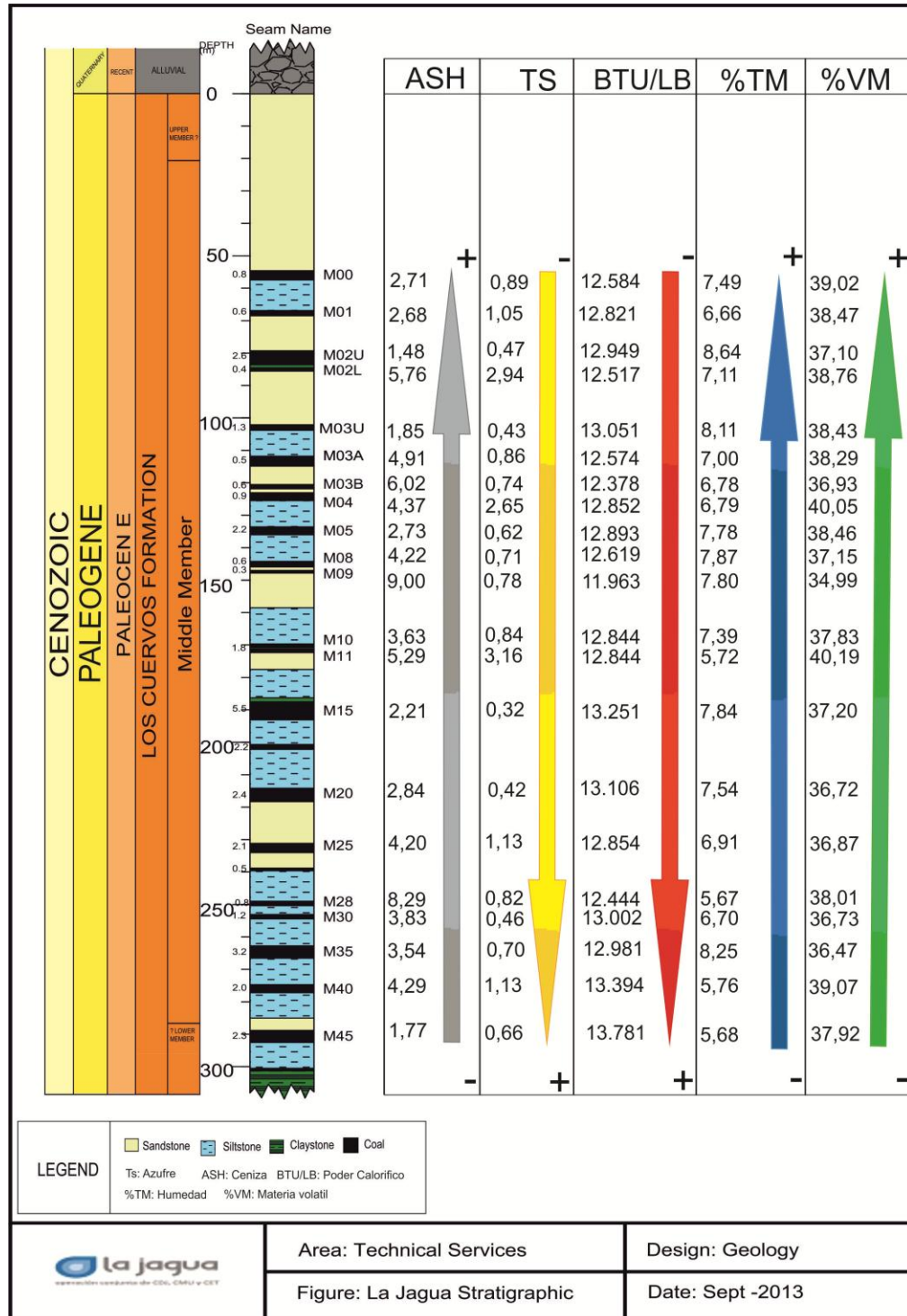
 Tipo A > 0.76% Azufre

Figura 11. Columna estratigráfica de valores de calidad de la mina la jagua.

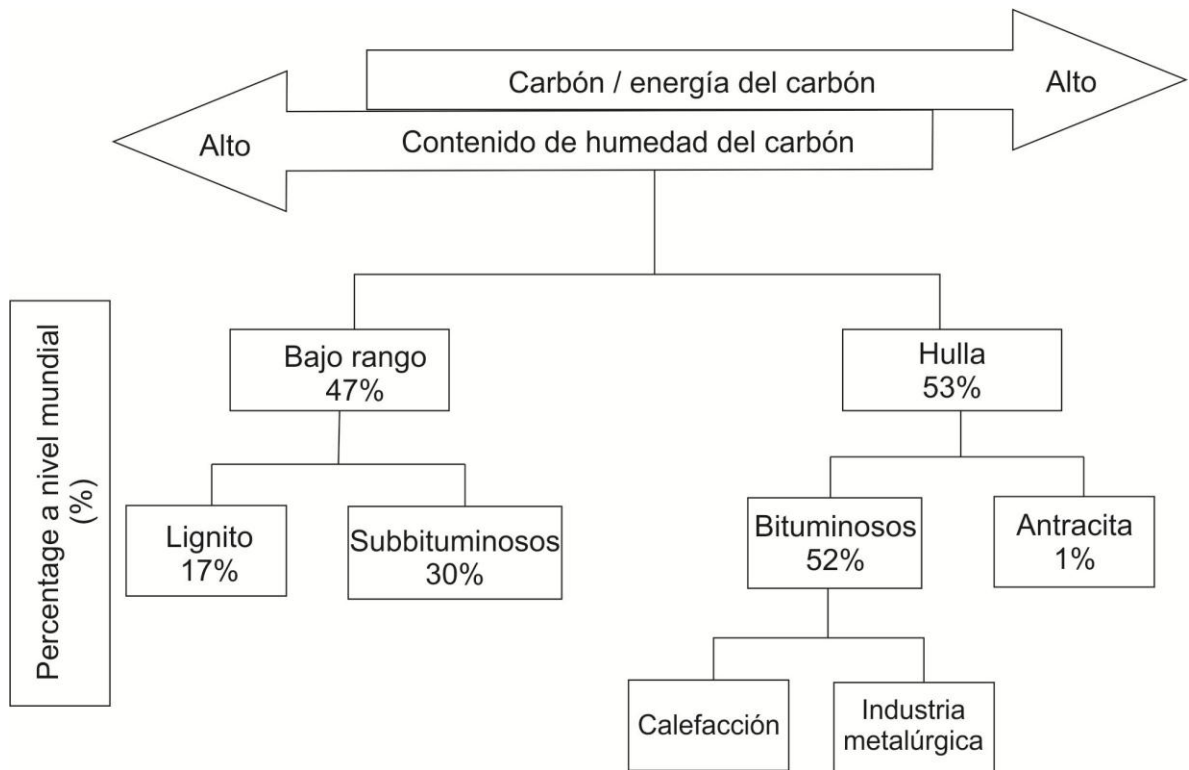


Fuente: Modificado de columna estratigráfica Mina la Jagua 2013.

9.4 TIPOS DE CARBÓN

El carbón presenta diferentes variedades (figura 12) de acuerdo al grado de carbonificación que haya sufrido la materia orgánica que está dada por factores como la edad, presión, temperatura, dentro de los carbones vamos a encontrar el lignito corresponde a los carbones de más bajo grado, siguiéndole los subbituminosos, bituminosos hasta llegar a la antracita que es un carbón de alto grado con gran poder calorífico y los más escasos en el mundo.

Figura 12. Esquema del rango de los diferentes carbones y la ubicación del carbón de la mina la jagua.



Fuente: Tomado de <http://en.sxcoal.com/93/19062/DataShow.html>

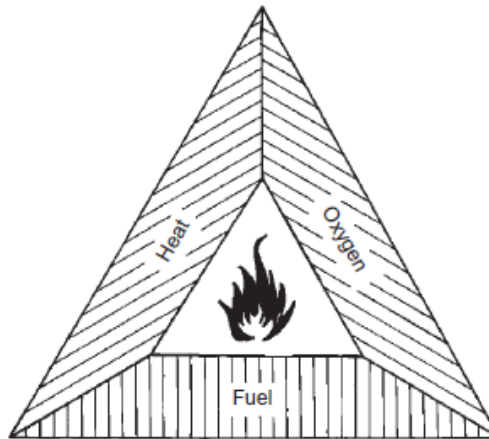
10. COMBUSTION ESPONTÁNEA

La combustión espontánea es una reacción exotérmica donde el carbón empieza a oxidarse al entrar en contacto con la atmosfera (Ozdeniz, Sivrikaya and Sensogut, 2014), esta reacción va a permitir que la temperatura se eleve haciendo que se favorezca la reacción y el calentamiento se va incrementando facilitando así llegar a la temperatura de inflamación, la propiedad que tiene el carbón de liberar calor al estar en contacto con el oxígeno más la baja conductividad térmica van a favorecer la acumulación de calor y por tanto se dan las condiciones que sumadas a las condiciones físicas deben ser tales que permitan iniciar un proceso de combustión espontánea (Angola, 2005). Un mecanismo exacto de la reacción de la combustión espontánea no se tiene claro debido a las dificultades en la comprensión del mecanismo de combustión espontánea y la presencia de muchos factores internos y externos que afectan el desarrollo de dicho proceso (Kaymakci and Didari, 2002).



Para desencadenar una reacción de combustión en carbón se necesitan tres elementos fundamentales: combustible, oxígeno y una fuente de ignición (Stracher, Prakash and Sokol, 2011), (figura 13), para este caso el combustible hace referencia al carbono en el carbón.

Figura 13. Triángulo de fuego que muestra los tres elementos esenciales para desencadenar cualquier reacción que desencadene fuego.



Fuente: Tomado de Stracher, Prakash and Sokol (2011)

10.1 FACTORES QUE INCIDEN EN LA AUTO COMBUSTIÓN DEL CARBÓN

La auto combustión presenta diversos factores que son medio facilitador para la generación de este fenómeno dichos factores pueden ser aquellos que se encuentran de manera intrínseca en el carbón o aquellos que son proporcionados por el medio donde se encuentran que se conocen como extrínsecos.

Factores intrínsecos

- **Textura y estado físico del carbón:** la granulometría presenta un papel muy importante debido a que menor tamaño de grano indica mayor absorción de oxígeno, mostrando que los carbones de granos más finos tienden a ser más auto inflamables (Kaymakci and Didari, 2002), como también los carbones con mucho fracturamiento son más accesibles al oxígeno, la humedad ayuda a que se de fracturamiento en carbones y aporta oxígeno en un estado disuelto.
- **Constituyentes del carbón:** Los componentes petrográficos del carbón tienen diferente tendencia a la oxidación. A bajas temperaturas, la fusinita absorbe más activamente el oxígeno, ya que es fibrosa y constituye la parte más blanda

del carbón. A temperaturas mayores, absorben más intensamente el oxígeno la vitrinita y la clarinita, la durinita es más estable (Kenneth, 2005).

- **Contenido de ceniza:** El alto contenido de cenizas disminuye el calentamiento del carbón, y por lo tanto se inhibe la auto combustión (Kaymakci and Didari, 2002), pero también el alto contenido de la misma va afectar la calidad del carbón haciendo que presente mayor impureza.
- **Sulfuros:** la presencia de minerales como la pirita y la marcasita durante la oxidación aceleran el calentamiento espontaneo del carbón, debido a que causas desintegración y reducción en el tamaño de las partículas involucradas en las reacciones, los sulfuros deben estar presentes en concentraciones que no superen el 1 o 2% (Candela y Quintero 2004), la pirita diseminada por todo el carbón en partículas microscópicas actuarán con más eficacia que mayores cantidades de pirita nodulares (Drakeley, 1916).
- **Geología del yacimiento:** La geología en la que se está presentando un deposito puede llegar a facilitar la generación de fenómenos de auto combustión debido que si las capas son muy finas y presentan una carga los suficientemente fuerte que permita la generación de fisuras o grietas en el manto; otro factor que evita auto calentamiento es que entre mayor sea la compactación de los mantos mayor será la dificultad para penetrar el aire (Kenneth, 2005).

Factores extrínsecos

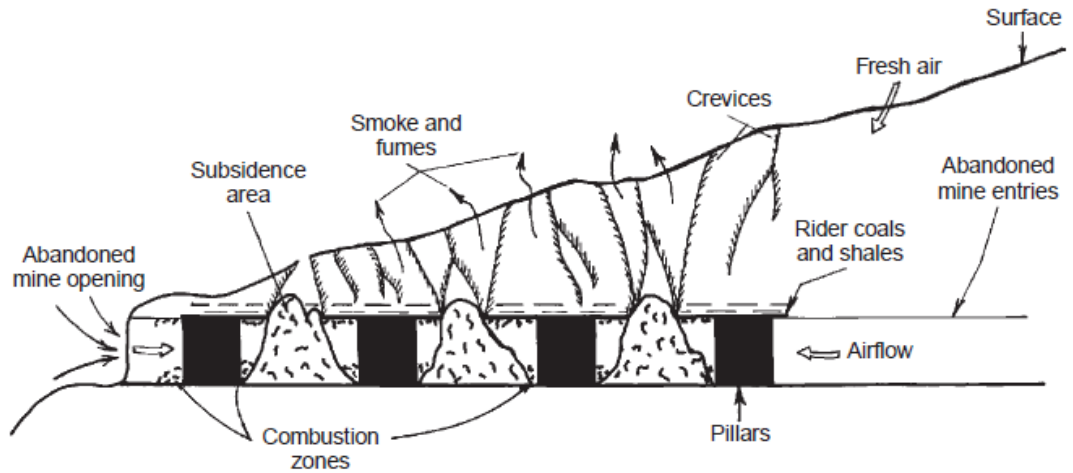
- **Tectónica y friabilidad:** se ha observado que la cercanía que tiene una falla a puntos con presencia de auto combustión son un factor determinante para el desarrollo de este proceso, así como las zonas con elevada complejidad estructural alcanzando un mejor desarrollo de dichos procesos junto a zonas de

cabalgamiento (Candela y Quintero 2004); las irregularidades tectónicas van a facilitar el desarrollo de procesos de auto combustión (Vuuren 1995).

- **Explotación minera:** El descapote de los mantos de carbón cuanto más rápido y completo sea menor será el riesgo de presentar auto calentamiento (Kenneth, 2005), por eso es importante que se tenga un procedimiento adecuado para el minado de carbón para así evitar dejar carbón o las condiciones dadas para generar eventos de auto combustión.
- **Flujo de aire:** la ventilación es un factor determinante para desencadenar una reacción de oxidación en los carbones, ya que si se tiene muy baja ventilación no se puede dar lugar a la oxidación por falta de aire, mientras que si hay cantidades muy elevadas de ventilación va impedir que se dé la acumulación del calor para generar una reacción de oxidación, se deben tener cantidades de aire moderadas para desencadenar una reacción (Kaymakci and Didari, 2002).
- **Temperatura:** las elevadas temperaturas actúan como un catalizador en la reacción oxígeno-carbón (Candela y Quintero 2004).
- **Minería abandonada:** En minas subterráneas que utilizan un sistema de minería de habitación y pilares, una proporción relativamente grande (30 a 50%) del carbón se deja en su lugar. Los carbones de techo y lutitas carbonosas también se dejan en la mina. El tonelaje de material combustible que queda en la mina podrá superar el que se extrae durante la minería. Por lo general minas más antiguas tenían varias entradas en el afloramiento de drenaje, ventilación y acceso (Figura 14). Los incendios comenzaron normalmente en el afloramiento y se propagan a lo largo del afloramiento o por medio de los socavones dejados. El calor podría moverse por convección a través de la mina o por conducción en la sobrecarga. La sobrecarga sirve como un aislante, evitando la transferencia de calor lejos del material combustible (Stracher, Prakash and

Sokol, 2011), producto de esto se tiene que hacia la parte sur de la mina se esté presentando auto combustión a partir de minería abandonada.

