



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales
Licenciatura en Ingeniería en Geología Ambiental

**CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE
LOS MANTOS DE CARBÓN DE SAN JAVIER Y
TECORIPA, SONORA, MÉXICO.**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO GEÓLOGO AMBIENTAL

PRESENTA:

NADIA LIZBETH VITE HERNÁNDEZ

DIRECTORES:

DR. KINARDO FLORES CASTRO (UAEH)
ING. JOSÉ LUIS MUÑOZ GARCÍA (IMMSA)

MARZO 2018



Mineral de la Reforma, Hgo., a 27 de febrero de 2018

Número de control: ICBI-D/219/2018
 Asunto: Autorización de tesis

M. EN C. JULIO CÉSAR LEINES MEDÉCIGO
DIRECTOR DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

Por este conducto le comunico que el Jurado asignado a la pasante de la Licenciatura en Ingeniería en Geología Ambiental: **Nadia Lizbeth Vite Hernández**, quien presenta el trabajo de **“Caracterización fisicoquímica de los mantos de carbón de San Javier y Tecoripa, Sonora, México”**, después de revisar el trabajo ha decidido autorizar la impresión del mismo, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación se anotan las firmas de conformidad de los integrantes del Jurado:

- PRESIDENTE: Dr. Carlos Esquivel Macías
- PRIMER VOCAL: Dr. Kinardo Flores Castro
- SEGUNDO VOCAL: Ing. José Luis Muñoz García
- TERCER VOCAL: Dr. Fidel Pérez Moreno
- SECRETARIO: Dr. Enrique Cruz Chávez
- PRIMER SUPLENTE: Dr. Màrius Ramírez Cardona
- SEGUNDO SUPLENTE: Dr. Edgar Misael Uribe Alcántara

Sin otro particular, le reitero a usted la seguridad de mi atenta consideración.

Atentamente
 “Amor, Orden y Progreso”

 Dr. Oscar Rodolfo Salazar Castillo
 Director del ICBI



Ciudad del Conocimiento
 Carretera Pachuca - Tulancingo km. 4.5
 Colonia Carboneras
 Mineral de la Reforma, Hidalgo, México, C.P. 42184
 Tel. +52 771 7172000 exts 2231, Fax 2109
 direccion_icbi@uaeh.edu.mx



www.uaeh.edu.mx

Mineral de la Reforma, Hidalgo, a 8 de Febrero del 2018.
Asunto: Certificado de Originalidad

CERTIFICADO DE DIRECTORES DE TESIS

Los Catedráticos abajo firmantes certificamos que la tesis intitulada: “*Caracterización fisicoquímica de los mantos de carbón de San Javier y Tecoripa, Sonora, México*”, presentada por la C. **Nadia Lizbeth Vite Hernández**, ha sido realizada durante su estancia en el periodo Enero-Junio del 2017 en el Laboratorio de Industrial Minera México - Unidad Nueva Rosita, Coahuila; bajo nuestra dirección. Además, se informa que este trabajo es original y no forma parte de otra tesis o trabajo previo.

Dr. Kinardo Flores Castro
Profesor – Investigador Titular C
Centro de Investigaciones en Ciencias de la
Tierra y Materiales
Laboratorio de Geoquímica
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo



Ing. José Luis Muñoz García
Jefe de laboratorio
Industrial Minera México S.A. de C.V



Dedicatoria

A Dios, por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido soporte y compañía durante toda mi preparación profesional.

A mis padres, por levantarme después de cada tropiezo y por motivar mi empeño durante todo mi estudio.

A mis hermanas por estar siempre a mi lado, viviendo unidas los buenos y malos momentos.

Agradecimientos

Este trabajo de tesis realizado en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo es resultado del esfuerzo de muchas personas que enseñando, corrigiendo, opinando y llenando de entusiasmo, caminaron conmigo durante el proceso.

A Industrial Minera México S.A. de C.V. por recibirme como practicante, permitiendo la realización del proyecto y por todo el apoyo otorgado durante mi estancia.

A mis directores de tesis, doctor Kinardo Flores Castro y el ingeniero José Luis Muñoz García por su apoyo incondicional, en donde su amistad, experiencia y conocimiento han sido fuente de inspiración para mi crecimiento profesional.

A mis asesores de tesis, por tomar el compromiso de apoyarme y confiar en mí. Gracias por su paciencia, el tiempo concedido y las contribuciones vertidas en esta investigación.

Al ingeniero Ramiro Alarcón, la maestra Aurora Rodríguez Monreal y el doctor Rogelio Monreal Saavedra por sus enseñanzas y atenciones.

Por apoyarme arduamente durante mi proceso de aprendizaje, pero más aún, por las pláticas, los consejos, la atención y la amistad; mi agradecimiento más sincero a los compañeros de laboratorio, estén donde estén, se llenen de bendiciones.

A mis amigos, por escalar este peldaño juntos y permitirme aprender más de la vida a su lado.

A ti, por coincidir en el camino y empezar a recorrerlo juntos.

Todo esto fue posible gracias al amparo y el amor que me brindan mis padres, quienes entendieron mis ausencias y mis malos momentos; que a pesar de la distancia siempre estuvieron a mi lado y me mantuvieron firme durante todo el proceso. Sabiendo que no existen palabras suficientes para dar testimonio de mi amor y eterno agradecimiento, concluyo diciendo que este logro es también suyo.

A todos ustedes mi mayor reconocimiento y gratitud.

ÍNDICE

Página

Resumen.....	viii
Abstract.....	ix
CAPÍTULO 1	1
1.1. Introducción	1
1.2. Justificación	3
1.3. Objetivo general.....	3
1.3.1. Objetivos específicos	3
CAPÍTULO 2	4
2.1. Antecedentes	4
2.2. Marco Teórico.....	7
2.2.1. Origen y madurez del carbón.....	7
2.2.1.1. Fase bioquímica	7
2.2.1.2. Fase geoquímica	9
CAPÍTULO 3	13
3.1. Geología Regional	13
3.2. Geología Local.....	18
3.3. Localización y vías de acceso.....	22
CAPÍTULO 4	24
4.1. Método	24
4.1.1. Tipología de los yacimientos de carbón	24
4.1.2. Desarrollo experimental.....	26
4.1.2.1. Trabajo de campo.....	26
4.1.2.2. Trabajo de laboratorio.....	30
4.1.2.2.1.Preparación de muestras de carbón.....	30
4.1.2.2.2.Análisis del carbón:	32
a) Determinación de la humedad	32
b) Determinación de cenizas.....	34

c) Determinación de materia volátil.....	37
d) Determinación de azufre.....	39
e) Determinación de poder calorífico	40
f) Determinación del índice de hinchamiento libre de carbón.....	41
d) Rango de madurez del carbón	42
CAPÍTULO 5	44
5.1. Resultados.....	44
5.2. Discusión	47
CAPÍTULO 6	49
6.1. Conclusiones.....	49
6.2. Recomendaciones	50
GLOSARIO	51
REFERENCIAS	56

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Medida microscópica de la reflectancia relativa de macerales de vitrinita (Ro) en comparación con el contenido de carbono fijo, materia volátil, humedad y generación de gas/aceite.....	9
Figura 2. Clasificación de carbones por rango de madurez con base en la norma ASTM D- 388.....	11
Figura 3. Muestras de carbón en sus diferentes rangos de madurez.....	12
Figura 4. Mapa geológico del área de estudio.....	17
Figura 5. Detalle de las impresiones de helechos triásicos en una muestra de roca encajonante.....	21
Figura 6. Panorámica de la región periférica de la mina El Rosario, Municipio San Javier, Sonora, México.....	22
Figura 7. Localización geográfica del área de estudio y la vía de acceso principal.....	23
Figura 8. Muestreo en canal de mantos de carbón.....	27
Figura 9. A: Entrada de la mina El Rosario. B: Ademado del acceso principal de la mina El Rosario. C: Reconocimiento de la litología dentro de la mina El Rosario.....	27
Figura 10. Observación, descripción y muestreo de los mantos de carbón en interior de la mina El Rosario.....	28
Figura 11. Sección detallada del carbón en los mantos de la mina Pizarrines (escala gráfica martillo).....	29
Figura 12. Manto de carbón rango antracita y muestras en lote.....	29
Figura 13. Proceso de preparación de muestras en sus diferentes fases.....	31
Figura 14. Horno de secado con muestras en charolas previamente identificadas...	33
Figura 15. A: Ingreso de las muestras para el análisis de cenizas. B: Crisoles de porcelana y sílice. C: Mufla eléctrica.....	35
Figura 16. A: Ingreso de muestras para el análisis de materia volátil. B: Mufla	

	eléctrica. C: Crisoles de cromo-níquel con tapa.....	38
Figura 17.	A: Proceso de análisis de azufre. B: Equipo ELTRA CS 500. C: Crisoles de combustión.....	40
Figura 18.	A: Monitoreo del análisis de poder calorífico. B: Equipo Leco AC 500.	41
Figura 19.	A: Horno programado. B: Tabla de referencia para determinar el tamaño de botón.....	42

ÍNDICE DE TABLAS

		Página
Tabla 1.	Ubicación de las obras mineras localizadas en el área de estudio.....	44
Tabla 2.	Resultados de los análisis de las muestras de carbón.....	45
Tabla 3.	Clasificación de rango con base en los valores de Carbono Fijo Materia Volátil y Poder Calorífico.....	46

Resumen

El proceso de industrialización nacional ha estado vinculado al carbón mineral, anteriormente se utilizó como combustible para el funcionamiento de los ferrocarriles y en la actualidad su importancia estriba como materia prima para su transformación en coque metalúrgico. El carbón antracítico explotado en la región carbonífera San Javier-San Marcial de la Cuenca Barranca, Sonora se lleva a cabo por ejidatarios locales y juega un papel muy importante dentro de la economía en los municipios de San Javier, La Colorada y Soyopa. Este trabajo de investigación centra su atención en el estudio del carbón antracítico con base en sus características fisicoquímicas para determinar aplicaciones industriales que proporcionen al carbón antracítico un valor agregado. Se realizó un muestreo de mineral de mena directamente en los mantos de carbón y se aplicaron técnicas analíticas para determinar: la humedad (H_2O), cantidad de carbono fijo (CF), contenido de cenizas (C), contenido de azufre (S), poder calorífico (PC), materia volátil (MV) y el índice de hinchamiento libre del carbón (FSI, por sus siglas en inglés); esto con base en el sistema de clasificación de carbón de la *American Society for Testing and Materials*. Los resultados de 18 muestras cuantificadas arrojaron que solo el 50% de ellas se encuentran con características propias de antracita, mientras que el resto de las muestras se clasifican como meta-antracita. Los parámetros que fundamentan la clasificación de las muestras como meta-antracita son: alto porcentaje de carbono fijo ($> 98\%$), bajo porcentaje de materia volátil ($< 1.50\%$) y poder calorífico muy elevado (> 9500 BTU/Lb). Con base en lo anterior, se concluye que las minas con carbón en rango meta-antracita pueden incursionar en otros mercados comerciales; por ejemplo, en la industria siderúrgica como aditivo en mezclas con carbón metalúrgico para la producción de coque. Además, este estudio determinó cuantitativamente la baja concentración de volátiles en las muestras de carbón ($< 6\%$), lo que se traduce en un bajo riesgo de explosividad dentro de las obras mineras.

Abstract

The process of national industrialization has been linked to mineral coal, previously used as fuel for the operation of railways, and nowadays it's important as raw material that is transformed into metallurgical coke. The exploited anthracite coal in the San Javier-San Marcial coal region of the Barranca Basin, Sonora, is carried out by local ejidatarios and plays a very important role in the economy of the municipalities of San Javier, La Colorada and Soyopa. This research work focuses on the study of anthracite coal based on its physicochemical characteristics to determine industrial applications that provide anthracite carbon with added value. Mineral ore was sampled directly in the coal beds, and analytical techniques were applied to determine: humidity (H₂O), amount of fixed carbon (CF), ash content (C), sulfur content (S), calorific value (PC), volatile matter (MV) and the free swelling index of coal; this is based on the coal classification system of the American Society for Testing and Materials. The results of 18 quantified samples showed that only 50% of them have anthracite characteristics, while the rest of the samples are classified as meta-anthracite. The parameters that serve as base for the classification of the samples as meta-anthracite are: high percentage of fixed carbon (> 98%), low percentage of volatile matter (<1.50%), and very high calorific value (> 9500 BTU / Lb). Based on the above, it is concluded that coal mines in the meta-anthracite range may enter other commercial markets; for example, in the steel industry as an additive in mixtures with metallurgical coal for the production of coke. In addition, this study quantitatively determined the low concentration of volatiles in the carbon samples (< 6%), which translates into a low risk explosive within the mining works.

CAPÍTULO 1

1.1. Introducción

Desde finales del siglo XIX la extracción de carbón antracítico y grafito ha sido una actividad económica importante para diversos poblados asentados en la porción centro-este del estado de Sonora, convirtiéndose en objeto de estudio de índole geológico, estructural y paleontológico (Ruiz y Saucedo, 2016). La mayoría de los estudios previos en esta región han estado enfocados al estudio de las secuencias estratigráficas triásicas que contienen los mantos de carbón (Alencáster, 1961).

Asimismo, el carbón representa en nuestros días una fuente de energía fiable y juega un papel muy importante dentro del sustento energético del país, considerándose un candidato idóneo para el remplazo del petróleo, por tratarse de un recurso más abundante y de amplia distribución geográfica, aventajando a largo plazo a otros combustibles no renovables competitivos (Sánchez, 1995).

La industria del carbón en México es fundamental en la generación de empleos, inversiones y de electricidad a bajo costo, aunque dentro del mercado mundial no se consolida como competente ante países como China, Japón y Canadá. La producción nacional de carbón en 2013 fue de 33.3 millones de toneladas; Coahuila, preponderantemente, es el principal productor de carbón en México, aunque Sonora también ha registrado producción, ésta no ha alcanzado un dígito porcentual. El volumen de la producción nacional de carbón depende directamente de la demanda, se estima que el 39.12% de la producción es de carbón térmico (una tercera parte la generan los pequeños productores) y el 60.87% es de carbón coquizable. Los pequeños productores destinan su producción para la generación de energía eléctrica (carbón térmico); mientras que, los grandes productores, además de proveer a las plantas carboeléctricas, también extraen para su autoconsumo en sus procesos metalúrgicos (carbón coquizable), ya que son subsidiarias de empresas siderúrgicas. Así el principal mercado para los pequeños productores está representado por la industria carboeléctrica, no obstante de la industria siderúrgica, cuyas

empresas cuentan con minas de carbón propias para su autoconsumo y para venta. Aquellas empresas siderúrgicas que no cuentan con recursos propios de carbón realizan contratos con las grandes empresas productoras de carbón por razones de seguridad de abasto y calidad (Coordinación General de Minería, 2014).

El carbón antracítico se extrae en minas artesanales y se comercializa en bruto a plantas carboeléctricas; pagándose por volumen y no por calidad. Con base en determinaciones basadas en la norma ASTM D388 (2017) se sabe que la antracita posee un alto poder calorífico y contenido de carbono fijo, además de bajo contenido de materia volátil; sin embargo, se desconocen otros parámetros que en conjunto definen el rango del carbón. Analizar carbón antracítico permite conocer su competencia ante otros mercados, y con ello, sugiere su aplicación en industrias distintas a la producción de energía eléctrica.

El análisis de los distintos estudios enfocados al Distrito Minero de San Javier y Tecoripa permite concluir que la información proporcionada se basa en aspectos geológicos, paleontológicos, estratigráficos y estructurales. Por lo anterior, este trabajo centra su atención en el estudio del carbón antracítico generando datos únicos y sin precedentes desde un enfoque fisicoquímico, proporcionando las bases para futuras investigaciones de interés químico e industrial.

1.2. Justificación

Considerando los antecedentes mencionados, es fundamental conocer las propiedades fisicoquímicas del carbón para definir las alternativas de uso y sugerir aplicaciones industriales, de modo que se identifiquen las impurezas que posee y se estimen las características que alberga; por lo tanto, brinda los elementos necesarios para una planeación eficaz en el uso del carbón y proporciona un panorama general del tratamiento a efectuar con la finalidad de elevar el potencial industrial y económico del carbón.

1.3. Objetivo general

Caracterizar fisicoquímicamente el carbón de los mantos del Distrito Minero de San Javier y Tecoripa en Sonora para determinar sus posibles usos y aplicaciones.

1.3.1. Objetivos específicos

- Analizar muestras de carbón procedentes de distintas minas de la región de San Javier–Tecoripa del estado de Sonora mediante técnicas analíticas normalizadas por ASTM para determinar sus características.
- Cuantificar el contenido de materia volátil en muestras de carbón para estimar el riesgo de explosión en las minas.

CAPÍTULO 2

2.1. Antecedentes

En México se han cubicado reservas de carbón de importancia económica, siendo las más importantes hasta ahora y las únicas en explotación, las comprendidas en las regiones de Piedras Negras, Sabinas y Nueva Rosita en el estado de Coahuila, donde se han reconocido principalmente dos cuencas carboníferas: la primera en la región de Sabinas, con carbón tipo bituminoso de medio a elevado contenido de volátiles y además de tipo coquizable, reservado para satisfacer las necesidades de la industria siderúrgica de la zona; y la segunda región en la cuenca Fuente - Río Escondido, con carbón de tipo sub-bituminoso de alto volátil C, considerado como no coquizable, pero con características adecuadas para ser utilizado en la generación de energía eléctrica por su alto poder calorífico. La existencia de carbón en la región de Sabinas, específicamente en el área de San Felipe El Hondo, se conoce desde 1850; sin embargo, fue hasta la época del Porfiriato en que se crearon las condiciones para su explotación (Durán y Chairez, 1993).

Por otra parte, los yacimientos de Oaxaca corresponden a carbón semi-antracítico y en Sonora a carbón antracítico, ambas regiones con una estructura muy compleja que dificulta su explotación (Salas y Benavides, 1976; Flores, 1988). Los yacimientos de carbón en México se encuentran asociados a rocas de los periodos Triásico Superior – Jurásico Medio en los estados de Sonora y Oaxaca, y también se verifican en cuencas cretácicas de Coahuila, Chihuahua y Sonora, así como otras más jóvenes del Terciario en los estados de Nuevo León, Tamaulipas (Flores, 1988) e Hidalgo (Alexandri, 1954).

En la región carbonífera de Sonora, el primer reporte de rocas con mantos de carbón fue hecho por Rémond de Corbineau en 1866 (en Burckhardt, 1930), quien realizó el primer reporte sobre dichas rocas y sus depósitos de carbón. También reportó la presencia de numerosas plantas fósiles contenidas en las rocas.

En cuanto a Dumble (1900), fue el primero en agrupar estas rocas desde el punto de vista estratigráfico y designó el nombre de “División Barranca” a una secuencia de areniscas y lutitas con estratos de carbón y grafito que afloran en las inmediaciones del Rancho La Barranca, localizada al sureste del poblado de San Javier.

No obstante, King (1939) definió esta secuencia sedimentaria como una unidad litoestratigráfica, denominándola Formación Barranca; identificando otras localidades de afloramiento en la región como Sierra de Cobachi, Sierra de Tecoripa, Sierra de las Moradillas, y otras más.

Además, Wilson y Rocha (1949) y Ávila de Santiago (1960) cartografiaron partes del área y reportan esta Formación, dividiéndola en 3 partes, donde la inferior y la superior son secuencias detríticas gruesas, mientras que la porción media la caracterizan como una alternancia de areniscas y lutitas, que incluía lutitas carbonosas además de los mantos de carbón.

Fue Alencáster (1961) quien con base en estudios geológico-paleontológicos de la Sierra de San Javier elevó el rango de esta unidad, denominándola Grupo Barranca, nomenclatura que hasta la actualidad se sigue utilizando en la bibliografía geológica de Sonora; este mismo autor designa una edad triásica para esta unidad. El Grupo Barranca está actualmente constituido por las formaciones Arrayanes en la base (*partim* Formación Barranca); Santa Clara en la porción media, la cual contiene los mantos de carbón (*partim* Formación Barranca) y Coyotes en la cima (*partim* Formación Barranca). Alencáster describió la estratigrafía regional del Grupo Barranca utilizando la Sierra de San Javier como el área de referencia principal. Los afloramientos mejor estudiados del Grupo Barranca se encuentran en la Sierra de San Javier que incluye el rancho La Barranca homónimo del grupo, además de las localidades topográficas y culturales por las cuales las formaciones Arrayanes, Santa Clara y Coyotes fueron nombradas.

Adicionalmente se tienen algunos trabajos relacionados con las características paleontológicas y descripciones de flora y fauna en la Formación Santa Clara, entre los que

destacan Silva-Pineda (1961), Weber (1980, 1985), y Weber *et al.* (1980) en las áreas de Moradillas, San Marcial, Buenavista, Barranca y Santa Clara, destacando en términos generales que las coníferas *sensu stricto* no están muy diversificadas en la taoflora de la Formación Santa Clara pero se encuentran frecuentes en la región.

También parte del Grupo Barranca en la Sierra San Javier fue descrito por Potter y Cojan (1985), mientras que la estratigrafía y arreglo estructural de la Sierra de San Javier, y la localidad adyacente Sierra El Aliso han sido descritas por Soto y Navarro (1987), Barrera y Domínguez (1987), Radelli *et al.* (1987) y Bartolini (1988).

Por su parte, Stewart y Roldán (1991) estimaron un espesor de 3000 metros para el Grupo Barranca en una investigación donde estudiaron la estratigrafía, proveniencia tectónica y los ambientes de depósito. Recientemente, Corona-Esquivel *et al.* 2006 hacen un compendio general de la geología, estructura y composición de los principales yacimientos de carbón en México, incluyendo los depósitos del Grupo Barranca en Sonora; de igual importancia, Montijo (2007) estudió el grafito contenido en la Formación Santa Clara en las inmediaciones del poblado de San José de Moradillas en minas como La Lourdes y La Cumbre.