Figura 14. Esquema de minería abandonada con pilares, factor importante para generación de auto combustión.



Fuente: Tomado de Stracher Glenn B et al 2011.

10.2 CLINKER

El Clinker es una roca pyrometamorfica (de Boer et all, 2001), es decir generada por incendios mayores acompañados por la adquisición de una magnetización termoremanente significativa (TRM), es un material caolinizado y silicificado con alta porosidad, permeable, muy fracturado, frágil y duro, para la mina la Jagua presenta tonalidades rojas (figura 15). Las propiedades físicas del Clinker son significativamente diferentes a aquellas de la roca original (Trofimczyc 2001); durante la alteración el protolito es reducido y posteriormente oxidado liberándolo de materia volátil, dando paso a concentraciones de minerales principalmente de hierro alrededor de la zona de combustión, para identificar estos cuerpos de Clinker se realiza a partir de registros de susceptibilidad magnética (Trofimczyc 2001). El Clinker es un geomaterial con una mineralogía compleja con presencia

de diferentes fases minerales, las diferentes tonalidades podrían explicarse por las concentraciones mineralógicas, ejemplo de zonas de tonalidades opacas están asociados a contenidos de magnetitas mientras que zonas de tonalidades rojizas se asocian a una mayor oxidación y alto contenido de hematita (Quintero et al 2009). El Clinker es una roca que varía con respecto a alteraciones térmicas, estructura, textura, composición original posición dentro de la zona de combustión. El Clinker dificulta las operaciones mineras debido a la generación de zonas de inestabilidad geotécnica (Quintero et al 2009)

Figura 15. Clinker roca producto de la auto combustión de mantos de carbón de la mina la Jagua.



11. RESULTADOS Y ANÁLISIS

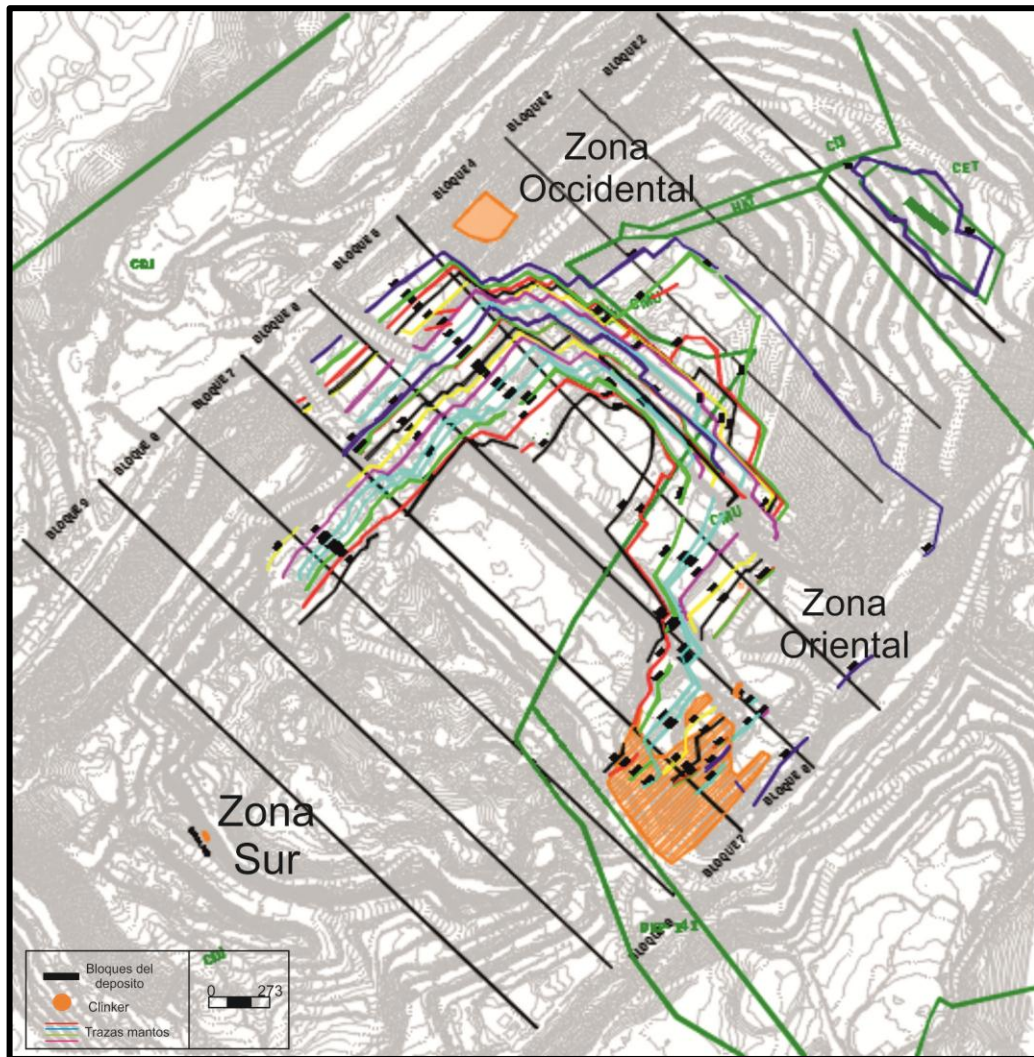
A continuación se van a mostrar los resultados de las actividades realizadas durante el desarrollo de la práctica las cuales consistieron en la delimitación de las áreas con presencia de Clinker, interpretación de imágenes a partir del software Siro Vision, plan de perforaciones, toma de registros eléctricos (Gamma Ray), perfiles geológicos para la generación de un modelo 3D, cálculos de pérdidas de toneladas de cabo, afectación de la calidad de los carbones cercanos a zonas de auto combustión, causas posibles de la auto combustión para la mina la Jagua y alternativas de mitigación.

11.1 TRABAJO DE LEVANTAMIENTO DE ÁREAS DE CLINKER

11.1.1 Delimitación de las áreas de Clinker

Se realizó una re delimitación de las áreas que presentan evidencia en superficie de Clinker, donde se identificaron las diferentes zonas, teniendo como ayuda principal las paredes expuestas que facilitaron la localización de la quema para con ello poder delimitar el polígono en el plano del área donde se tiene la presencia de Clinker, para el proyecto se identificaron cuatro áreas principales de quema (Figura 16) donde una de ellas ya fue retirada por la minería ubicada hacia el flanco occidental (zona occidental) de bloque 4, una segunda zona donde se vio afectado un manto de carbón hacia el flanco oriental (zona oriental) en el bloque 5 donde se evidenció todo el proceso desde el inicio de la auto combustión hasta la fase final que fue el minado, una tercera zona la cual se encuentra hacia la parte sur del pit donde no se tiene acceso aun, solo se evidencia una fumarola que se encuentra en constante actividad, una última zona hacia el flanco oriental donde esta próxima la minería en llegar y donde se concentró la mayor parte de la investigación realizada, partiendo que es un área de gran extensión donde se encuentran afectados varios mantos de carbón.

Figura 16. Áreas identificadas de Clinker en afloramientos producto de la combustión espontánea en mina la Jagua.



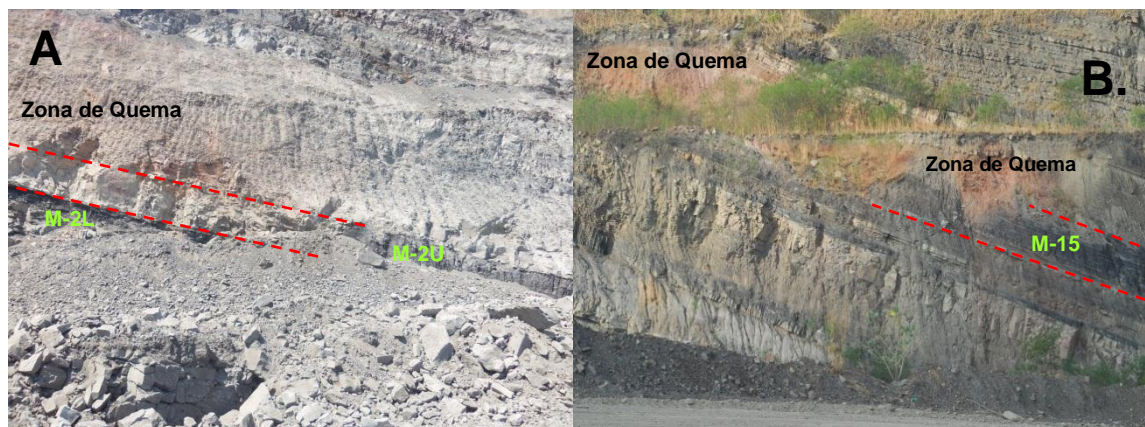
Flanco oriental sinclinal de la Jagua

Hacia la parte suroriental de bloque 6 se va a encontrar la zona más grande con evidencia de la auto combustión la cual está afectando varios mantos de carbón como lo son el M2U, M10, M11, M15, que son identificados en las paredes expuestas dejadas por la minería, para el caso del manto 2U se puede ver de manera clara el contacto de la zona afectada por la auto combustión con el carbón que no alcanzo a sufrir ninguna afectación (Figura 17A) este manto normalmente

presenta espesores aproximados de 2m a 2.5m, lo cual hace una pérdida considerable de toneladas de carbón.

El manto más potente y con mayor generación de volumen de carbón que para el caso corresponde al manto 15 con espesores que varían entre 4.65 a 5.70 m presenta evidencia auto combustión (Figura 17B) la cual está dada por la presencia de Clinker que ocupa el lugar donde debería continuar el manto de carbón.

Figura 17. Evidencia en superficie de las zonas afectadas por auto combustión en los diferentes mantos de carbón en la mina la Jagua A. Contacto entre Clinker de manto 2U con el manto sin ninguna afectación. B. Contacto del Clinker de manto 15 con la zona que no presenta afectación.



Hacia la parte oriental de bloque 5 se evidencio todo el proceso de auto combustión de un manto de carbón que corresponde al manto 5, el cual desencadeno una reacción de oxidación cuando este quedo expuesto a condiciones del ambiente facilitando el contacto entre el carbón y el aire, permitiendo así que entrara en combustión, evidencia de este proceso es la llama y el humo constante que muestra este carbón (figura 18A-18B).

Figura 18. Auto combustión manto 5 bloque oriental. A. llama resultado de la auto combustión. B. humo blanco productos de la combustión de un carbón.



11.1.2 levantamiento de imágenes a partir de Sirovision

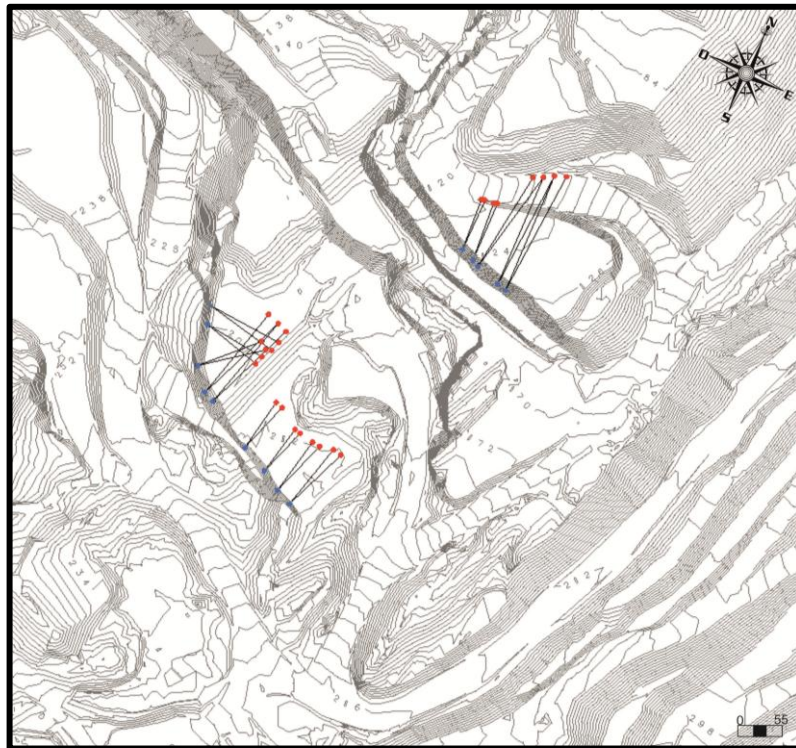
Sirovision es un sistema de mapeo y análisis geotécnico, el cual permite crear imágenes 3D partiendo de dos imágenes digitales. La ubicación espacial de puntos se basa en la triangulación en tres dimensiones. Para la triangulación se requieren al menos dos imágenes, la posición y orientación de la cámara, así como también la posición del punto de control que se tiene en la pared.

El programa sirve de herramienta para mapear las estructuras directamente sobre la superficie en 3D mostrando características geológicas de manera inmediata, facilita la toma de información estructural de sitios con difícil acceso (paredes altas, deslizamientos), se pueden realizar análisis de las diferentes estructuras fallas, diaclasas, litologías, trazas de mantos que están expuestas en la pared.

Para la ubicación de las fotos realizadas, durante las diferentes salidas a campo se eligieron los sitios donde sería favorable y se tenía fácil acceso para tomar las diferentes fotografías a las paredes que se encontraron expuestas y estaban mostrando las áreas de interés que para el caso serían las zonas con presencia de Clinker (Figura 19), estas fotografías ayudaron a la delimitación del polígono

del área de quema en la mina ya que facilitan la obtención de puntos de lugares donde no se tienen un fácil acceso.

Figura 19. Distribución de los diferentes puntos donde se hicieron las fotografías en áreas de presencia de Clinker.



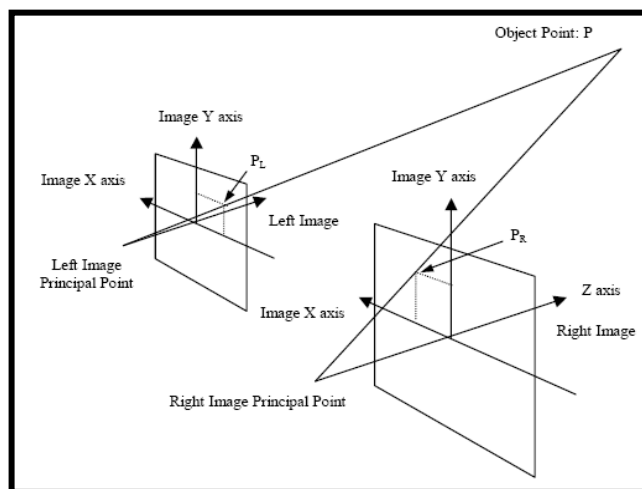
VENTAJAS DE SIROVISION según CAE Mining 2014

- **Exacto:** normalmente produce una exactitud de 3 cm a 5 cm por cada 100m de distancia de la pared de roca.
- **Rápido:** las fotografías se pueden tomar con rapidez y facilidad, para minería a cielo abierto se pueden utilizar diferentes tipos de lentes desde la misma posición lo que va a permitir tener una flexibilidad en el nivel de detalle.
- **Fácil uso:** no se requiere un entrenamiento tecnificado, solo conocimientos básicos de cómo hacer uso correcto de una cámara fotográfica digital.