De manera complementaria, Flores *et al.* 2016 abordan el tema de la determinación composicional de la materia orgánica con base en la identificación de compuestos orgánicos que forman parte de la fracción extractable (bitumen) de la antracita, a través de un proceso de extracción secuencial por reflujo continuo termoregulado, encontrando valores de hasta 4% de materiales volátiles predominando el vapor de agua muy por encima del metano.

2.2. Marco Teórico

2.2.1. Origen y madurez del carbón

El carbón es una roca sedimentaria de origen orgánico (organógena), formado principalmente por restos de materia orgánica vegetal depositada en zonas pantanosas. El grado de carbonificación de la roca dependerá de la acción de parámetros fundamentales como la presión, temperatura y tiempo a los cuales fue sometida la materia orgánica, y además definirá usos y aplicaciones industriales. Se denomina carbogénesis al proceso de transformación por el cual se origina el carbón a partir de sustancias vegetales, fundamentalmente plantas superiores y en menor grado organismos inferiores como algas, esporas y polen. Este proceso consta de dos etapas principales, el estado bioquímico que determina el tipo de carbón y la fase geoquímica o metamórfica que condiciona el rango del carbón (Cortes, 2001).

2.2.1.1. Fase bioquímica

Los compuestos vegetales de los que procede el carbón deben haber sido preservados de las destrucciones totales oxidativas y microbianas, por esa razón se postula que la carbogénesis ocurrió en zonas pantanosas, donde el agua saturó los depósitos vegetales, limitando el oxígeno e inhibiendo la acción de los microorganismos que producen la putrefacción (biodegradación). El proceso de descomposición de los compuestos vegetales depende del medio en el que se desarrolla con base en tres factores: el contenido de nutrientes para bacterias y hongos, el oxígeno y el pH. Existen múltiples teorías que explican la formación de macerales en función de estos parámetros, entendiendo como macerales a los constituyentes del carbón en su fracción orgánica con tamaños que oscilan de entre dos micras hasta varios centímetros. Se consideran en general tres grupos de macerales del carbón: grupo huminita-vitrinita, grupo liptinita y grupo inertinita. El primer grupo es el maceral mayoritario en los carbones existentes (>80%), siendo responsable de las propiedades de coquizado del carbón y procede principalmente de plantas superiores; presenta una densidad, reflectancia y contenido en carbono e hidrógeno intermedios en

comparación con los demás grupos, además tiene comparativamente mayor cantidad de oxígeno el cual disminuirá al aumentar el rango del carbón. Los componentes de este grupo maceral cambiarán de nombre al cambiar el rango, por lo que en los lignitos se denominarán “grupo huminita” mientras que en los carbones bituminosos y antracíticos “grupo vitrinita”. El segundo grupo aparece en menor proporción que el grupo anterior y procede de partes resinosas y ceras de las plantas, algas y bacterias; es un grupo rico en hidrógeno y materia volátil y pobre en carbono, además presenta una densidad y reflectancia muy bajas. Finalmente, el tercer grupo es el componente más escaso en los carbones y es prácticamente inerte a lo largo de los procesos de carbonización; está conformado por tejidos de plantas superiores en distintos estados de compactación o fractura, además de fragmentos de material amorfo gelificado, alterado por procesos bioquímicos con escaso contenido en hidrógeno, pero es muy rico en carbono, con máxima reflectividad y densidad.

Los distintos grupos macerales se definen atendiendo a las características ópticas observables con un microscopio petrográfico (normalmente de luz reflejada), en donde se describen a partir de su forma, color, reflectancia, dureza, relieve de pulido, entre otras características. Una de las propiedades más importantes en el estudio de macerales es la reflectancia con base en la norma ASTM D7708, que se define como el porcentaje de luz que refleja una superficie plana y pulida bajo determinadas condiciones de iluminación y está relacionada directamente con la aromaticidad de los componentes orgánicos del carbón, por lo tanto, la reflectancia incrementa a medida que aumenta el grado de evolución del carbón. Para una muestra de carbón determinada, los macerales del grupo liptinita se observarán más oscuros (menor reflectancia), los macerales del grupo inertinita serán los más claros (mayor reflectancia) y los macerales del grupo vitrinita poseen un color gris intermedio. Esta diferencia de color disminuirá conforme aumente el grado de evolución del carbón.

A continuación se muestra la relación entre algunos parámetros fisicoquímicos y el grado de reflectancia (R_o), con respecto al rango del carbón (Figura 1). Se observa que los valores de carbono fijo y de reflectancia aumentan conforme incrementa el rango del

carbón, es decir, son mayores al tratarse de carbón antracítico; por el contrario, los valores de materia volátil y humedad disminuyen ante el incremento de madurez del carbón.

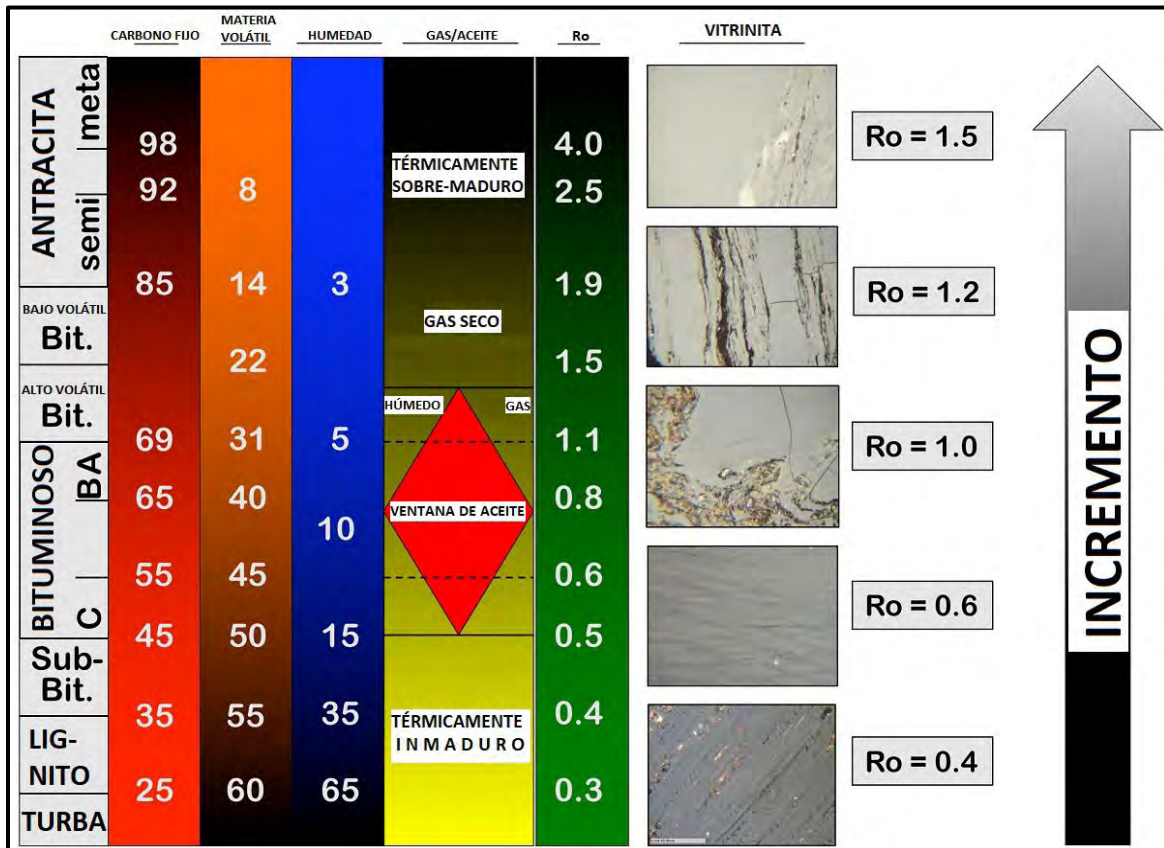


Figura 1. Medida microscópica de la reflectancia relativa de macerales de vitrinita (R_o) en comparación con el contenido de carbono fijo, materia volátil, humedad y generación de gas/aceite. (Cortland Eble, basada en datos de ASTM, Stach *et al.*, 1992 y Bustin *et al.*, 1985).

2.2.1.2. Fase geoquímica

El estadio geoquímico determina el rango del carbón, a través de una lenta transformación de la materia orgánica a distintas profundidades, sometida a condiciones de temperatura y presión cambiantes. Estas condiciones determinarán el grado de carbonificación o metamorfismo de un carbón, transformando su estructura y composición, dando como resultado varias clases de carbón (Kabe *et al.*, 2004; Speight, 1994). El más antiguo y el más puro es la antracita, cuyo contenido de carbono fijo es del orden de 86 a 98% y menos

de 14% de materia volátil; le sigue el carbón bituminoso con 69 a 86% de carbono fijo, contenido de materia volátil entre 14 y 31%, y con límites de 8300 a 11500 Btu/lb de poder calorífico; el lignito, con 50 a 69% de contenido de carbono fijo, entre 40 y 50% de materia volátil y con límites de 6300 a 8300 Btu/lb de poder calorífico (Durán y Chairez, 1993).

El sistema de clasificación de carbón más utilizado es el de la ASTM (Norma D-388) en donde se ordenan por rangos en cuatro clases principales: lignito, sub-bituminoso, bituminoso y antracítico, siendo este el orden en que se incrementa el grado de madurez del carbón; estas categorías indican intervalos de características físicas y químicas que son útiles en la estimación del comportamiento del carbón en la minería, así como en la preparación y usos. El rango se realiza con base en los contenidos de carbono fijo y materia volátil en base seca y libre de materia mineral; y para los carbones de menor rango el poder calorífico en base húmeda y libre de materia mineral (Kabe *et al.*, 2004). Mediante el análisis de estas propiedades se logra definir el rango del carbón.

El proceso de carbonificación afecta determinadas propiedades del carbón (Figura 2), siendo los más evidentes al aumentar el rango: el incremento del contenido de carbono y el poder calorífico (con una pequeña disminución para los carbones de muy alto rango); además, la disminución en el contenido de volátiles y de oxígeno. El proceso natural de transformación confiere la propiedad de aglomerar únicamente al carbón en rango bituminoso, aunque no todos los carbones bituminosos forman coque por el método convencional y no todos los carbones coquizables cuentan con la firmeza necesaria o masa celular propia de un coque metalúrgico.

Clase	Límites de Carbono fijo (%m, bslmm)		Límites de Materia volátil (%m, bslmm)		Límites de Poder calorífico (%m - BTU/lb, bhlmm)		Carácter aglomerante
	Igual o mayor que	Menor que	Igual o mayor que	Menor que	Igual o mayor que	Menor que	
Antracíticos							
Meta-antracita	98	—	—	2	—	—	No aglomerante
Antracita	92	98	2	8	—	—	
Semi-antracita	86	92	8	14	—	—	
Bituminosos							
Bituminoso bajo volátil	78	86	14	22	—	—	Comúnmente aglomerante
Bituminoso medio volátil	69	78	22	31	—	—	
Bituminoso alto volátil A	—	69	31	—	14000		
Bituminoso alto volátil B	—	—	—	—	13000	14000	
Bituminoso alto volátil C	—	—	—	—	11500	13000	
Sub-bituminosos							
Sub-bituminoso A	—	—	—	—	10500	11500	No aglomerante
Sub-bituminoso B	—	—	—	—	9500	10500	
Sub-bituminoso C	—	—	—	—	8300	9500	
Lignitos							
Lignito A	—	—	—	—	6300	8300	No aglomerante
Lignito B	—	—	—	—	—	6300	

Figura 2. Clasificación de carbones por rango (%m: Porcentaje en masa, bslmm: Base seca libre de materia mineral, bhlmm: Base húmeda libre de materia mineral) (ASTM D-388,2005).

Químicamente el carbón incluye en su estructura carbono, hidrógeno, oxígeno, así como pequeñas cantidades de azufre y nitrógeno; contiene además, dióxido de carbono y metano; compuestos aceitosos como alquitrán y brea, que a su vez contienen amoníaco, tolueno, naftas y creosotas (Diessel, 1986, 1992; Philp, 1994; Clayton, 1998; Chen y Ma, 2002; Wilkins y George, 2002). Con respecto a las características físicas del carbón en sus diferentes rangos se observa la carencia de brillo en carbones de bajo rango (lignito y sub-bituminoso), mientras que en rango medio (bituminoso) y alto (antracítico) presenta lustre

metálico (Figura 3). Adicionalmente, la compactación del carbón se ve favorecida al aumentar su madurez.



Figura 3. Muestras de carbón en sus diferentes rangos de madurez (Recuperada de Petrografía de Carbón <https://petrografiicarbon.es/>)

La antracita es el carbón mineral de más alto rango con concentraciones de carbón más grandes por unidad de volumen (>95%), se origina por un proceso de transformación de materiales orgánicos por migración paulatina a temperaturas moderadas y alta presión en turbas y carbones, gracias a la des-hidrogenación incompleta. Es de color negro y brillante, el más denso y duro de los carbones. Se usa fundamentalmente para obtener energía eléctrica en centrales térmicas de carbón, aunque también tiene otros usos menores como la fabricación de micrófonos, fabricación de gomas sintéticas, colorantes, aditivos de coque, etc.

CAPÍTULO 3

3.1. Geología Regional

Dentro de la porción centro-este del estado de Sonora afloran una serie de secuencias sedimentarias, volcano-sedimentarias e ígneas, cuyas edades varían entre el Paleozoico y el Cuaternario. Esta variedad litológica es producto de una serie de eventos tectónicos y de sedimentación que han edificado la geología de esta porción del estado. Bartolini *et al.* (1989) reportan rocas del Ordovícico, Devónico, Misissípico - Pensilvánico y del Pérmico en la sierra El Aliso, ubicada al oeste y noroeste de poblado de San Antonio Huerta y es en esta localidad donde se encuentran los principales afloramientos de una secuencia sedimentaria paleozoica. Las rocas ordovícicas consisten en una secuencia detrítica de lutitas con graptolitos, areniscas y areniscas de cuarzo en la base, en la parte media areniscas de cuarzo resistente, sobreyacida por lutitas con graptolitos, caliza, arenisca y pedernal; mientras que en la cima se encuentra una alternancia de estratos delgados de caliza, lutita y pedernal. Por otro lado, las rocas del Devónico consisten en arenisca y caliza turbidítica en la base, sobreyacidas por pedernal con radiolarios, finalmente, las rocas del Misissípico y del Pensilvánico consisten en una alternancia de estratos delgados de caliza localmente turbidítica con bioclastos, y de un conglomerado con pedernal. Finalmente la secuencia pérmica consiste en un afloramiento de caliza turbidítica con fusulínidos del Wolfcampaniano (Ruiz y Saucedo, 2016).

En la porción oeste y centro-este de la región de interés aflora una secuencia sedimentaria triásica (Dumble, 1900; King, 1939; Wilson y Rocha, 1949) denominada Grupo Barranca (Alencáster, 1961; Stewart y Roldán-Quintana, 1991), dentro de la cual se tienen los yacimientos de carbón, en grado antracita, estudiados en este trabajo. El Grupo Barranca está constituido por tres formaciones, que de la base a la cima son: Formación Arrayanes, Formación Santa Clara y Formación Coyotes.

La Formación Arrayanes consiste en una alternancia de areniscas de cuarzo y conglomerado polimíctico con intercalaciones de capas delgadas de lutita. Las areniscas

son de grano medio a grueso, de color gris a gris pardo en superficie fresca y pardo rojizo en superficie de intemperismo, con granos sub-angulosos a sub-redondeados medianamente clasificados de cuarzo y en menor cantidad de feldespatos, así como estratos de conglomerado de matriz arenosa rojiza, con clastos de cuarcita y pedernal. Las lutitas son de color rojizo, deleznable, con estratificación delgada a mediana y muy físciles. (Alencáster, 1961).

La Formación Santa Clara en San Javier está compuesta de intercalaciones de limolitas, lutitas, areniscas, conglomerados, lutitas carbonosas y carbón. Dos tipos de secuencias deposicionales son reconocibles: Una secuencia de grano fino consistente en lutitas, limolitas y areniscas, y una secuencia de grano grueso consistente en areniscas, limolitas, conglomerados, lutitas carbonosas y carbón. Estas secuencias deposicionales principales generalmente se presentan en megasecuencias de 100 a 300 metros de espesor, pasando gradualmente de la secuencia de grano fino en la base a la secuencia de grano grueso en la cima (Stewart y Roldán-Quintana, 1991). Pequeñas capas de tobas se encuentran en la parte superior de la Formación Santa Clara a lo largo del camino principal a 2 kilómetros al sur de San Javier, estas tobas consisten de fragmentos angulares de cuarzo en una matriz de ceniza.

La Formación Coyotes está constituida por una secuencia detrítica de grano grueso dominada por conglomerados de clastos angulosos a sub-redondeados de cuarcita y pedernal, en una matriz arenosa. Los conglomerados polimícticos presentan un color de intemperismo pardo rojizo a amarillento y gris oscuro en superficie fresca. Intercaladas a esta secuencia, se encuentran capas de areniscas y lutitas de color gris amarillento al intemperismo, en estratos delgados a medianos, además de areniscas con alto contenido en cuarzo (Servicio Geológico Mexicano, 2004).

A finales del Mesozoico en el NW de México se desarrolla un arco magmático continental, producto de la subducción de la placa farallón bajo Norteamérica conocido también como “Arco Laramide”, que en la región se representa por una serie de intrusiones de composición granodiorítica que se tienen afectando a las rocas pre-terciarias, incluyendo

su cobertura volcánica andesítico-dacítica. (Ruiz y Saucedo, 2016). Los afloramientos más ampliamente distribuidos en la porción central y centro-este corresponden a una secuencia volcano-sedimentaria del Cretácico Superior, originalmente nombrada como Formación Tarahumara por Wilson y Rocha (1949). Esta unidad consiste en tobas andesíticas hacia la base, intercaladas con capas de areniscas líticas y limolita, así como con aglomerados y brechas volcánicas; en la porción media, presenta un miembro sedimentario dominado por areniscas volcánicas y calizas lacustres con pedernal y restos de madera fósil. La cima de esta secuencia corresponde con flujos andesíticos a dacíticos muy alterados que son coronados por tobas riolíticas con pómez (McDowell *et al.*, 2001). La Formación Tarahumara forma parte del magmatismo del denominado “Arco Laramide” el cual representa los últimos productos de la subducción mencionada anteriormente entre el Cretácico tardío y Eoceno.

A lo largo de toda la región se tienen afloramientos de una serie de batolitos, *stocks* y apófisis de rocas intrusivas de composición intermedia a félsica, que forman parte de la actividad magmática relacionada al desarrollo y evolución del arco Laramide, informalmente denominado como Complejo Intrusivo Inferior. Como parte de esta actividad intrusiva también se incluyen dentro de la región *stocks* y apófisis de rocas hipabisales (porfídicas) de composición andesítica a riolítica, cuyas edades van hasta el Eoceno – Oligoceno, y que son denominadas como Complejo Intrusivo Superior. Bajo este régimen, la Formación Báucarit representa el relleno sedimentario de estas cuencas extensionales, y dentro del área estudiada está representada por una secuencia detrítica conformada por conglomerados polimícticos con clastos mal clasificados, sub-angulosos a sub-redondeados de andesita, toba, granito, cuarcita y pedernal principalmente, en una matriz arenosa gruesa de color pardo claro. Adicionalmente presenta intercalaciones de areniscas líticas de grano grueso, tobas félsicas y basaltos o andesitas basálticas. Los afloramientos más importantes de esta unidad se tienen en el valle que define el Río Yaqui en el límite oriental de la región estudiada (Ruiz y Saucedo, 2016). Roldán y McDowell (1992) ubican a la Formación Báucarit en el Mioceno Inferior a Medio con edades de 20.2 y 14.1 Ma, respectivamente.

Para finales del Mioceno ocurre una reactivación de la extensión y el vulcanismo, provocando un basculamiento de las rocas del relleno sedimentario (Ferrari *et al.*, 2005; Henry y Aranda-Gómez, 2000). Durante ese evento extensional se genera una actividad volcánica compuesta principalmente por riolita y tobas riolíticas de color gris claro a rosado y pardo-rojizo, de estructura compacta y tobácea (Bartolini *et al.*, 1991). La unidad sedimentaria Neógena caracteriza secuencias detríticas de sedimentos gruesos, gravas y arenas, presentándose como relleno de valles. Por otro lado, el aluvión cuaternario se encuentra cubriendo los cauces de ríos y arroyos, conformado principalmente de grava, arena, limo y arcilla, provenientes de la erosión de rocas pre-existentes. Estos materiales sufren un proceso de transporte fluvial y se deposita sobre los cauces de los ríos y en las planicies de inundación (Ruiz y Saucedo, 2016).

Geología del Distrito Minero de San Javier - Tecoripa, Sonora.