- **Seguro:** el personal no se expone a estar cerca a la cara de la roca todo se hace desde donde se toma la fotografía.
- **Bajo costo de implementación:** como se utiliza para una minería a cielo abierto los costos de instalación de software no tienden a ser muy costosos.

La metodología seguida para la toma de fotografías en campo consistía en ubicar dos puntos en tierra y un punto de control en la pared que lo más conveniente era marcarlo con aerosol para así tener una fácil ubicación, la separación de los dos puntos en tierra es la equivalente a $(1/7)$ de la distancia que hay entre cualquier punto y la pared (Figura 20), se debe tener en cuenta que al momento de tomar las fotografías primero se ubica la foto izquierda y posterior la derecha, se toman las coordenadas de los tres puntos involucrados en la foto la cual servirá para el procesamiento de estas en oficina.

Figura 20. Ubicación espacial de los puntos de toma de las fotografías con respecto al punto de control.

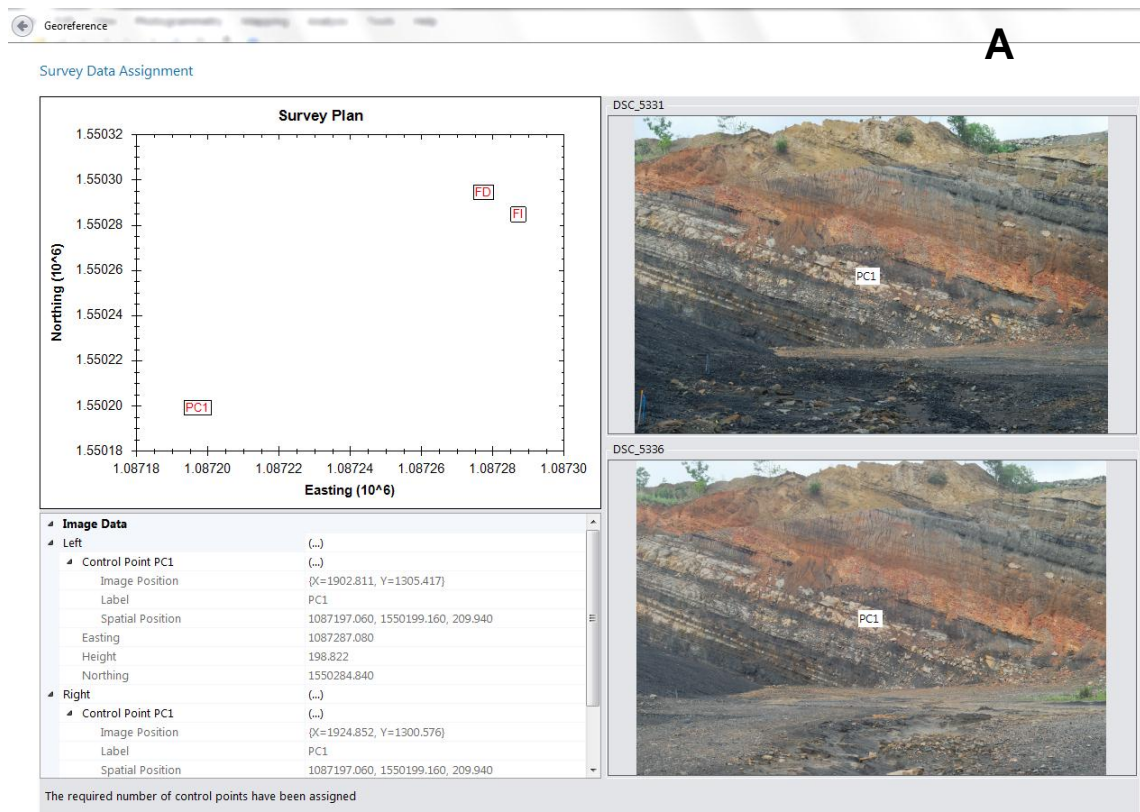


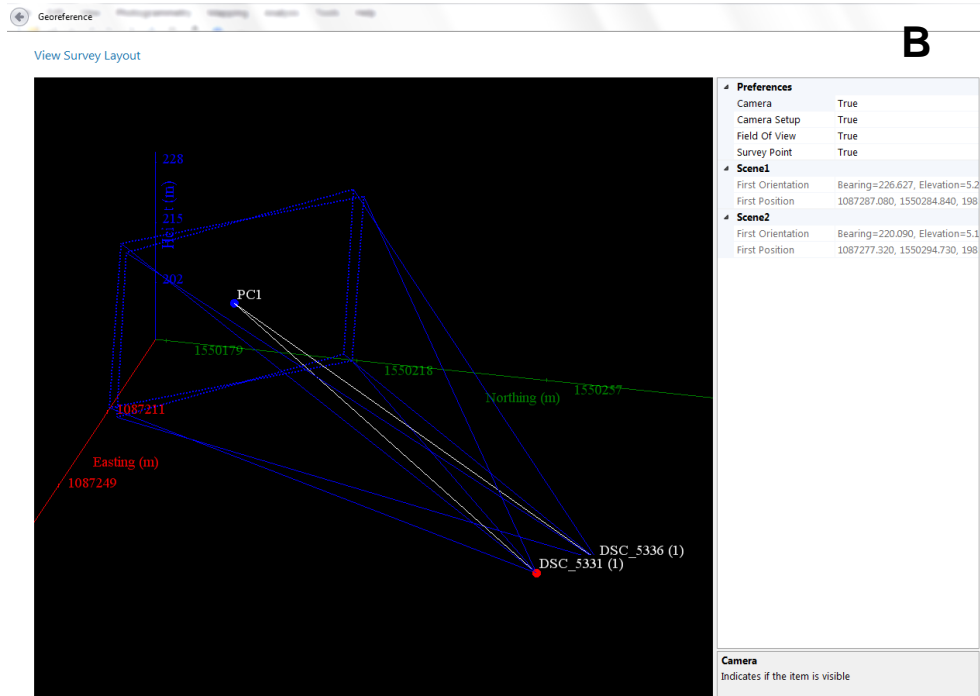
Fuente: Tomado de Van Der Merwe, 2009

PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

Posterior a la toma de las fotografías en campo y con las coordenadas respectivas de los tres puntos se procede a montar las fotos en el software y realizar la georeferenciación lo que hace que estas se superpongan dando paso a la generación de una imagen 3D (Figura 21A-21B).

Figura 21. Georeferenciación de imágenes. A. ubicación en planta de los puntos en tierra y el punto de control. B. Georeferenciación y superposición de imágenes.

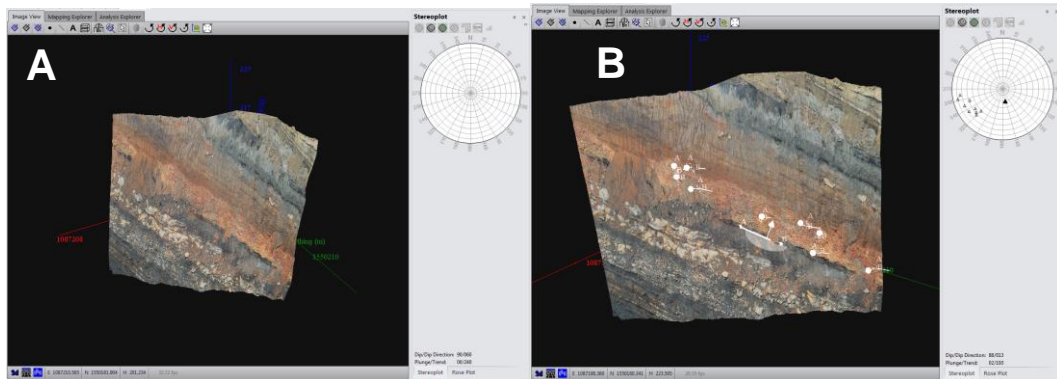




Fuente: Software SiroVision mina la Jagua, 2015.

Posterior a la georeferenciación y la superposición de imágenes se genera la imagen 3D (Figura 22A) en el software SiroVision, donde en estas se le pueden determinar características como trazas de mantos, planos de fallas, diaclasas; en estas imágenes se pueden obtener los datos estructurales de las estructuras que muestra la imagen (Figura 22B).

Figura 22. imagen en 3D generada a partir del software Sirovision.



Fuente: Software SiroVision mina la Jagua, 2015.

A continuación se muestran una serie de imágenes que dejan ver el resultado de las fotos realizadas en las paredes expuestas donde se tenía evidencia de mantos que sufrieron auto combustión, se encontraron dos paredes representativas donde se puede observar el manto 2U (Figura 23) y como fue consumido por proceso de auto combustión, a partir de la imagen se tiene que el área aflorante de Clinker tiene 2.23 m de espesor que corresponde a todo el interburden afectado producto de la auto combustión de manto 2U , se tiene también el manto 15 (Figura 24) (Figura 25) donde se refleja el contacto bastante irregular de la quema con el manto de carbón que no sufrió afectaciones que puedan ser observadas a simple vista, se pudieron tomar las coordenadas de la zona la cual es bastante irregular lo que permitió sectorizar esta zona en los planos, siendo de gran ayuda para la cartografía que se realizó en primera medida, en la imagen se puede ver el contacto entre la quema en superficie con el manto de carbón completo.

Figura 23. evidencia del resultado producto de la auto combustion. Manto 2U perrdida de todo el manto.

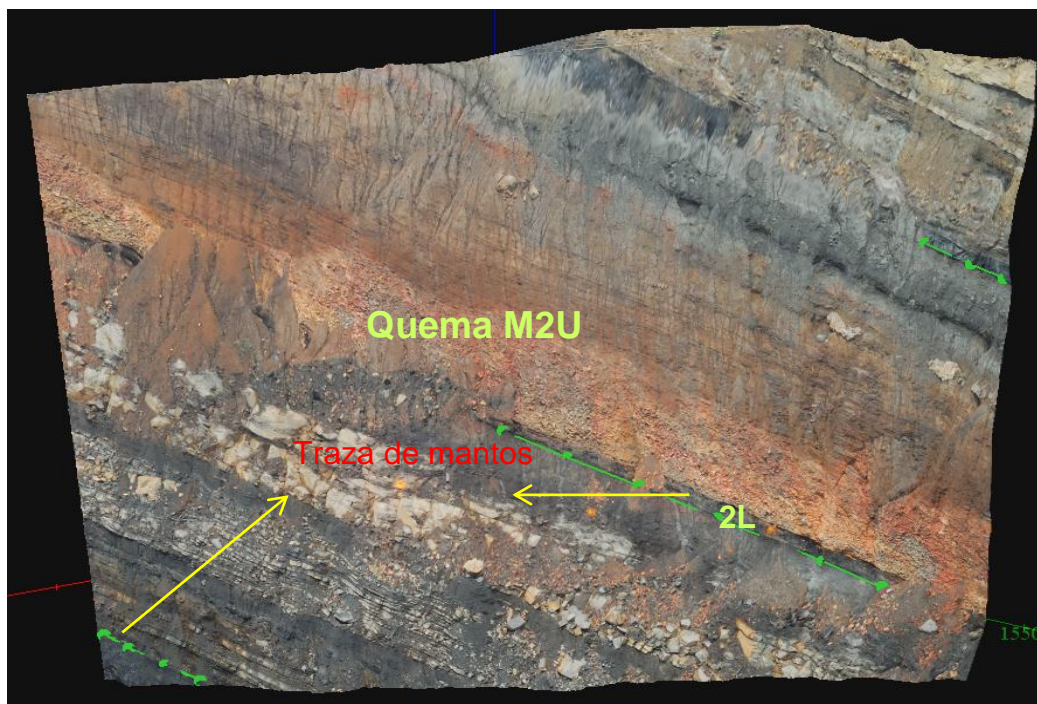
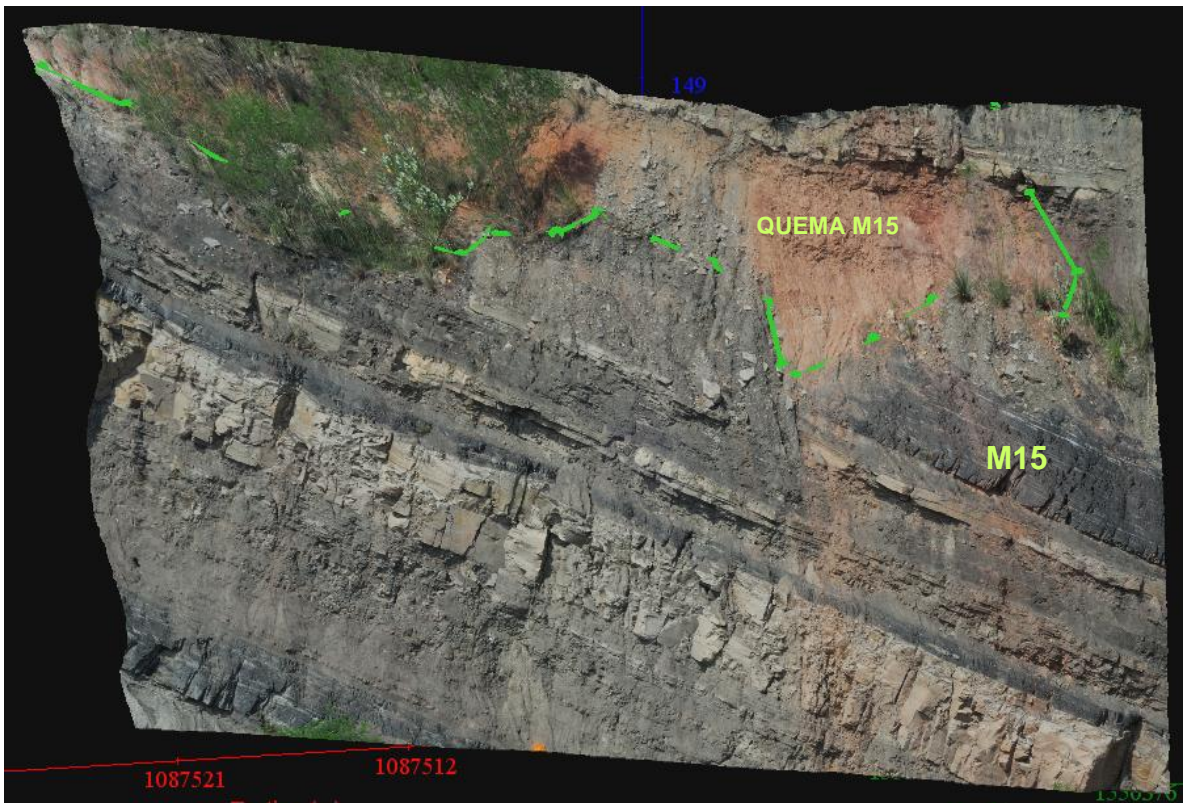


Figura 24. Clinker dejado como producto de la auto combustión en este caso hace referencia a M15.



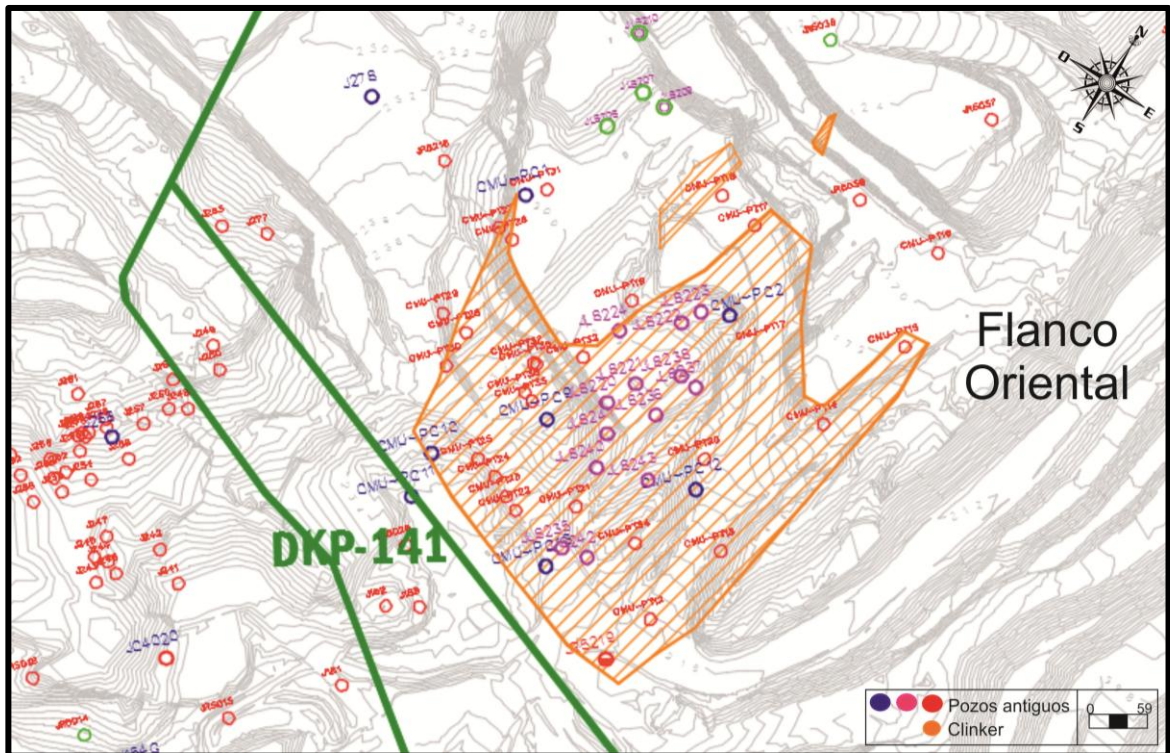
Figura 25. Contacto irregular del Clinker con el manto 15.



11.2 PLAN DE PERFORACIONES

Como parte de la metodología inicial se realizó una recopilación de información existente de pozos perforados en la zona donde se estaba evidenciando que en algún momento existieron eventos de auto combustión (Figura 26), estos pozos ayudaron a planificar de manera más segura en qué lugares era conveniente realizar nuevas perforaciones donde se confirme lo que se observa en los registros como es la pérdida de algunos carbonos.

Figura 26. Perforaciones antiguas del área donde se identificaron las zonas de auto combustión.

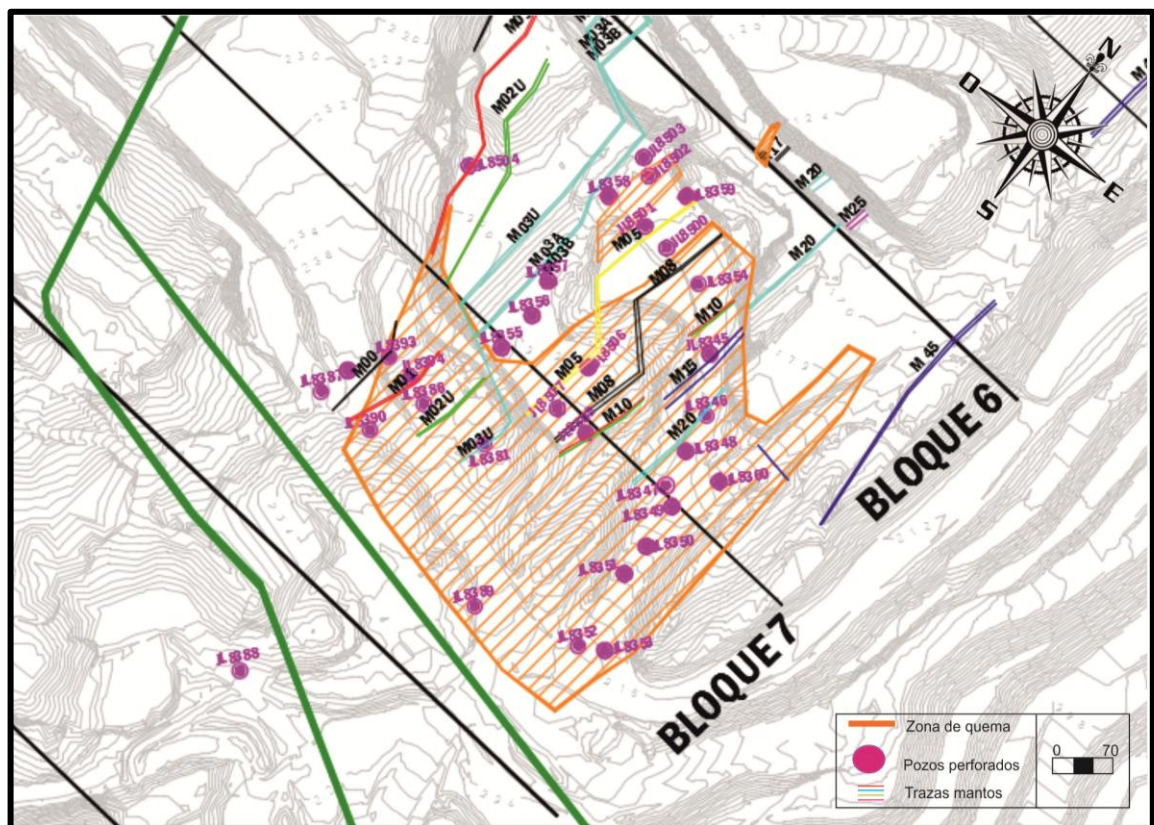


Para el desarrollo de este plan de pozos abiertos, después de tener ya las áreas de Clinker definidas y delimitadas se planearon los posibles pozos a perforar teniendo como criterio que coincidían con las líneas horizontales de oriente a occidente, para poder elaborar perfiles de cada una de estas y de acuerdo al

modelo poder cuantificar de manera aproximada la pérdida de carbón que se tiene producto de la auto combustión, los pozos abarcaron toda la zona de Clinker y áreas cercanas para ver su comportamiento en profundidad (Figura 27).

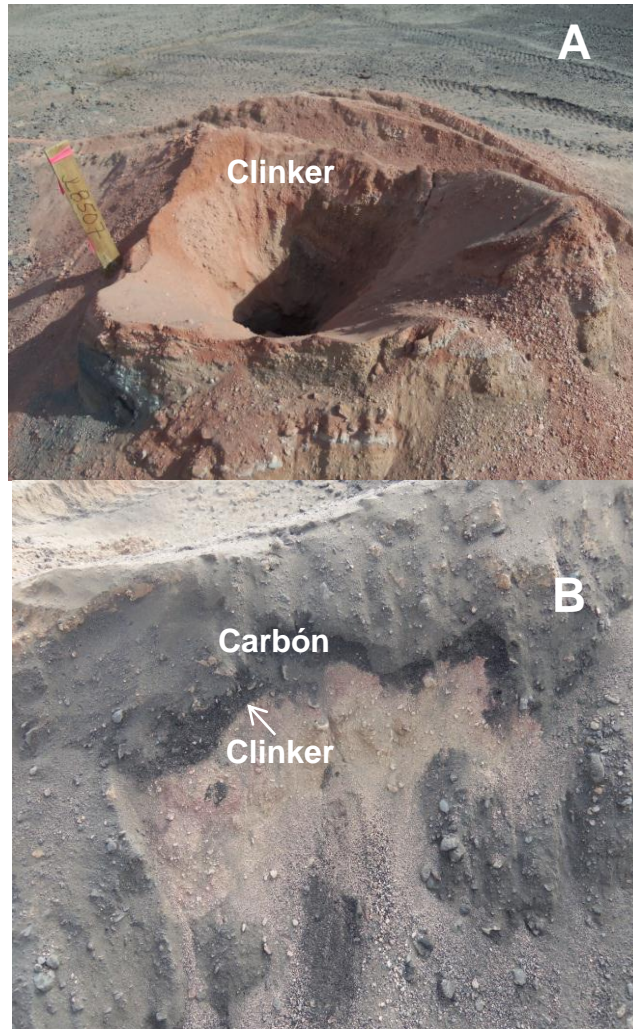
Las perforaciones de los pozos se realizaron en los meses de Abril y Julio del 2015, se usó un taladro con una broca de diámetro 6 3/4" alcanzando una profundidades de 42.5 metros aproximadamente.

Figura 27. Distribución pozos perforados y registrados para la zona con presencia de Clinker.



La toma de datos se realizó al momento de la perforación donde se describió el ripio que iba saliendo y se tomó la profundidad a la cual iba a pareciendo y desapareciendo el Clinker para así poder mostrar los intervalos en los cuales se quemaron los mantos (Figura 28A-28B).

Figura 28. evidencia de Clinker en las perforaciones realizadas en bloque 6 hacia el flanco oriental. A. ripio de de pozo perforado muestra la presencia de clinker. B. contacto entre el clinker y el carbón en los ripios.



11.3 REGISTROS ELÉCTRICOS

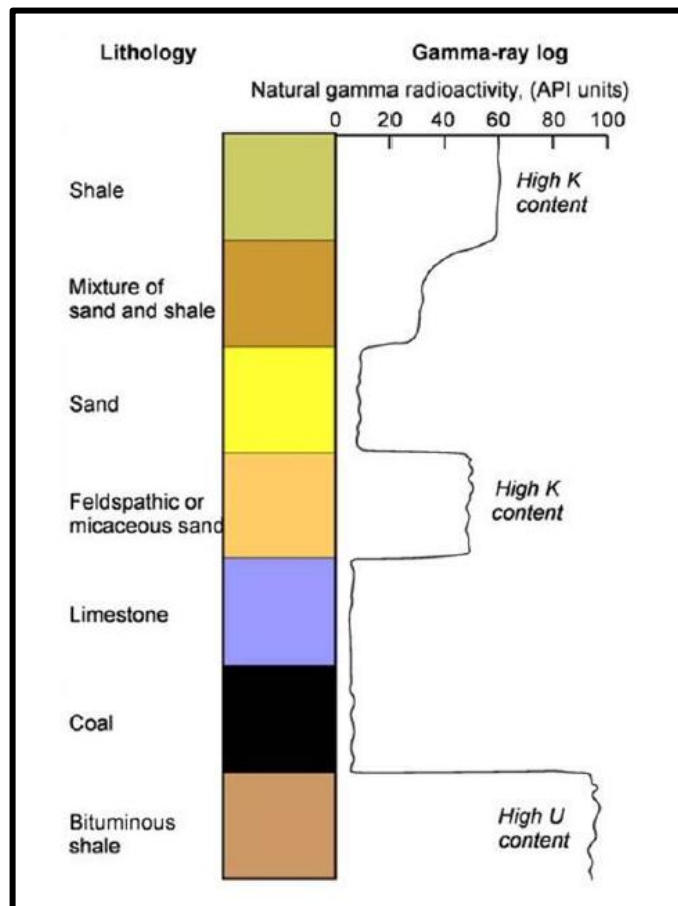
Los registros eléctricos de pozos van a permitir alcanzar información de manera indirecta sobre las propiedades de las rocas que se encuentran en profundidad y de las cuales no se tiene acceso de manera fácil, estas herramientas son una ayuda importante para la generación de modelos, interpretación de estructuras, cálculos de reservas para el caso de carbón, es uno de los métodos con mayor confiabilidad y el más utilizado en la minería del carbón para poder llegar a inferir fallas que estén afectando algunos mantos de carbón, lo cual es clave para tener claro que planes se deben usar al momento que se llegue a su explotación ya sean en la parte de voladura o en el posterior minado, conforme han pasado los años estos registros han venido evolucionando lo que hace más exacta y confiable la información que se obtiene de cada uno de ellos, para el caso del Proyecto La Jagua el área de geología cuenta con un sistema de registro eléctrico permanente donde se pueden realizar registros de tipo Gamma Ray, estos registros son muy útiles en el proyecto ya que por medio de estos se está actualizando de manera constante el modelo geológico de la mina y se tiene un control estructural de los niveles en los cuales la minería aun no llega, otra función importante que se le dio a los registros eléctricos es que en ellos se marcaron las profundidades donde aparecía el Clinker cuando se perforo y los datos que se tomaron, estos registros ayudan a complementar la información que se tomó inicialmente ya que con estos datos en profundidad se van a poder marcar en los perfiles y así poder ajustar el modelo para la parte oriental donde unos mantos se pierden producto que en algún momento sufrieron procesos de auto combustión.

11.3.1 registró gamma Ray

los rayos gamma son impulsos de ondas electromagnéticas de alta energía los cuales son emitidos espontáneamente por algunos elementos radioactivos, estos registros son una medición natural de la radioactividad de las formaciones (Figura 29), para el caso de rocas sedimentarias el registro en general muestra el

contenido de arcilla en las formaciones debido a que los elementos radioactivos tienen a encontrarse en lutitas y arcillas, este registro fue diseñado para diferenciar las lutitas de otras litologías, las formaciones limpias (areniscas) normalmente muestran un nivel bajo de radioactividad, solo va a variar este nivel si se encuentran contaminadas con elementos radioactivos y estos pueden ser cenizas volcánicas o residuos de granitos con residuos radioactivos.

Figura 29. Comportamiento de la respuesta de un registro gamma ray al paso por diferente tipos de litologías.



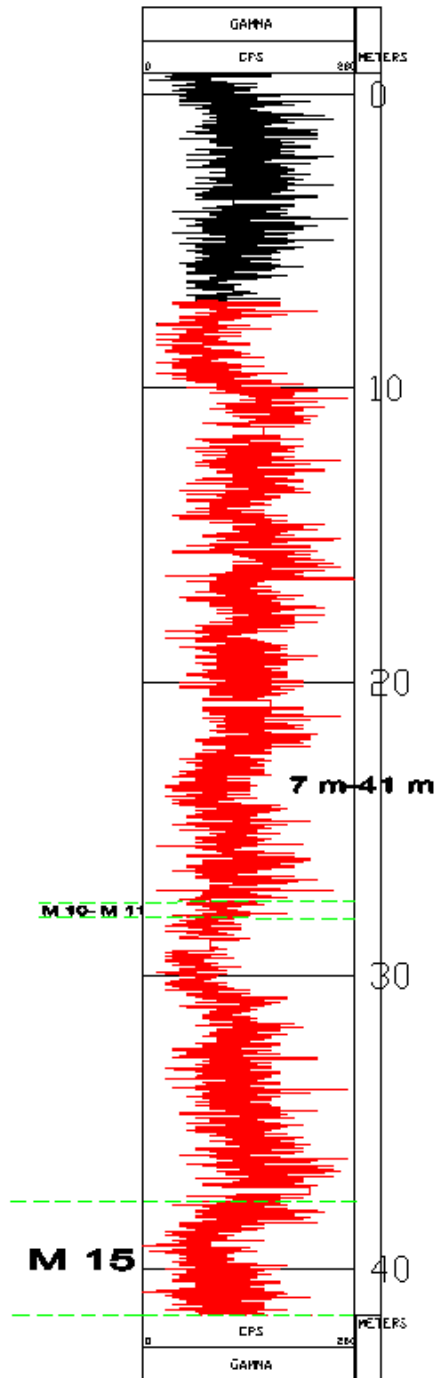
Fuente: Mier, Ricardo, 2013.