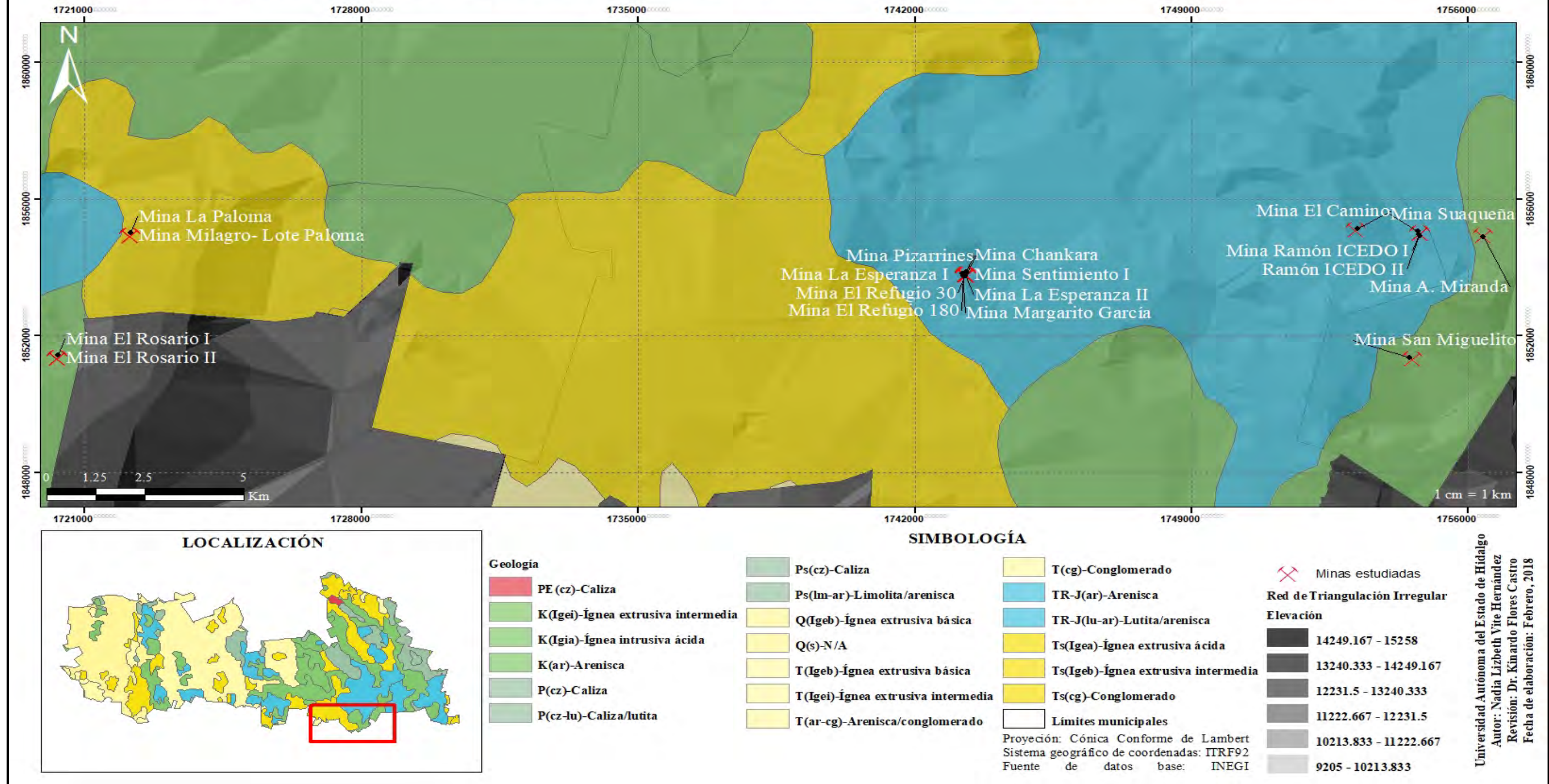


Figura 4. Mapa geológico del área de estudio.

3.2. Geología Local

Los aspectos geológicos del área, objeto de estudio, se centran en el Grupo Barranca del Triásico – Jurásico, que consiste en secuencias detríticas de origen fluvial que corresponden a la Formación Arrayanes, transicional marino-continental de la Formación Santa Clara y aluvial de la Formación Coyotes. Las rocas sedimentarias del Grupo Barranca se encuentran distribuidas en una franja orientada Este-Oeste en la parte central de Sonora, aproximadamente al norte de la coordenada 28° 25' y al sur de la coordenada 28° 56', en donde se encuentran los principales yacimientos, que incluyen minas de antracita y grafito (Hernández, 2012). Los afloramientos más extensos y expuestos se localizan en el área de Santa Clara, estimándose que conjuntamente conforman un espesor superior a los 3,000 metros (Stewart y Roldán-Quintana, 1991). El Grupo Barranca se encuentra en discordancia por medio de una brecha con la Formación Tarahumara del Cretácico Superior (Adabie, 1981; Vassallo, 1985).

La Formación Arrayanes aflora en una banda orientada Este-Oeste en la parte norte de la localidad de San Javier. Stewart y Roldán-Quintana (1991) definen tres miembros dentro de la Formación Arrayanes en la localidad de San Javier. Los miembros inferior y superior consisten en areniscas de diferentes tonos de grises de grano fino a medio con clastos subangulares a subredondeados de cuarzo y cantidades menores de feldespatos pobre a moderadamente clasificados. Localmente se observan capas gruesas de areniscas o conglomerados; los conglomerados contienen clastos de dimensiones superiores a los 14 centímetros de areniscas de cuarzo color gris y marrón, pedernal, cuarzo lechoso y pedernal rojo. Las capas de areniscas tienen un espesor entre 1 y 15 metros, de las cuales la gran mayoría son masivas y contienen solamente laminaciones internas poco definidas, mientras que otras tienen granulometría más fina hacia la cima con estratificación cruzada y laminar. Dentro de las areniscas se encuentran intercalaciones de limolitas gris verdosas que ocurren en capas muy delgadas con espesores locales de hasta 20 metros. Estas limolitas son físciles en algunos afloramientos y localmente contienen restos de plantas. El miembro medio de la Formación Arrayanes aflora en la parte oriental de la Sierra de San Javier y consiste de limolitas e intercalaciones menores de areniscas rojas que cambian lateralmente hacia el

oeste. El evidente color rojo y la predominancia de limolitas contrastan marcadamente con la litología de los otros dos miembros; estas limolitas comúnmente presentan capas lenticulares de areniscas de grano fino a medio que no presentan estratificación interna. Algunas de estas areniscas tienen una gradación de grano normal, además de presentar clastos de cuarcitas y pedernal con una estratificación interna poco definida. El contacto entre la Formación Arrayanes y la Formación Santa Clara según Stewart y Roldán-Quintana (1991) está marcado por un cambio general de secuencias de areniscas en la base y secuencias de limolitas-lutitas hacia la cima, aparentemente gradacional alrededor de unos 100 metros. El ambiente de depósito de la Formación Arrayanes se considera de tipo fluvial debido al gran número de paleocanales presentes (Stewart y Roldán-Quintana, 1991; Montijo-Contreras, 2007). Dentro del área de San Marcial, Antuna-Ibarra (2002) reporta un adelgazamiento del Grupo Barranca, donde no se observan afloramientos de la Formación Arrayanes; sin embargo, no descarta la posibilidad de encontrarla a profundidad (Hernández, 2012).

La Formación Santa Clara aflora en una banda irregular a través de la Sierra de San Javier al sur de los afloramientos de la Formación Arrayanes (Stewart y Roldán-Quintana, 1991). Los mejores afloramientos se encuentran en los cortes de carretera entre el kilómetro 2 y 3 al sur de San Javier y entre los kilómetros 3,4 y 5 al sureste del Rancho la Barranca (Hernández, 2012). Wilson y Rocha (1949) realizaron un levantamiento incompleto de una sección de la Formación Santa Clara en el Distrito Santa Clara midiendo 370 metros. Por otro lado, Stewart y Roldán-Quintana (1991) basados en secciones generalizadas estimaron un espesor aproximado de poco más de 1,400 metros. El contacto entre esta unidad y la Formación Coyotes fue observado a detalle en una sola localidad por Stewart y Roldán-Quintana (1991) como un pequeño afloramiento a 600 metros al sur de San Javier. Se observó una relación angular de alrededor de 10°, apoyando lo inferido por Radelli *et al.* (1987) quien menciona que el contacto entre la Formación Santa Clara y la Formación Coyotes es una discordancia angular. El ambiente de depósito de la Formación Santa Clara ha sido difícil de entender y se ha interpretado de diferente manera. Se acepta que el ambiente de depósito de esta formación es, con base al contenido de flora y fauna fósil (Alencáster, 1961; Silva-Pineda, 1961; Weber, 1980 y 1985; Weber *et al.*, 1980) de tipo

transicional marino-terrestre con un clima tropical. Un estudio detallado de petrografía (Cojan y Potter, 1991), considera a la Formación Santa Clara como producto de un ambiente palustre que muy posiblemente estuvo restringido a una gran cuenca formada por cuencas más pequeñas, alimentadas por ríos que desembocaban hacia el sur y que registraron pequeñas transiciones marinas. La lutita de la Formación Santa Clara en el área de estudio suele presentar capas con impresiones de diversas especies de helechos, acompañada de lutita carbonosa rica en materia orgánica y de alta fisilidad (Figura 5). La investigación de los fósiles vegetales de la Formación Santa Clara inició en 1973 por Weber, con un viaje de reconocimiento a las áreas de Moradillas, San Marcial, Buenavista, Barranca y Santa Clara. Los ejemplares en esta zona presentan aspectos muy diversos, debido principalmente en la variación en el proceso de fosilización y morfológicamente coinciden en los siguientes caracteres: las hojas son aciculares, lineales o angostamente lanceoladas a elípticas, agudas u obtusas y tienen base fuertemente constricta con pecíolo casi imperceptible. Su filotaxia es helicoidal pero aparenta distiquia. La longitud máxima de las hojas se desconoce, más posiblemente alcanzaron 10 centímetros y la anchura máxima es de 5 milímetros cerca de la base. En términos generales, las coníferas *sensu stricto* no están muy diversificadas en la tafoflora de la Formación Santa Clara, pero son frecuentes. Especialmente *Elatocladus* debe haber formado parte importante, quizás localmente dominante en la vegetación. Asimismo, parece que no pertenecieron a las comunidades de los pantanos de carbón (Weber, 1980).



Figura 5. Detalle de las impresiones de helechos triásicos en una muestra de roca encajonante de la mina El Camino.

La Formación Coyotes aflora extensamente en la parte occidental de la Sierra de San Javier y consiste de una secuencia en la que dominan los conglomerados con guijarros angulares a subredondeados de cuarzo, arenisca y pedernal en una matriz de arenisca fina a muy gruesa. En algunas localidades a los cuatro y seis kilómetros al sur de San Javier se observan clastos de cuarzo, areniscas y calizas, los clastos de la Formación Coyotes son similares a las rocas de los estratos paleozoicos que subyacen discordantemente al Grupo Barranca (Stewart y Roldán-Quintana, 1991); estos autores reportan un fusulínido en los clastos de calizas y consideran que la Formación Coyotes se depositó en un ambiente de abanicos aluviales pegados a las zonas montañosas por ríos muy vigorosos.

3.3. Localización y vías de acceso

La zona de estudio se ubica al SW del poblado de San Javier en el centro-este del estado de Sonora, ahí se ubican la mayoría de las obras mineras de donde se extrae carbón mineral en la región. Otras minas se encuentran en municipios aledaños como La Colorada, específicamente en Tecoripa y en el municipio de Soyopa. Para llegar al sitio se toma la carretera federal No.16 con salida en la ciudad de Hermosillo, esta vía atraviesa los municipios de interés para este estudio.