Para el desarrollo de este proyecto se registraron 30 pozos donde para cada pozo afectado por quema se marcó los intervalos en los cuales estaba apareciendo y

desapareciendo el Clinker estos registros permitieron y ayudaron a ampliar la información acerca de lo que está pasando en profundidad (Figura 30), los mantos que no aparecen en los registros se encuentran afectados es por auto combustión y la evidencia de esto es el ripio que deja al momento que se perforo.

Con los pozos registrados se pudo evidenciar que los mantos afectados por eventos de auto combustión no son solo los que se ven en superficie sino que en profundidad se encontraron más mantos que sufrieron auto combustión que corresponden al 28, 30, 35, 40, los cuales en superficie no se observaba nada, estos registros permiten ampliar más la información de lo que sucedió en algún momento al interior de las capas y que no se encuentran aflorando.

Figura 30. Pozo JL8505, en rojo se muestra todo el ripio que salió del pozo perforado, en verde se marcó donde deberían aparecer los mantos según el modelo de la mina, que para el caso hace referencia al manto 10, manto 11 y manto 15, los cuales se encuentran quemados.

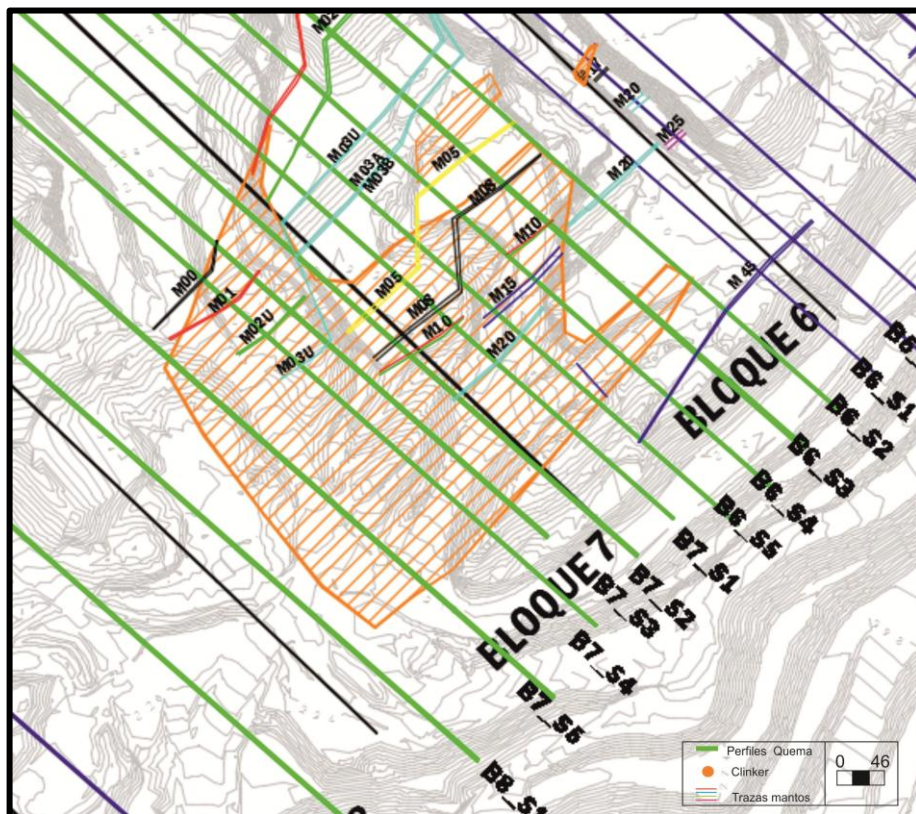


11.4 PERFILES GEOLÓGICOS

Los perfiles geológicos son una herramienta donde se muestra de manera gráfica y en dos dimensiones lo que ocurre en el subsuelo, para este caso se va a mostrar la distribución que se tiene de los mantos de carbón en profundidad.

Con la información obtenida a partir de los pozos perforados, se llevaron al software Minex donde se establecieron una serie de secciones que se encontraran pasando por el área delimitada de la quema, estas secciones se ubicaron este-oeste (Figura 31) de tal forma que los pozos que se tenían y los que se realizaron para este estudio coincidieran con ellas.

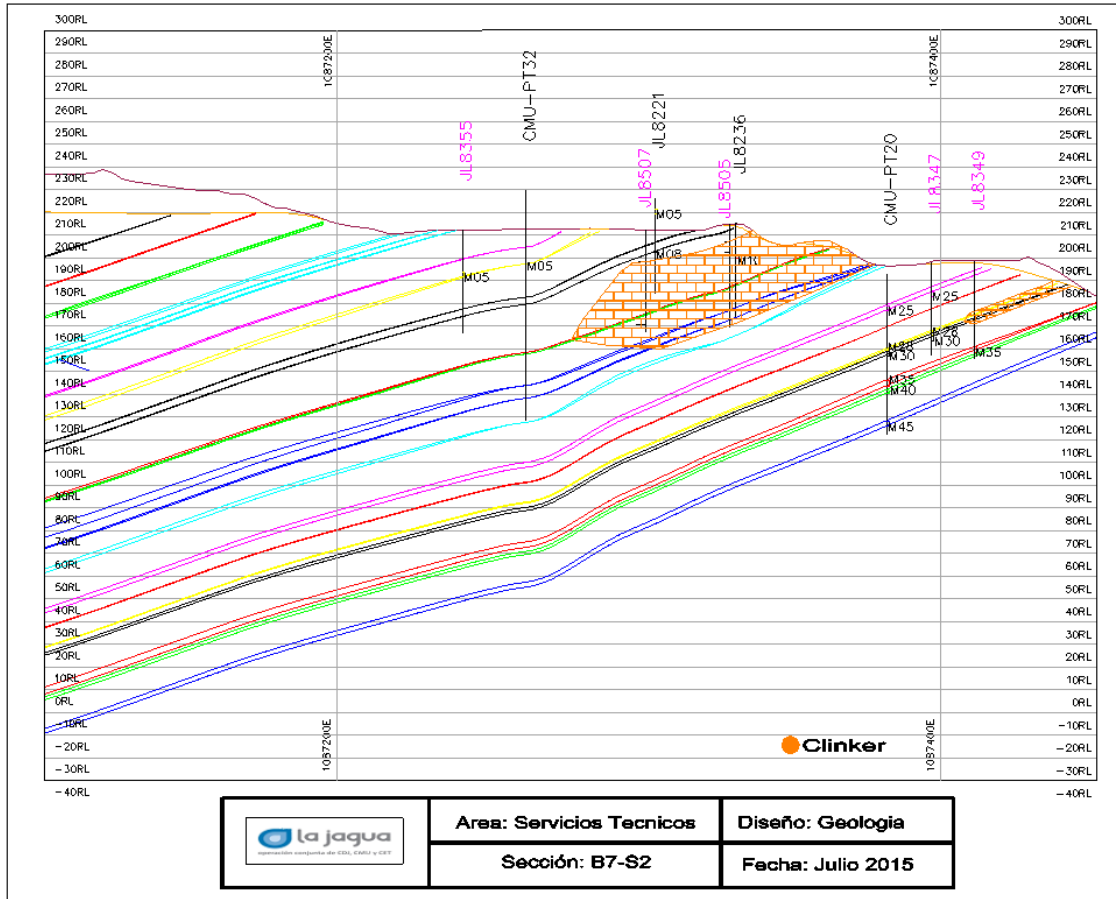
Figura 31. Plano de localización de las secciones realizadas para la zona de auto combustión.



Se generaron una serie de secciones con las cuales se realizó una interpretación y se modeló en ellas las regiones con Clinker haciendo uso de los pozos perforados, esto es clave para poder determinar las áreas a profundidad y los límites aproximados hasta donde avanzó la auto combustión en el subsuelo, se tiene que el Clinker alcanzó hasta 175 m de extensión y 36 m de espesor. A continuación se mostrarán todos los perfiles realizados para el área de estudio (Anexos).

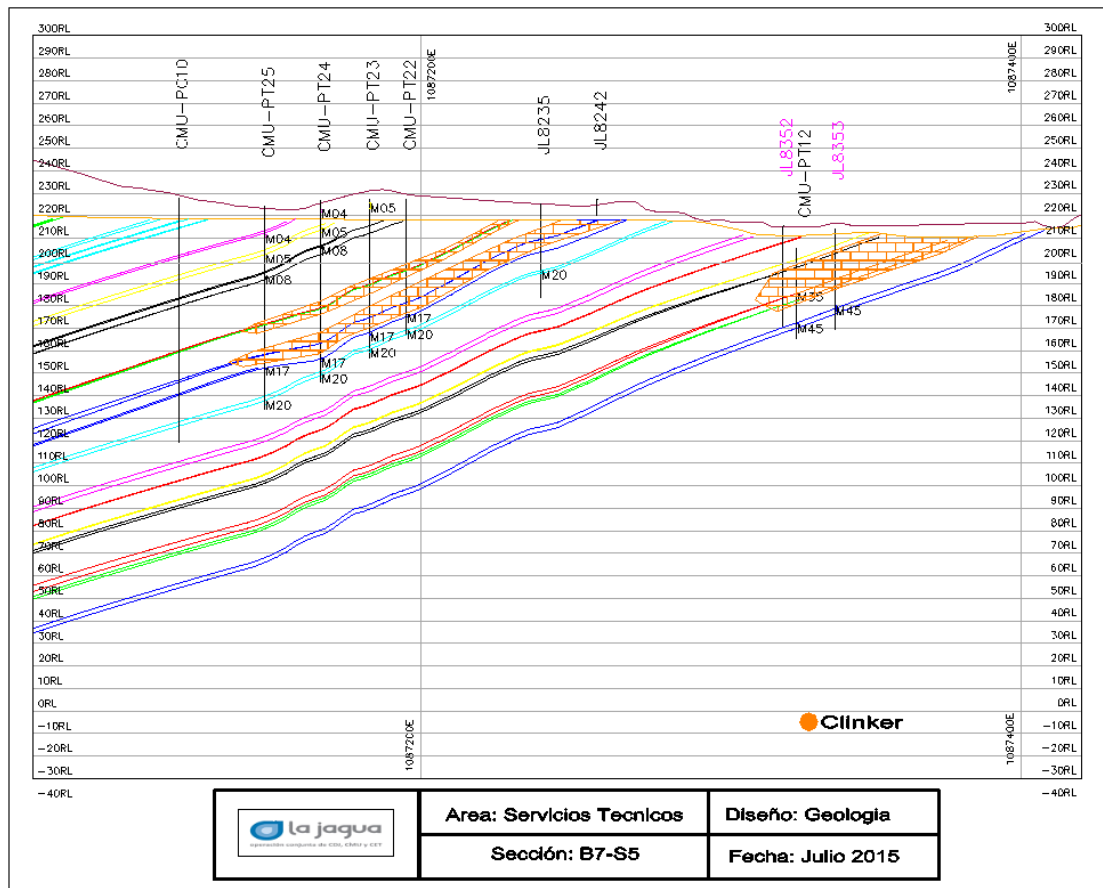
Sección B7-S2: En la sección se puede observar en color naranja el área que está siendo afectada por la auto combustión para este caso con los pozos JL8507, JL8505, JL8347 y JL8349 perforados durante el desarrollo de la práctica se observó que al momento de la perforación salió el ripio de tonos rojos lo cual indicaba que esta zona estaba afectada por auto combustión, en este perfil se encuentran afectados los mantos 28 y 30 hacia la parte oriental y un poco más hacia el occidente se va a tener la evidencia de auto combustión de los mantos 10, 11 y 15 (Figura 32).

Figura 32. Perfil geológico de la sección B7-S2, muestras áreas de Clinker en profundidad.



Sección B7-S5: los pozos JL8355, JL8352 y CMU-PT12 muestran la ausencia de los mantos 30, 35 y 40 los cuales se vieron afectados en su totalidad por procesos de auto combustión que se puede ver evidenciado por la presencia de Clinker al momento de la realización de la perforación, para el caso de los pozos JL8235, CMU-PT22, CMU-PT23, CMU-PT24, CMU-PT25, son pozos antiguos donde se marca una quema para los mantos 10, 11 y 15 (Figura 33).

Figura 33. Perfil geológico de la sección B7-S5, muestras áreas de Clinker en profundidad.



11.5 MODELAMIENTO 3D DE LOS MANTOS AFECTADOS POR LA AUTO COMBUSTION

Para la realización del modelo en 3D se utilizó el software minex el cual está diseñado específicamente para el carbón y otros depósitos estratificados, este software está elaborado para evaluar recursos con precisión, donde se exploten con eficiencia, permitiendo un mejoramiento en la productividad y rentabilidad de todo el ciclo de vida de la mina.

La mina La Jagua utiliza esta herramienta para un actualización continua del avance de la minería, para el objetivo de este proyecto se realizó un modelamiento

de los mantos que se encuentran afectados por la auto combustión, para esto se utilizaron los pozos registrados y los perfiles que se elaboraron a partir del software para cada sección de pozos con estas herramientas se llega a obtener una imagen en tres dimensiones de lo que sucede en profundidad con los mantos de carbón.

Con los perfiles realizados y demarcada el área con presencia de Clinker se puede elaborar el cálculo aproximado de las toneladas de carbón que no se encuentran debido a la auto combustión en dichos mantos, estos cálculos se realizan comparando el modelo sin ninguna afectación y de ahí se obtiene el cálculo de las toneladas normales que estarían apareciendo, luego se toma un modelo con las áreas de Clinker demarcadas y se procede a volver a calcular las toneladas de carbón pero esta vez ya demarcando los lugares donde no se va a encontrar carbón (Tabla 4), estos valores obtenidos en los dos modelos se les compara y el producto de la diferencia entre ellos va a mostrar las pérdidas de carbón que se dieron para la zona de la auto combustión (Tabla 5), a continuación se muestra una tabla donde se ven la cantidad de toneladas pérdidas para el flaco oriental de la mina la Jagua.

La imagen generada en 3D del área de auto combustión no pudo ser presentada en el libro debido a que es de manejo solo de la mina por lo tanto no se puede dar completo cumplimiento al objetivo (Generar un modelo en 3D para las zonas afectadas por la auto combustión).

Tabla 4. Datos de los espesores y toneladas obtenidas para la zona de auto combustión y para la zona en caso que no se presentara auto combustión.