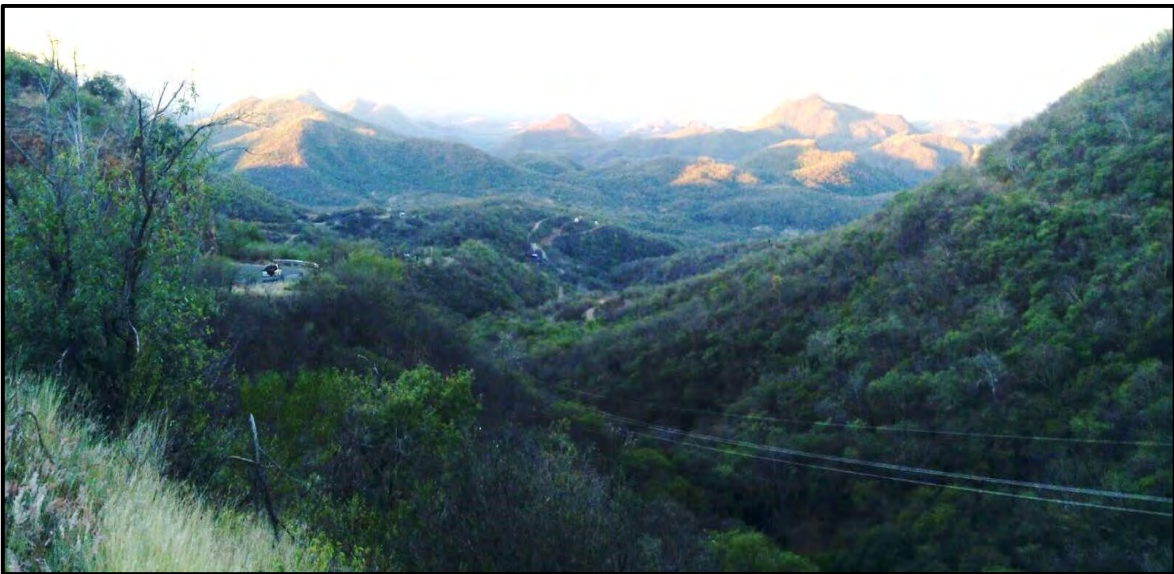


Figura 6. Panorámica de la región periférica de la mina El Rosario I, Municipio de San Javier, Sonora, México.

Distrito Minero de San Javier-Tecoripa, Sonora.

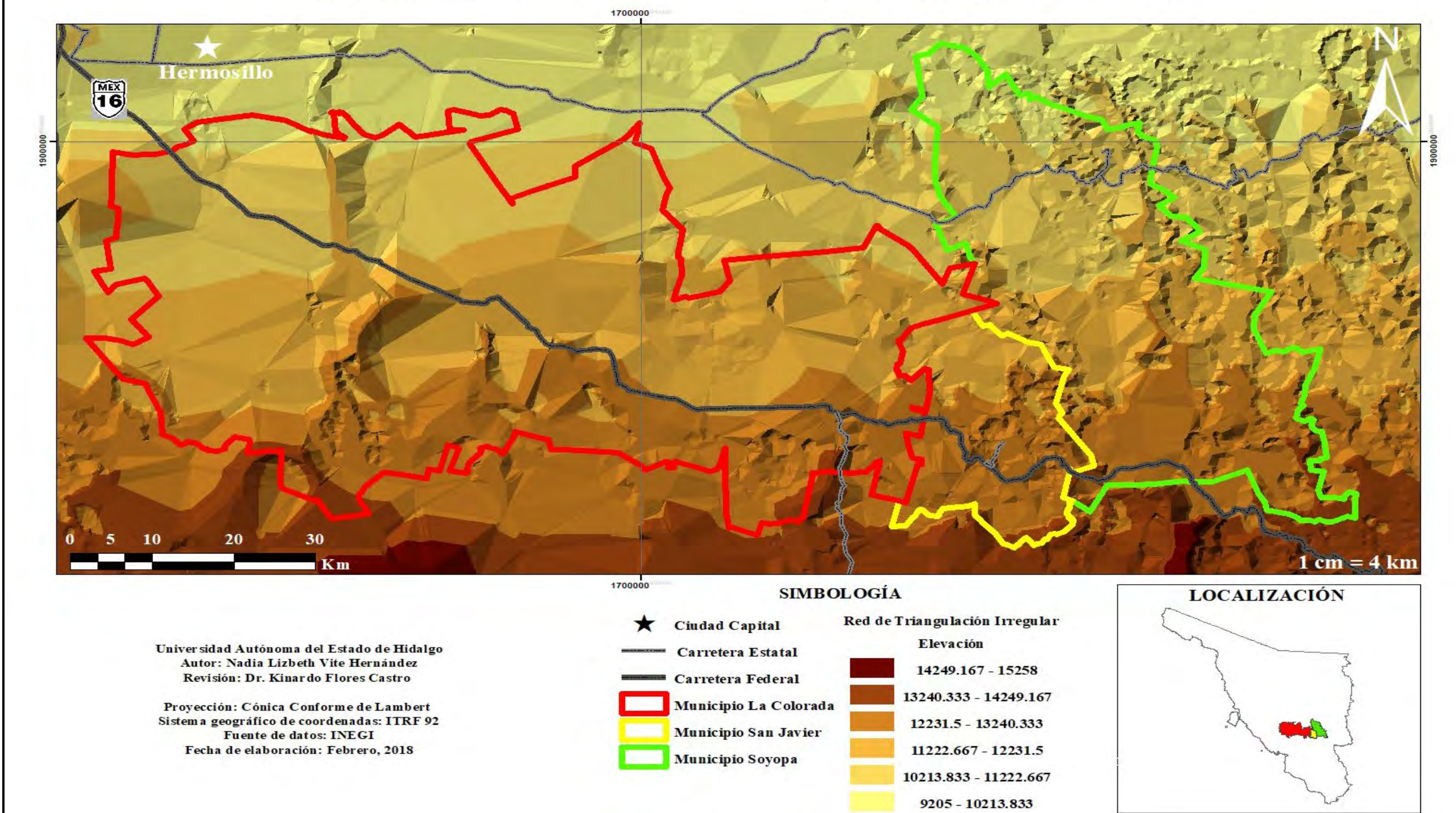


Figura 7. Localización geográfica del área de estudio y la vía de acceso principal.

CAPÍTULO 4

4.1. Método

4.1.1. Tipología de los yacimientos de carbón

La acumulación de carbón adopta la forma típica de mantos que se han formado en cuencas y forman depósitos de grandes dimensiones, paralelos a la estratificación, de espesor variable y en ocasiones plegados debido al ajuste estructural de las rocas que lo alojan. Esta acumulación, denominada turberas, se desarrolla en distintos medios sedimentarios (desde continentales a costeros) y normalmente tiene lugar por debajo del nivel freático, donde el agua es muy pobre en oxígeno. Las turberas se relacionan con otros medios sedimentarios o bien, forman parte de distintos sistemas deposicionales como por ejemplo: Sistemas fluviales y aluviales, lagos, lagunas costeras, deltas y estuarios. Las turberas más extensas se desarrollan en llanuras costeras y frecuentemente se encuentran protegidas por barreras de arena en zonas de delta o formando lagunas, sin embargo, se debe destacar que la zona de transición continental/marina constituye el ambiente sedimentario más frecuente asociado a la génesis de yacimiento de carbón. Otro de los ambientes sedimentarios favorables para la formación de yacimientos de carbón es el deltaico. La distribución, orientación y arquitectura de los deltas depende de varios factores, como son el clima, el caudal del río y la dinámica de éste en la desembocadura, aporte de sedimentos, el oleaje, los vientos, así como la pendiente, configuración y “movilidad tectónica” de la cuenca de depósito. Por lo general, los sedimentos deltaicos presentan grandes espesores (varios cientos de metros), principalmente de areniscas y/o limolitas. Las capas de carbón que se forman en estos ambientes suelen contener fauna en las unidades inter-estratificadas que pueden indicar ambientes de aguas marinas o continentales que, junto con las estructuras sedimentarias, sugieren unas condiciones de depósito en aguas poco profundas (Águeda *et al.*, 1991; Calder *et al.*, 1991; Diessel, 1992; Prothero y Schwab, 1996).

La formación de yacimientos económicamente explotables ocurre cuando se cumplen las siguientes cuatro condiciones (Corona-Esquivel *et al.*, 2006): debe existir

vegetación muy abundante y preferentemente en un ambiente tropical, cálido y húmedo; debe ocurrir en un ambiente tectónico de subsidencia, balanceado con el crecimiento y sepultamiento de la vegetación, la cual debe ser rápida, de tal manera que ésta no quede expuesta a la oxidación en la superficie y la descomposición de la materia orgánica sepultada sea lenta o no suceda, permitiendo que se forme la turba; y finalmente, todas las condiciones anteriores deben presentarse juntas durante intervalos de tiempo prolongados y alternados con lapsos durante los que se depositen otro tipo de sedimentos.

El carbón suele constituir secuencias estratigráficas características que reciben el nombre de ciclotemas, siendo una secuencia litológica que se repite con el tiempo. Los ciclotemas están típicamente constituidos en intervalos de la base a la cima, por capas de arcillas (lacustres o marinas), areniscas y limolitas, conglomerados y carbón. Aunque no todos los ciclotemas contienen yacimientos de carbón económicamente explotables, el estudio de estas secuencias ha llevado a un mejor entendimiento de la formación de tales yacimientos (Prothero y Schwab, 1996). Debido a esta estructura estratigráfica, el carbón forma frecuentemente mantos de gran extensión, cuyo espesor varía desde pocos centímetros hasta varios metros. En otros casos, los estratos de carbón aparecen intercalados aleatoriamente con areniscas, limolitas, margas o calizas (Corona-Esquivel *et al.*, 2006). La mayoría de los ciclotemas con carbón se extienden a través de grandes regiones continentales formando series, aunque raramente, también pueden presentarse aislados. En Norteamérica, los ciclotemas portadores de carbón se extienden por miles de kilómetros cuadrados, son notablemente uniformes en espesor y en organización interna. Durante el Carbonífero, gran parte de Norte América Oriental era una enorme planicie que yacía casi al nivel del mar, similar a la actual planicie costera del Golfo de México. El apilamiento de estos ciclotemas carboníferos indica frecuentes y repetidos ascensos y descensos del nivel del mar. (Prothero y Schwab, 1996).

4.1.2. Desarrollo experimental

4.1.2.1. Trabajo de campo

Se llevaron a cabo visitas de reconocimiento a minas de carbón del Distrito Minero de San Javier y Tecoripa Sonora, además de explotaciones en la localidad de Soyopa, donde se tiene referencia de exploración y explotación de mantos de carbón tipo antracita por particulares y ejidatarios. Las visitas a campo permitieron la identificación de las unidades geológicas que forman parte del Grupo Barranca y que incluyen los mantos de carbón de San Javier, objetivo de este proyecto. Se realizó un muestreo de mineral de mena directamente en los mantos de antracita en interior mina y en lotes, además se generó una base de datos de ubicación de las obras mineras.