MANTO	ZONA AUTO COMBUSTIÓN			ZONA SIN AUTO COMBUSTIÓN	
	CARBÓN			CARBÓN	
	TONELADAS (TON)	ESPESOR (m)	AREA	ESPESOR (m)	TONELADAS (TON)
M02U	51151	0,98	39987	2,42	126312
M10	187349	0,8	179743	1,20	281024
M11	93254	0,4	178143	0,63	146875
M15	860680	3,43	193080	5,54	1390136
M28	104842	0,32	248337	0,53	173645
M30	348438	1,06	252849	1,29	424042
M35	901525	2,56	270906	3,23	1137471
M40	554936	1,55	275330	2,04	730367

Tabla 5. Comparación de las toneladas obtenidas para poder determinar las toneladas totales que se perdieron producto de la auto combustión.

MANTO	ZONA AUTO COMBUSTIÓN	ZONA SIN AUTO COMBUSTIÓN	CARBON PERDIDO POR AUTO COMBUSTIÓN (TON)
	TONELADAS (TON)	TONELADAS (TON)	
M02U	51151	126312	75161
M10	187349	281024	93674
M11	93254	146875	53621
M15	860680	1390136	529456
M28	104842	173645	68803
M30	348438	424042	75604
M35	901525	1137471	235946
M40	554936	730367	175431
PERDIDAS TOTALES PRODUCTO DE LA AUTO COMBUSTIÓN			1307697

Se tiene que para la parte oriental de la mina donde se encuentran los mantos 2U, 10, 11, 15, 28, 30, 35 y 40 la pérdida de toneladas de carbón corresponde a 1`307.697 toneladas las cuales no serán recuperables producto a los eventos de auto combustión que se presentaron en la zona donde se enfatizó el estudio.

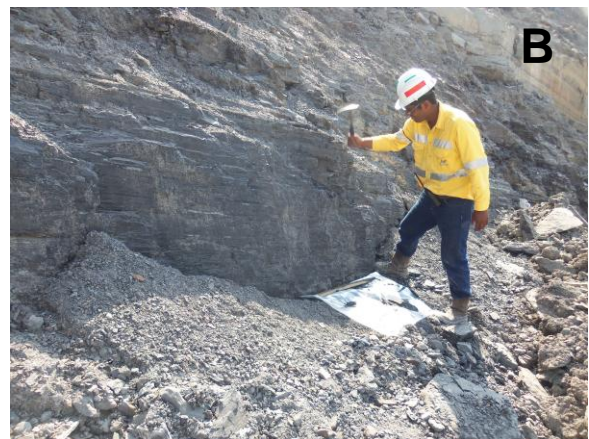
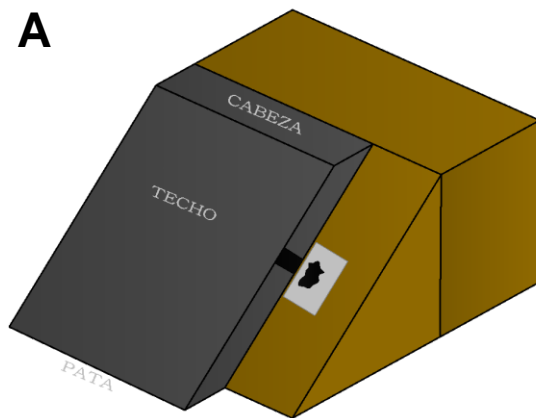
11.6 AFECTACIONES DE LA CALIDAD DEL CARBÓN A PARTIR DE MUESTREOS EN CANAL

La calidad del carbón en la mina la Jagua depende en gran medida de las practicas usadas al momento del minado del carbón, se tienen establecidas unas

series de parámetros para facilitar y afectar en menor medida la calidad del carbón insitu, los mantos que en su momento sufrieron procesos de auto combustión llegaron a verse afectados en su calidad debido a que al consumirse el carbón el residuo que deja es ceniza un factor determinante para aumentar los valores normales que se tienen de cada manto, también puede llegar a afectar mantos que se encuentren cercanos donde el interburden no es muy grueso, para este caso se pudieron realizar muestreos en un mantos donde se compararon con los valores normales que el presenta sin sufrir ninguna anomalía.

Para la realización de los muestreos se usó la técnica de muestro en canal son muestras de volumen de carbón triturado que incluyen el espesor total del manto tomado, de tal manera que cada uno de los mantos estén representados en igual proporción a su espesor. La muestra de canal se obtiene mediante un corte uniforme y continuo perpendicular a la estratificación (Figura 34 A,B).

Figura 34. Representación gráfica del muestreo en canal. A. esquema de cómo se debe tomar la muestra en canal. B. recolección de muestras en campo.



Con las muestras recolectadas en campo, se enviaron al laboratorio donde les realizaron una serie de análisis para determinar parámetros como lo son ceniza, poder calorífico, contenido de azufre, con estos análisis se controla la calidad de los carbones a medida que va avanzando la minería para poder detectar

anomalías las cuales pueden generarse por fallamiento, propias del carbón o para este caso por efectos dejados de la auto combustión en el mismo manto o mantos cercanos de carbón.

Los resultados obtenidos de los análisis fueron comparados con muestreos de el mismo manto el cual no ha sufrido ninguna anomalía para ver cómo se encuentra variando un resultado de otro y como se vería afectada la calidad de los carbones ante eventos como lo son los de la auto combustión.

El manto 2L es un manto con espesores aproximados de 0.43m, es un manto delgado lo cual lo hace más propenso a verse afectado por algún cambio cercano a él, este manto se encuentra infrayaciendo al manto 2U a estos manto los separa un interburden bastante delgado menor a un metro, la auto combustión sufrida por el manto 2U para el flanco oriental donde todo este manto fue consumido pero no alcanzo a afectar al manto 2L, de esta zona se realizó un muestreo en canal (Figura 35), donde se vio cómo afecta la calidad de este carbón por la auto-combustión del manto 2U (Tabla 6).

Figura 35. Muestra de canal para manto 2L, se ve el Clinker hacia la parte superior producto de la auto-combustión de 2U.



Tabla 6. Resultados de análisis realizados a el manto 2L.

	MANTO	NORMAL	AFECTADO
Ash, ar - %	2L	4.06	24.67
GCV, ar - Btu/lb		12821	6052
Ts, ar - %		2.88	1.02

Fuente: Autor

Figura 36. Resultados de comparación de ceniza en dos muestreos de manto 2L en condiciones normales y afectado con auto combustión.

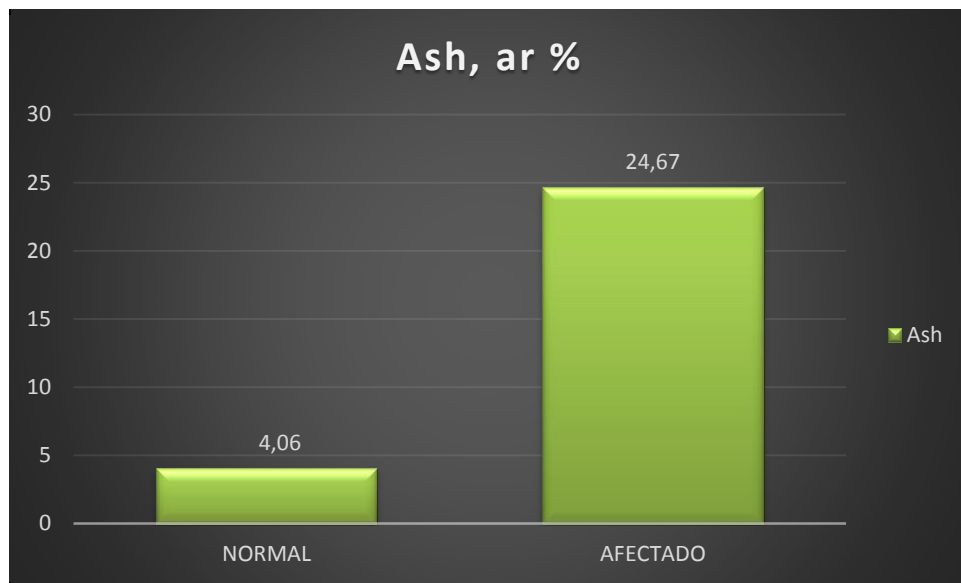


Figura 37. Resultados de comparación de poder calorífico en dos muestreos de manto 2L en condiciones normales y afectado con auto combustión.

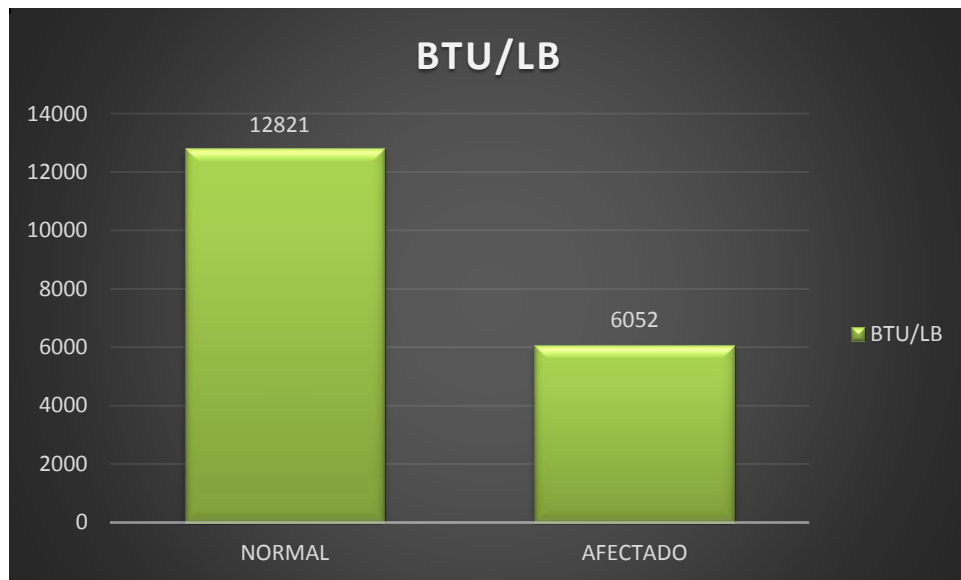
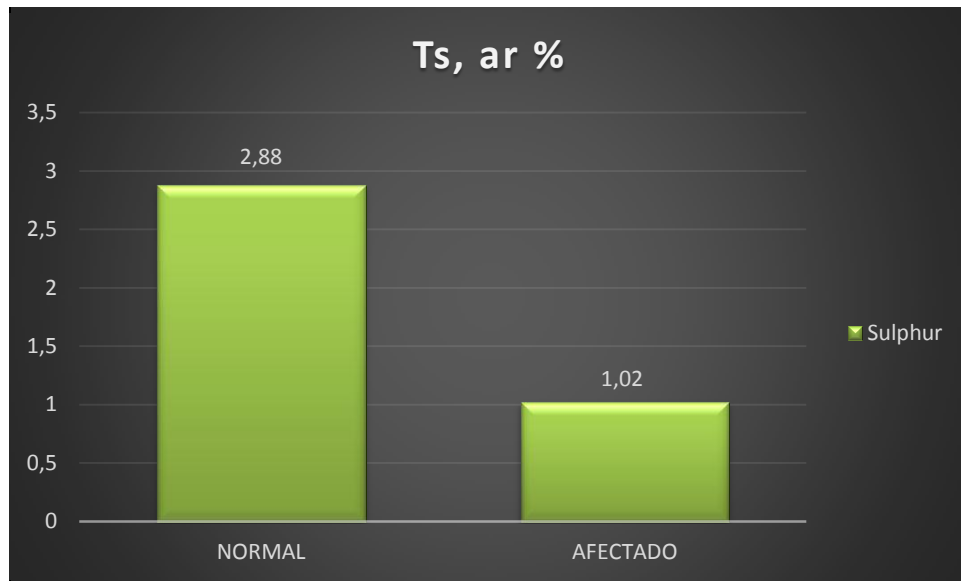


Figura 38. Resultados de comparación de sulfuros en dos muestreos de manto 2L en condiciones normales y afectado con auto combustión.



El resultado obtenido de ceniza (Ash) para manto 2L del contenido de ceniza de acuerdo a la figura 36 su valor aumenta considerablemente con respecto al valor normal que debería presentar está teniendo un incremento bastante considerable lo que afecta directamente la calidad del carbón, valores altos de ceniza afectan el poder calorífico de los carbones. Para el caso del poder calorífico (BTU/lb) (Figura 37) se puede evidenciar como el alto contenido de ceniza afecta el poder calorífico haciendo que este reduzca su valor a la mitad del valor normal que presenta el manto, este cambio daña la calidad del carbón haciendo que la energía que normalmente libera sea mucho menor. Los resultados mostrados para el contenido de sulfuros (Ts) (Figura 38) también se encuentra afectado haciendo que los valores de sulfuros disminuyan debido a que el calor produce la auto combustión pudo llegar a afectar al manto 2L permitiendo que la pirita entrara en reacción.

11.7 HIPÓTESIS DE LA COMBUSTIÓN ESPONTÁNEA EN LA MINA LA JAGUA

Existen diferentes factores que pueden llegar a incidir en la generación de fenómenos de auto combustión como los mencionados anteriormente (constituyentes del carbón, ceniza, sulfuros, yacimiento, tectónica, aire, minería, temperatura). Para lograr plantear una hipótesis de la combustión espontánea presentada en la mina la Jagua se recolectaron siete muestras (M05, M10, M11, M20, M35, M40, M45) entre las cuales se encontraban aquellos mantos los cuales sufrieron auto combustión, se realizaron pruebas para determinar el porcentaje de azufre total de cada uno de ellos (Tabla 7), donde se pudo evidenciar que los resultados de los mantos 05, 10, 11, 35, 40 y 45 coinciden aproximadamente con la tabla general de calidad de la mina la jagua (Tabla 3), estas variaciones pueden presentarse debido a que las muestras tomadas son muy puntuales mientras que los datos mostrados en la tabla de calidad son un promedio de muchos muestreos realizados, para el caso del manto 20 que muestra un valor muy alto a los datos reales posiblemente a la hora del muestreo y etiquetado de la muestra pudo presentar algún inconveniente y no corresponde a la muestra real; se tiene que los mantos que sufrieron auto combustión no presentan porcentajes de azufre altos solo el manto 11, si no que se encuentran dentro del rango de carbones con bajo contenido de azufre, para poder aportar a la creación de una hipótesis en la que la pirita ayude a acelerar dichos procesos se realizaron secciones pulidas para determinar cómo se está presentando la pirita en los carbones.

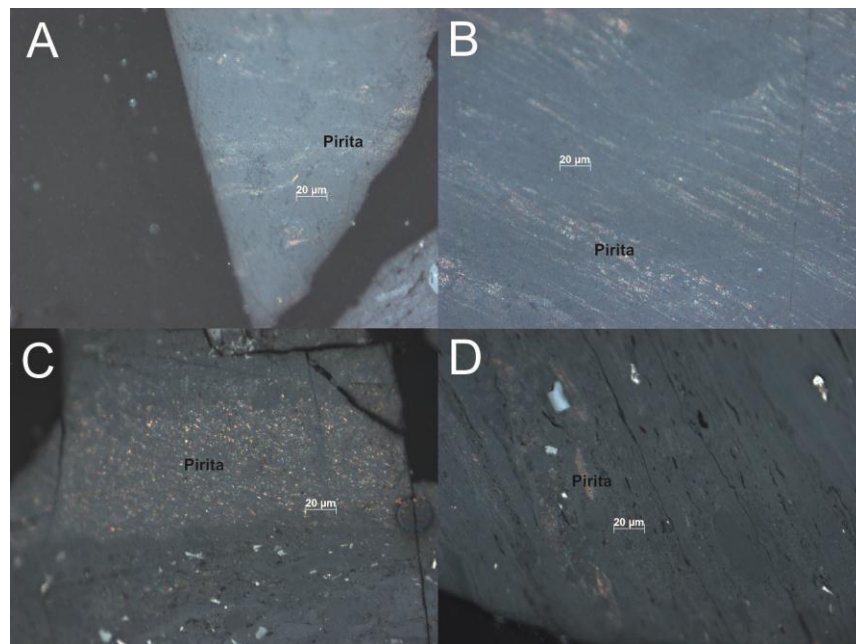
Tabla 7. Resultados obtenidos de azufre total de seis mantos diferentes de la mina la Jagua.