La recolección de muestras representativas de una unidad de muestreo o lote, se efectuó de tal forma que la distribución de las variables físicas como químicas sean equivalentes y la determinación de la calidad del carbón confiable; para este estudio se realizó un muestreo de canal, en donde se obtuvo la muestra mediante un corte uniforme y continuo perpendicular a la estratificación. Las muestras de volumen de carbón triturado incluyen el espesor total del manto tomado, de tal manera que cada uno de los estratos constituyentes está representado en igual proporción a su espesor (Figura 8). Se utilizaron bolsas de polietileno gruesas para cada muestra y se identificaron con un rótulo indeleble y código único de acuerdo al nombre del sitio.

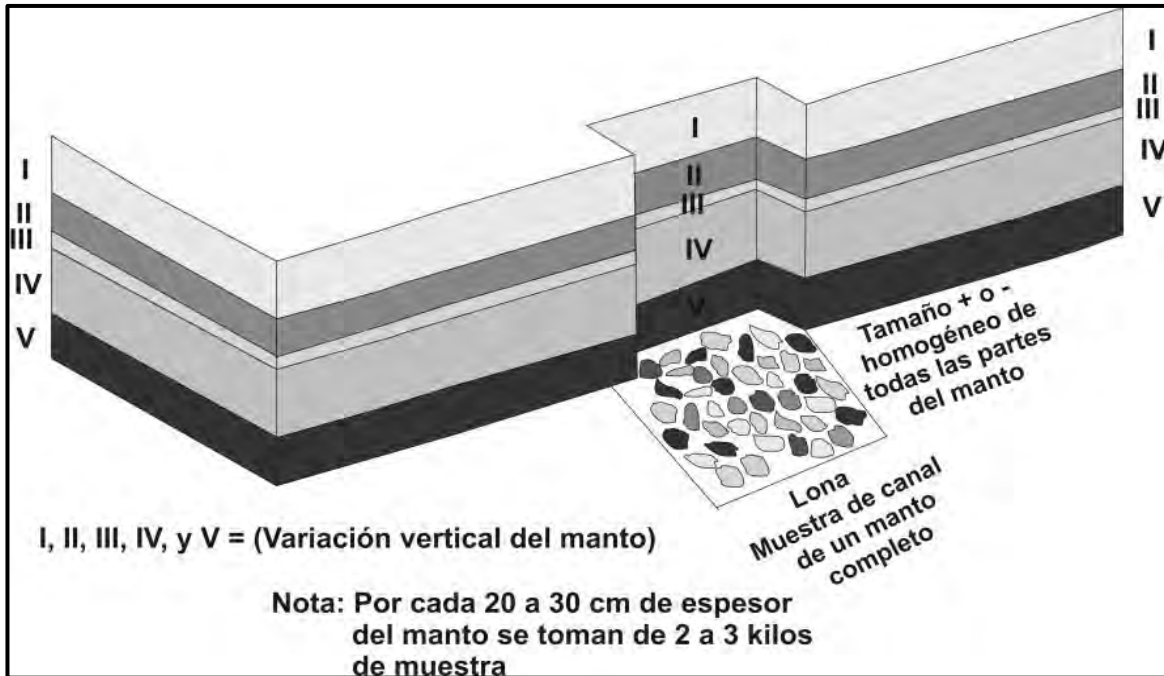


Figura 8. Muestreo en canal de mantos de carbón (Modificada de Ecocarbón, 1995).

La mayoría de las obras mineras en la región se explotan con técnicas artesanales, lo que limita el movimiento dentro de las mismas. Las figura 9 y 10 muestran la mina El Rosario I, siendo la única con un sistema de explotación seguro, estructuras de sistema de soporte y ventilación.

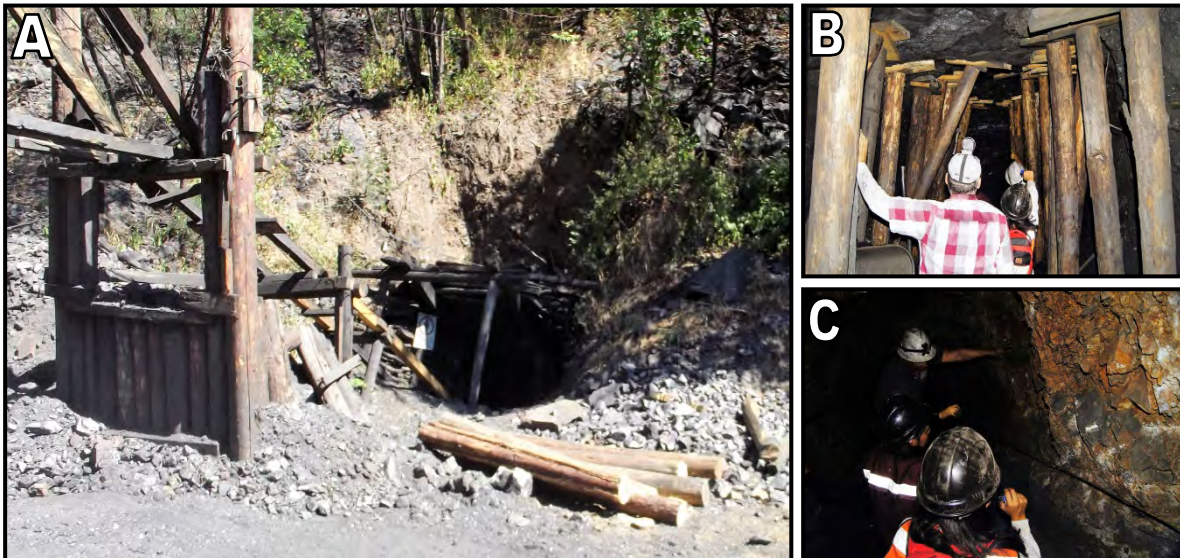


Figura 9. A: Entrada de la mina El Rosario I. B: Ademado del acceso principal de la mina El Rosario I. C: Reconocimiento de la litología dentro de la mina El Rosario I.



Figura 10. Observación, descripción y muestreo de los mantos de carbón en interior de la mina El Rosario.

La antracita se encuentra interestratificada por porciones centimétricas de lutita carbonosa y arenisca (mayormente de grano fino), los mantos presentan un color grisáceo oscuro y de lustre metálico. En las rocas encajonantes predomina la arenisca de grano fino y ocasionalmente grano grueso, de color pardo rojizo debido a la oxidación y altamente deleznable (Figura 11). Cuando la muestra se encuentra fuera de la mina, se favorece de la luz natural y es más evidente el brillo que posee, de color grisáceo plateado, con un alto grado de compactación así como la alta densidad por unidad de volumen (Figura 12).



Figura 11. Sección detallada del carbón en los mantos de la mina Pizarrines (escala gráfica martillo).



Figura 12. Manto de carbón rango antracita y muestras en lote.

4.1.2.2. Trabajo de laboratorio

Los parámetros fisicoquímicos del carbón procedente de los mantos de San Javier-Tecoripa Sonora se determinaron en el Laboratorio de Preparación y Análisis de Carbón y Coque certificado por la ISO 9001:2008 de la empresa Industrial Minera México S.A. de C.V. (IMMSA) Unidad Nueva Rosita Coahuila, siguiendo los procedimientos y normas que a continuación se describen.

Preparación de muestras de carbón

El proceso de preparación se realiza siguiendo el procedimiento establecido por el laboratorio basado en la norma ASTM D2013-07, que especifica las instrucciones para reducir y dividir la muestra bruta, mediante procesos en línea o fuera de línea (en algunos casos ambos), hasta un tamaño y masa adecuados para la realización de las pruebas. La división y la reducción de una muestra pueden ocurrir en más de una ubicación y frecuentemente la muestra se recoge, se reduce y se divide (una o más veces) mediante un sistema de muestreo mecánico. La muestra restante se puede dividir aún más en el sitio para facilitar su transporte al laboratorio y en algunos lugares, esta práctica requiere de un secador de vapor o de tipo eléctrico para el secado de muestra antes de la reducción posterior. A menudo las muestras se reducen y se sub dividen en muestras de análisis; sin embargo, algunas pruebas pueden requerir una muestra de diferente masa o tamaño superior. Este procedimiento se puede usar para proporcionar una muestra de cualquier masa y tamaño que consta de la muestra bruta o dividida e incluye la muestra de análisis. También se especifica cómo preparar muestras compuestas, si es necesario.

El proceso de preparación de las muestras de carbón se realizó siguiendo el procedimiento establecido por la norma ASTM D2013-07; la muestra fue quebrada con un pisón de hierro de 2”, optimizando la trituración con un quebrador de carbón, posteriormente se colocó en una plancha de hierro y se mezcló con una pala formando un montículo para homogenizar la muestra, esta operación se repiten varias veces hasta tener una mezcla homogénea, después fue extendida y reducida la cantidad de muestra a tomar

por el método de cuarteo, repitiendo la operación dos veces más. Las muestras se secaron a una temperatura de entre 104 y 107 °C por períodos de 20 min, con el fin de quitar la humedad del carbón tras su exposición al ambiente. La muestra fue pulverizada a un tamaño de malla menor a 60 (0.25 mm) y nuevamente reducida la cantidad de muestra por método de cuarteo hasta obtener 50 g., en la figura 13 se muestra en forma detallada el tratamiento de la muestra. Finalmente, las muestras fueron guardadas en sobres previamente identificados y enviados al laboratorio químico para su análisis.



Figura 13. Proceso de preparación de muestras en sus diferentes fases: A: Homogenización de muestra entera, B: Reducción de muestra, C: Secado de muestra, D: Pulverizado de carbón, E: Tamizado, F: Homogenización final y G: Almacenamiento de muestras.

Análisis del carbón:

Determinación de la humedad

Para determinar la humedad de carbón se siguió el procedimiento del laboratorio de IMMSA basado en la norma ASTM D 3302-07 que estipula la medición de humedad total para carbón tal como existe en el sitio, momento, y bajo las condiciones de muestreo. Es aplicable a los carbones extraídos, procesados, enviados o utilizados en actividades comerciales normales y no es aplicable a lodos de agua de carbón, lodos o productos pulverizados con un tamaño de partícula menor o igual a 0.5 mm. Puede aplicarse a carbones de todos los rangos dentro de las limitaciones reconocidas impuestas por las características de oxidación y descomposición de los carbones de menor rango. Debido a su naturaleza empírica, se requiere un estricto cumplimiento de los principios básicos y procedimientos permisivos para obtener resultados válidos, dado que el carbón puede variar de extremadamente húmedo (saturado con agua) a completamente seco, haciendo especial hincapié en el muestreo, la preparación de la muestra y la determinación de la humedad para garantizar la fiabilidad total de la medición. Por lo tanto, esta norma implica la recolección de la muestra bruta, la preparación de la muestra y el método de determinación.

La humedad en el carbón puede ser dividida en cuatro categorías: humedad inherente, humedad superficial, agua de hidratación de la materia mineral y humedad de descomposición, resultando la humedad total como la combinación de humedades de la muestra. La determinación del contenido de humedad total se obtiene estableciendo la pérdida de peso de la muestra después de calentarla (generalmente entre 107 – 110 °C) bajo condiciones controladas de temperatura, tiempo y atmósfera con el equipo adecuado (Figura 14).