Muestra N°	Azufre Total (TS)
	Concentración % [p/p]
M05	0,5003
M10	0,8499
M11	2,1381
M20	5,7547
M35	0,8338
M40	0,6261
M45	0,6913

Fuente: Laboratorio de geoquímica del petróleo. Universidad Industrial de Santander, 2015.

A partir de los resultados obtenidos se realizaron unas secciones pulidas de muestras de carbón elaboradas con resina epoxica, las cuales luego de su elaboración fueron pulidas (Devastadora pulidora Phoenix Beta Buehler) para poder ser observadas al microscopio (Microscopio Triocular imager.Z2 Carl zeiss) donde se enfatizó en la pirita (FeS_2) diseminada la cual se oxida fácilmente ayudando a acelerar el calentamiento espontaneo (Beamish et all, 2012) (Deng et all, 2015), que puede ser un factor importante en los fenómenos de auto combustión para la mina la jagua, en las secciones realizadas muestran que la pirita se está presentando de forma diseminada dentro del carbón (figura 39) de manera abundante, dejando ver que este mineral puede estar influyendo en procesos de auto calentamiento para los carbones del depósito.

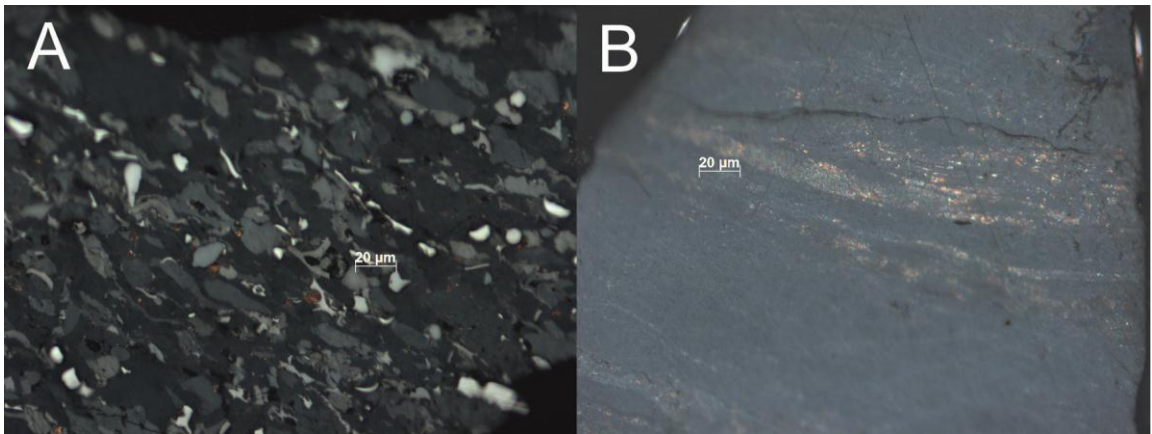
Figura 39. Secciones pulidas de mantos afectados por auto combustión. A. pirita diseminada de manto 5. B. abundante pirita diseminada presente en partes de manto 5. C. Franja amplia de pirita presente en el manto 10. D. pirita en proporciones menores diseminada por todo el manto 35.



Fuente: Microscopio Triocular imager.Z2 Carl zeiss. Laboratorio de geoquímica del petróleo. Universidad Industrial de Santander, 2015.

Dentro de las secciones pulidas se realizó una para el manto 45 (Figura 40A) el cual no se encontraba afectado por auto combustión y se pudo observar que este presenta escasa pirita diseminada en comparación con los otros mantos afectados (Figura 40B), lo que permite ver que posiblemente la pirita es un factor clave para el desarrollo de auto calentamiento en los carbones, debido a que el calor específico de la pirita es un tercio del calor específico del carbón, pero con la misma absorción de calor, la temperatura alcanzada por la pirita es tres veces más alta comparada con el carbón dejando ver que la presencia de pirita es un gran promotor para la combustión espontánea del carbón. (Deng et al, 2015).

Figura 40. Secciones pulidas. A. Manto 45 no se encuentra afectado por auto combustión y presenta escasa pirita diseminada. B. Manto 10 afectado por auto combustión con presencia de pirita diseminada.



Fuente: Microscopio Triocular imager.Z2 Carl zeiss. Laboratorio de geoquímica del petróleo. Universidad Industrial de Santander, 2015.

11.8 ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN PARA ZONAS AFECTADAS POR EVENTOS DE AUTO COMBUSTIÓN

La mitigación del fuego producto de la auto combustión de los carbones es muy variada y no presenta algún procedimiento estandarizado para su mitigación sin embargo existen diferentes métodos que cada empresa puede utilizar teniendo en

cuenta que muchos de ellos requieren de una cantidad considerable de recursos financieros puesto que se deben usar productos químicos para poder ahogar las llamas.

Es importante tener un control y seguimiento de la auto combustión durante la fase inicial del calentamiento (Quintero et al 2009), así como también se requiere una planificación previa para poder extinguirlos de manera eficiente y completamente segura (DOE/EH--0320, 1993), existen diversos productos usados para mitigar los fuegos generados por la auto combustión que buscan reducir la temperatura y la velocidad de reacción los cuales pueden variar desde cañones de agua, espuma de extinción de incendios, inyección de nitrógeno e inyección de dióxido de carbono (Landers and Usher, 20015), también se puede utilizar betún que sella temporalmente fisuras donde el aire puede penetrar y promover la combustión (Bell y Donnelly, 2002, 2006).

La mina la Jagua para la mitigación de fuegos producto de auto combustión utiliza una técnica que le funciona de manera positiva tanto para la operación como en la parte económica, consiste en aplicar chorros de agua de gran alcance que van a servir para eliminar cualquier área de asfixia de rocas sueltas, enfriar el carbón y las rocas cercanas facilitando así su posterior cargue, este procedimiento muestra efectos secundarios como lo son grandes cantidades de ceniza y vapor que puede generar molestia en los trabajadores que se encuentren laborando cerca del lugar, para evitar estos efectos secundarios cuando se realiza el proceso de mitigación para un área determinada se procura que no se tenga operación de maquinaria en el sitio mientras se lleva a cabo el procedimiento.

12. CONCLUSIONES

La presencia de pirita diseminada en los carbones permite proponer que este es un factor clave para la aceleración de los fenómenos de auto combustión presentes en la mina la Jagua.

Los fenómenos de auto combustión para el flanco oriental de la mina la Jagua donde se encontraron afectados los mantos 2U,10,11,15,28,30,35,40 fueron factibles debido a la exposición natural que pudieron tener los mantos así como también la presencia de pirita en cada uno de ellos la cual ayudo a acelerar los procesos de calentamiento de los mantos de carbón.

La calidad de los carbones de la mina la jagua se puede ver afectada directamente por la presencia de eventos de auto combustión, los cuales provocan una reacción negativa en los mantos haciendo que sus propiedades como la ceniza, poder calorífico y sulfuros se encuentren en valores no adecuados haciendo que la calidad se deteriore.

Los mantos afectados por auto combustión hacia la parte sur de la mina la Jagua se deben a las prácticas mineras de cámaras y pilares que fueron dejadas abandonadas, las cuales fueron el medio para generar un área de auto combustión.

Las pérdidas de carbón para el sector oriental de la mina la Jagua es de aproximadamente 1`307.697 toneladas de carbón.

El carbón de manto 5 tienen en sus propiedades petrográficas una tendencia a ser más susceptible a eventos relacionados con calentamiento que se desencadena generalmente en una reacción exotérmica de oxidación representada en la auto combustión.

BIBLIOGRAFIA

ANGOLA, Kenneth. Evaluación de autocombustión de carbón en mina paso diablo con fines de mitigación de impacto ambiental. Carbones del Guasare s.a., municipio Mara, estado Zulia. Trabajo de grado ingeniero de minas. Caracas: Universidad Central de Venezuela, 2005, pp. 246.

BEAMISH, B; Lin, Z; Beamish, R. Investigating the influence of reactive pyrite on coal self-heating. 12th Coal Operators' Conference and the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2012, pp. 294-299.

BELL, F.G., Donnelly, L.J. Mining and its Impact on the Environment. Taylor & Francis, Oxford, England, 2006, pp. 547.

CAE Mining, Mapping and analysis for: Slope Stability, Blast Design, Mine Design. 2014, pp. 4.

CANDELA, sol; Quintero, Jhon. Cartografía de las zonas de “clinker” en las áreas de minería de la mina el Cerrejón. Albania, Guajira. Trabajo de grado geólogo. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingeniería físico químicas. Escuela de geología, 2004, pp. 109.

CARBONES DEL CARIBE LTDA. Informe Final de Geología e Ingeniería Asociada.

COOPER, B.S; Murchison, D.G. Organic geochemistry of coal. Organic Geochemistry. Springer, Berlin Heidelberg New York. 1969, pp. 699–726.

CORONA, Rodolfo; Tritlla, Jordi; Benavides, Maria; Piedad, Noé; Ferrusquia, Ismael. Geología, estructura y composición de los principales yacimientos de carbón mineral en México. En: boletín de la sociedad geológica mexicana. 2006, Tomo LVII, pp. 141-160.

DE BOER; Dekkers; Hoof. Rock-magnetic properties of TRM carrying baked and molten rocks straddling burnt coal seams. Phys. Earth Planet. Inter. 126, 2001, pp. 93-108.

DENG, J; Ma, X; Zhang, Y; Li, Y; Zhu, W. Effects of pyrite on the spontaneous combustion of coal. En: Springer, 2015, pp. 6.

DOE/EH-0320. Fire Below: spontaneous combustion in coal. Environment safety and health bulletin, No. 93-4. U.S. Department of Energy, Washington, D.C, 1993, pp.5.

DRAKELEY, Thomas. The Influence of Iron Pyrites on the Oxidation of Coal. The Chemistry department, mining and technical College, Wigan. 1916, pp. 723-733.

HERNANDEZ, Marina. Geologia de la panca 48 la Jagua de Ibirico, Memoria explicativa. Instituto de investigación e información Geocientífica, Minero-Ambiental y Nuclear. INGEOMINAS. Ministerio de minas y energía. Colombia. 2003, pp. 103.

KAYMAKÇI, Erdogan; Didari, Vedat. Relations between coal properties and spontaneous combustion parameters. Turkish J. Eng. Env. Sci, 2002, pp. 59–64.

LANDERS, M; Usher, B. Management of spontaneous combustion for metalliferous mines. En: 10th ICARDIMWA, 2015, pp. 10.

LYMAN, Robert; Volker, John. Pyrophoricity (spontaneous combustion) of Powder River Basin coals: considerations for coalbed methane development. Wyoming State Geological Survey, 2001, pp. 1-12.

OZDENIZ, Hadi; Sivrikaya, Osman; Sensogut, Cem. Investigation of Spontaneous Combustion of Coal in Underground Coal Mining. En: Springer International Publishing Switzerland. 2014, pp. 637-644.

QUINTERO, J.A; Candela, S.A; Rios,C.A; Montes,C; Uribe, C. Spontaneous combustion of the Upper Paleocene Cerrejon Formation coal and generation of clinker in La Guajira Peninsula (Caribbean Region of Colombia). En: International Journal of Coal Geology, 2009, pp. 196-210.

SIROVISION. Open pit system. <http://sirovision.dataminesoftware.com/openpit/> (consultado el 10 de Junio de 20015)

STRACHER, Glenn; Prakash, Anupma; Sokol, Ellina. Coal and Peat Fires: A Global Perspective. Volume 1: Coal – Geology and Combustion. Elsevier, 2011, pp. 1-357.

THOMAS, Larry. Coal Geolog. Segunda edición. Blackwell Publishing, 2002, pp. 444.

VAN DER MERWE, H.C. Sirovision®: a proposed solution for the implementation of a digital geological mapping and modelling system at AngloGold Ashanti's Moab Khotsong Mine – interim report. AngloGold Ashanti Ltd., SA Division Geoscience Technical Offic. 2009, pp. 10.

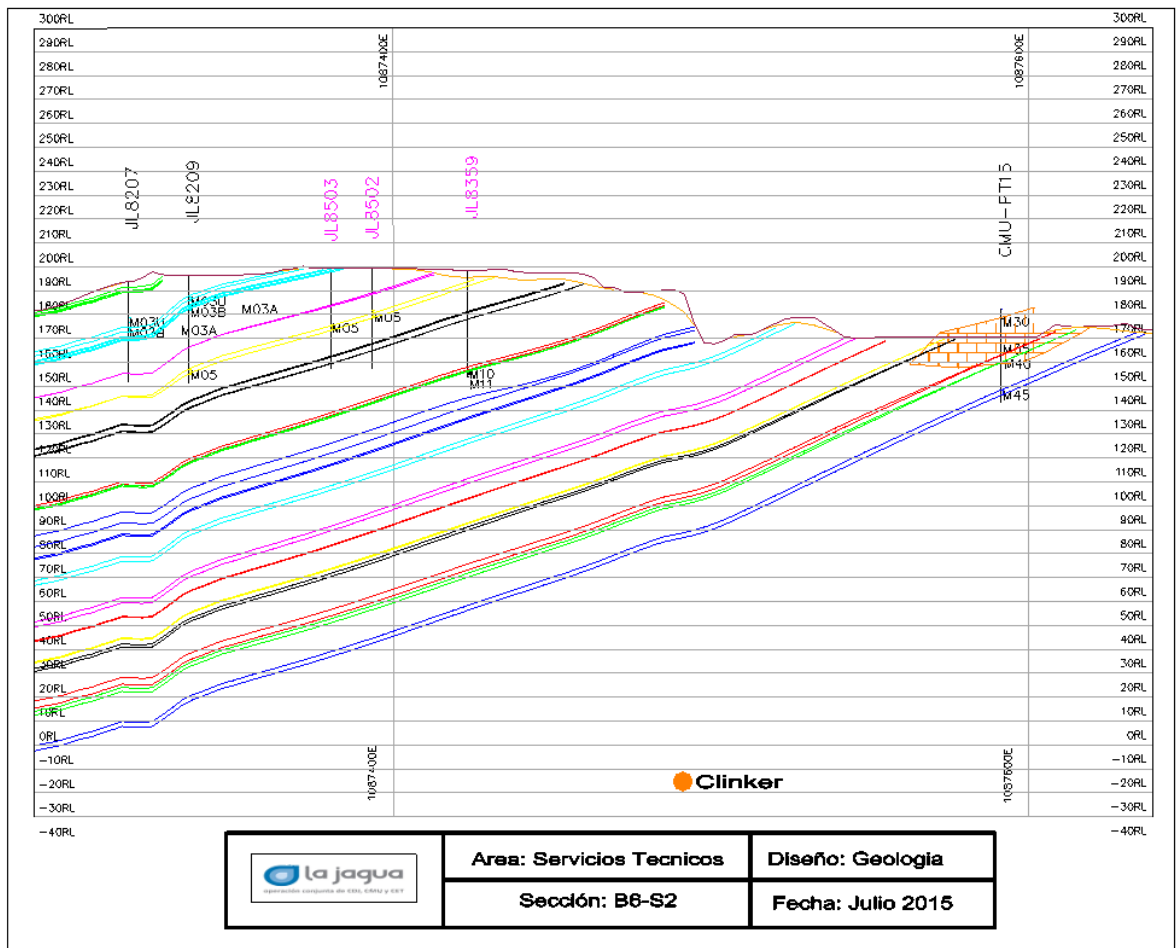
VAN KREVELEN, D.W. Geochemistry of coal. En: Breger, Primera edicion, Organic Geochemistry. Pergamon Press, Oxford. 1963, pp. 183–247.

VAN VUUREN. Guidelines for the Prevention of Spontaneous Combustion of Coal During Storage and Transport, Report No. ES9307. Ministry of Minerals and Energy Affairs. Pretoria, South Africa, 1995, pp. 55.

ANEXOS

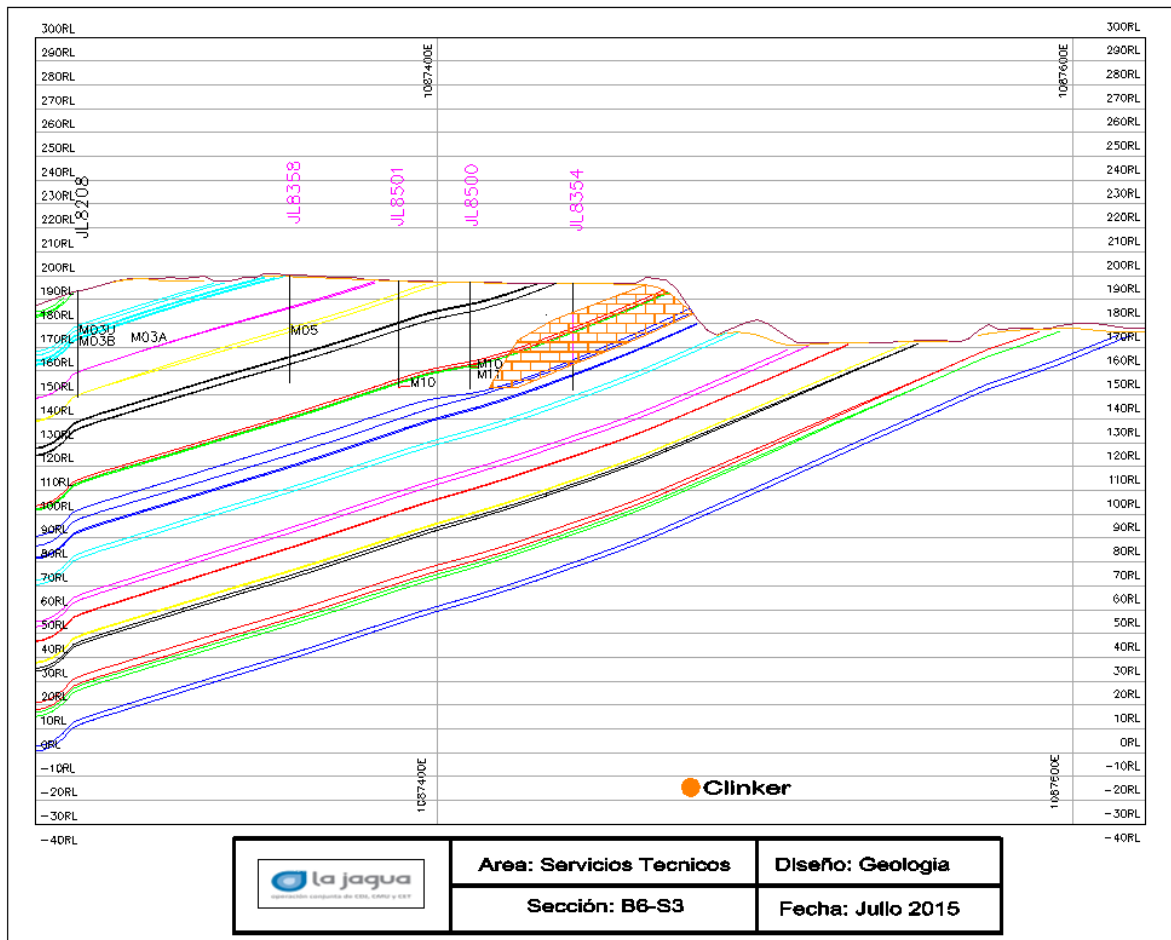
Anexo A

Sección B6-S2



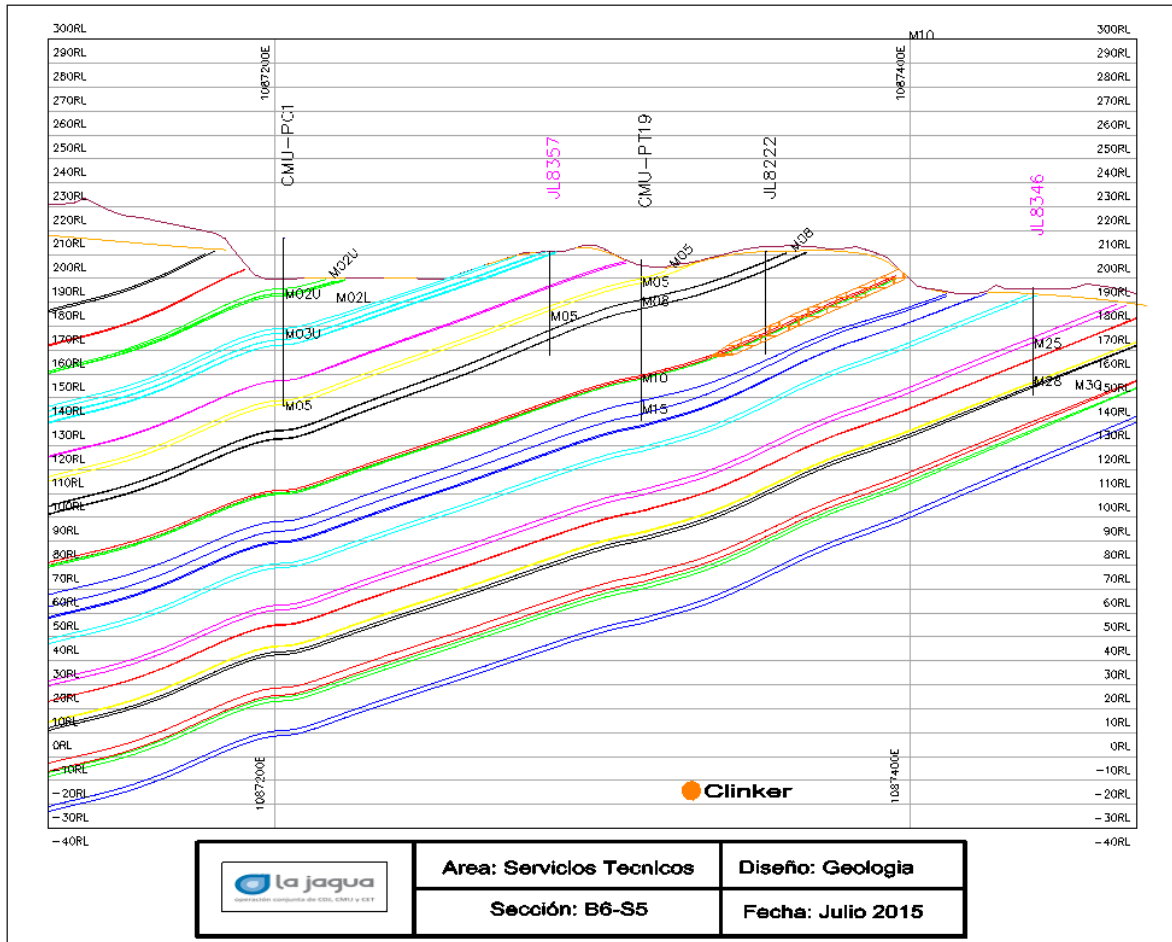
Anexo B

Sección B6-S3



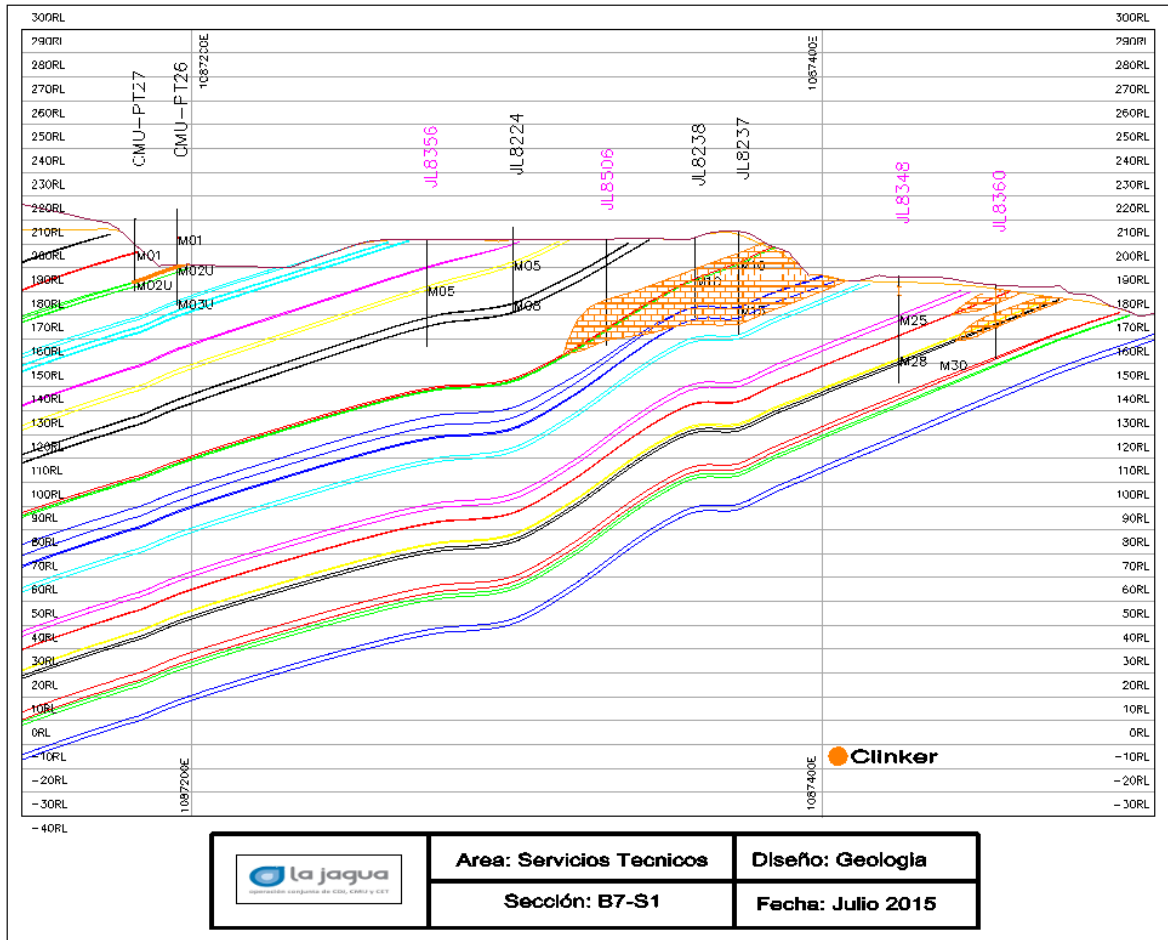
Anexo C

Sección B6-S5



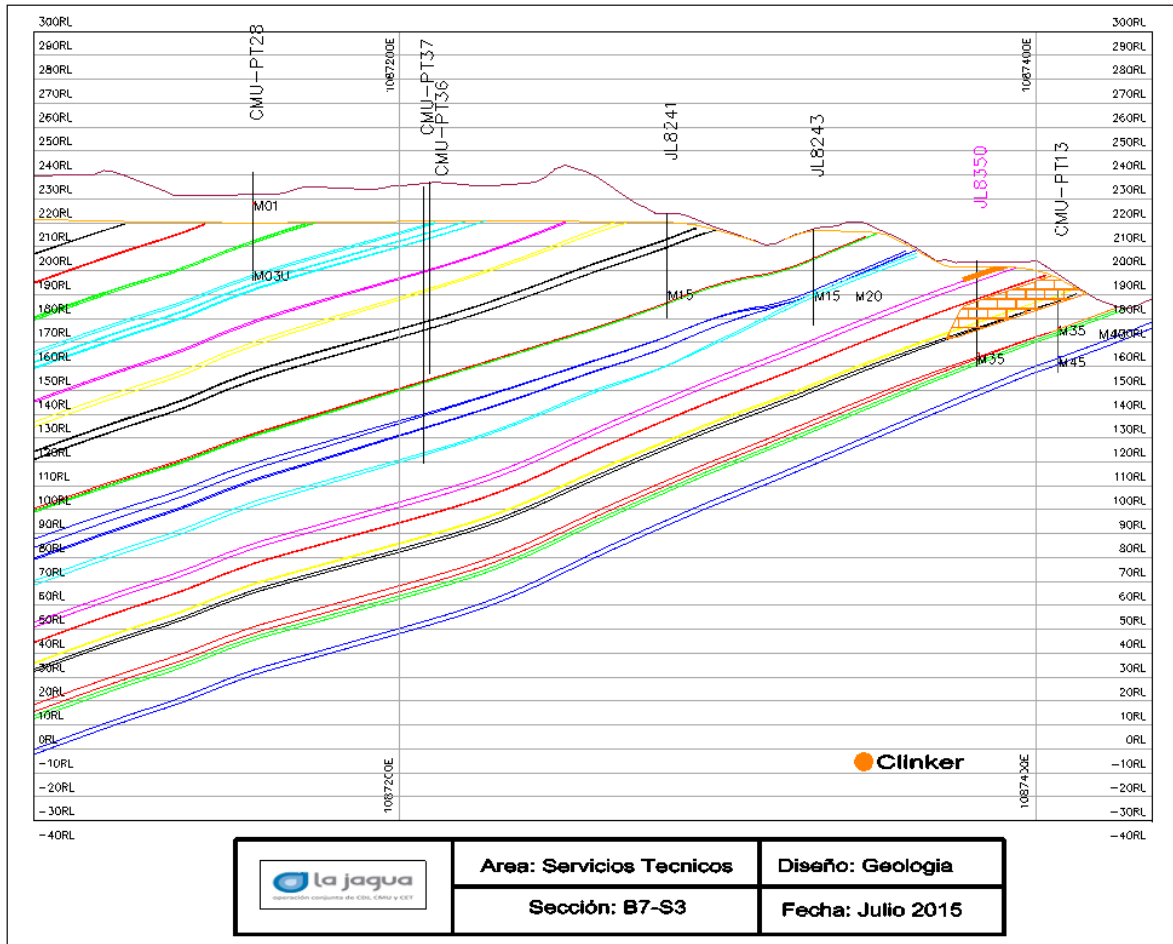
Anexo D

Sección B7-S1



Anexo E

Sección B7-S3



Anexo F

Sección B7-S4