El porcentaje de humedad fue calculado con la ecuación 1:

$$\% h = \frac{(P_i - P_s) \times 100}{P_i}$$

Ecuación 1

Donde:

$\%h$ = Porcentaje de humedad

P_i = Peso inicial = peso húmedo

P_s = Peso seco



Figura 14. Horno de secado con muestras en charolas previamente identificadas.

Determinación de cenizas

Para obtener el análisis de ceniza, se ejecuta el procedimiento del laboratorio de IMMSA basados en la norma ASTM D 3174-04 que define a la ceniza como el residuo que queda después de quemar el carbón y el coque a 750 °C, aclarando que la ceniza obtenida difiere en su composición de los constituyentes inorgánicos presentes en el carbón original. La incineración causa la expulsión de toda el agua, pérdida de dióxido de carbono, conversión de pirita a óxido férrico y especies químicas. La ceniza, según lo determinado por este método de prueba, diferirá en cantidad de las cenizas producidas en las operaciones del horno y otros sistemas de combustión porque las condiciones de incineración influyen en su composición química y cantidad de cenizas. Este método de prueba cubre la determinación de los residuos inorgánicos como ceniza en la muestra de análisis de carbón o coque preparados conforme a la norma ASTM D2013 o D346 . Los resultados obtenidos se pueden aplicar como la ceniza en el análisis próximo de la norma ASTM D3172, que enuncia los métodos de prueba y que se pueden utilizar para establecer el rango de madurez del carbón, además de mostrar la proporción de componentes combustibles y no combustibles; proporcionar la base para comprar, vender y evaluar el beneficio, o para otros fines.

Los materiales que forman la ceniza son: materia mineral extraña compuesta de materiales arcillosos, calcita, pirita o marcasita, sulfatos inorgánicos, cloruros y fluoruros. La ceniza inherente incluye elementos inorgánicos combinados con la parte orgánica del carbón. Para definir la cantidad de ceniza en la muestra de carbón se utilizaron crisoles de porcelana o sílice. Inicialmente, se hizo un registro del peso de cada crisol; en ellos se adicionó 1.0 g de muestra de carbón con una precisión de ± 0.1 mg y se registró nuevamente su peso, se colocaron los crisoles conteniendo la muestra dentro de una mufla, se calentó el horno de temperatura ambiente a de 750 ± 10 °C, una vez alcanzada esta temperatura se mantuvo durante dos horas y se dejó enfriar el horno a 100 °C y se sacaron las muestras para colocarlas en un desecador (Figura 15) y que llegarán a temperatura ambiente. Finalmente las muestras se sacaron del desecado y se registró el peso de la muestra calcinada con el crisol.



Figura 15. A: Ingreso de las muestras para el análisis de cenizas. B: Crisoles de porcelana y sílice. C: Mufla eléctrica.

A partir de los datos registrados, el porcentaje de ceniza se calculó con la ecuación 2:

$$\% C = \frac{((P_c + P_{mc}) - P_{cv}) \times 100}{P_{mh}}$$

Ecuación 2

Donde:

$\%C$ = Porcentaje de ceniza

P_c = Peso del crisol

P_{mc} = Peso muestra calcinada

P_{cv} = Peso crisol vacío

P_{mh} = Peso muestra húmeda

Para corregir los resultados en base seca, se determina un factor de corrección F_c a partir de la humedad residual de las muestras de acuerdo a la norma ASTM D 3173-07, pesando un gramo de carbón (± 0.1 mg) en un crisol de porcelana y se colocaron en un secador a $107 - 110$ °C por una hora, aplicando la ecuación 3, la cual es utilizada para determinar todos los valores en base seca:

$$F_c = \frac{(P_c + P_{ms}) - P_c}{P_{mh}} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

F_c = Factor de corrección

P_c = Peso del crisol

P_{ms} = Peso muestra seca

P_{mh} = Peso muestra húmeda

Por lo tanto, el porcentaje de ceniza en base seca se calculó con la siguiente ecuación:

$$\%C_{bs} = \frac{\%C_{bh}}{F_c} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

$\%C_{bs}$ = Ceniza base seca

$\%C_{bh}$ = Ceniza base húmeda

F_c = Factor de corrección

El porcentaje de carbono fijo en base seca de las muestras se determinó con la ecuación 5:

$$\%C_f = 100 - (\%C_{bs} + \%Mv_{bs}) \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

$\%C_f$ = Porcentaje de carbono fijo

$\%C_{bs}$ = Porcentaje de cenizas en base seca

$\%Mv_{bs}$ = Porcentaje de materia volátil en base seca

Determinación de materia volátil

Para obtener la materia volátil del carbón se utilizaron los procedimientos estandarizados del laboratorio de IMMSA basados en la Norma ASTM D 3175-89, este método de prueba es empírico y cubre la determinación de los productos gaseosos, excluyendo el vapor de humedad. Además, se utiliza un factor de corrección basado en la norma D3180 de la ASTM volumen 05.06, buscando una base seca teórica de cero humedad de la muestra. La materia volátil es aquella porción de la muestra de carbón que se desprende en forma de gas o vapor cuando ésta es sometida a una prueba controlada de calentamiento, consistente de hidrocarburos y otros gases, resultado de procesos de destilación.

Se inicia con el registro de peso de cada crisol de cromo-níquel con tapa, necesarios específicamente para este análisis, a cada crisol se adiciona un gramo de muestra (entre 0.950 - 1.050 g), se colocan las tapas de los crisoles y posteriormente se introducen dentro de la mufla a una temperatura de 950 °C (± 20 °C); las muestras se deben mantener durante siete minutos a esta temperatura para después enfriarse en un desecador sin remover las tapas (Figura 16). A partir de los datos registrados, se realizan los cálculos de la materia volátil aplicando la ecuación 6:

$$\%Mv_{bh} = \frac{(P_m - P_r) \times 100}{P_m} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

$\%Mv_{bh}$ = Porcentaje de materia volátil en base húmeda

P_m = Peso de la muestra en gramos

P_r = Peso del residuo

El porcentaje de materia volátil se corrigió a una base seca con la ecuación 7:

$$\%Mv_{bs} = \frac{\%Mv_{bh} - H}{F_c} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

$\%M_{vbs}$ = Porcentaje de materia volátil en base seca

$\%M_{vbh}$ = Porcentaje de materia volátil en base húmeda

H = % Humedad de análisis

F_c = Factor de corrección

$$H = (1 - F_c) \times 100$$

Ecuación 8

Donde:

H = % Humedad de análisis

F_c = Factor de corrección



Figura 16. A: Ingreso de muestras para el análisis de materia volátil. B: Mufla eléctrica. C: Crisoles de cromo-níquel con tapa.

Determinación de azufre

Para determinar el azufre y el carbono total en muestras de carbón se sigue el procedimiento del laboratorio de IMMSA basado en la norma ASTM 4239-05. Este método de prueba cubre la determinación de azufre en muestras de carbón o coque por combustión en horno de tubo a alta temperatura, se utiliza un equipo automatizado y todos los resultados son porcentajes de masa a menos que se indique lo contrario.

El azufre está presente en el carbón en tres formas: pirítico, como sulfato y orgánico. El pirítico es FeS, el orgánico es azufre químicamente enlazado en los hidrocarburos contenidos en el carbón y una pequeña cantidad se encuentra en el carbón como sulfatos, tal como CaSO₄, MgSO₄ y FeSO₄, entre otros; la suma de estas tres formas de azufre es azufre total. El análisis de azufre se realizó con el equipo Eltra CS-500 y el software UNI del equipo, se pesó una cantidad de muestra de 0.25 a 0.35 mg en crisoles de combustión de cerámica y se sometió a una temperatura de 1350 °C en el analizador de S, el equipo fue previamente calibrado utilizando estándares certificados de 0.56% ± 0.04 y 4.37% ± 0.09 como se muestra en la figura 17, se aplicó la siguiente ecuación para conocer el contenido porcentual de S en base seca:

$$\%S_{bs} = \frac{\%S_{bh}}{Fc} \qquad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

$\%S_{bs}$ = Porcentaje de azufre en base seca

$\%S_{bh}$ = Porcentaje de azufre en base húmeda

Fc = Factor de corrección

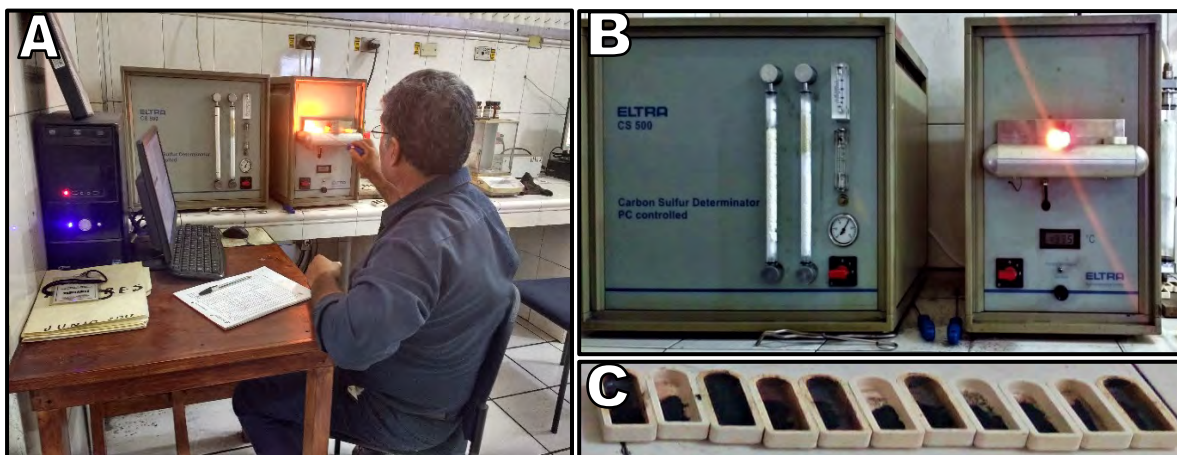


Figura 17. A: Proceso de análisis de azufre. B: Equipo ELTRA CS 500. C: Crisoles de combustión.

Determinación de poder calorífico

Para determinar el poder calorífico contenido en las muestras de carbón se sigue el procedimiento del laboratorio de IMMSA basado en la norma ASTM D5865, la cual menciona que el poder calorífico bruto mediante un calorímetro isoperibólico, este utiliza para calcular el contenido calórico total de la cantidad de carbón o coque en estudio.

El análisis se realizó con un calorímetro Marca LECO, modelo AC-500 el cual se calibró con un estándar certificado de ácido benzoico concentrado al 100% en forma de pellet; posteriormente, se pesó un gramo (± 0.1 mg) de las muestras en crisoles de acero inoxidable, cada crisol se colocó dentro la bomba y dentro de él se depositó la muestra a través de un hilo de algodón, se cerró la bomba, se llenó de oxígeno hasta alcanzar una presión de 430 PSI; la bomba se introdujo en un cubo que contiene 2.0 L de agua y este último dentro del calorímetro sujetado con arneses con punta de electrodo a cada terminal (Figura 18), al final del proceso, el poder calorífico se proporciona en Kcal/kg de muestra.

La energía liberada por el carbón, es determinada por el incremento de temperatura del agua del cubo utilizando el software del equipo.

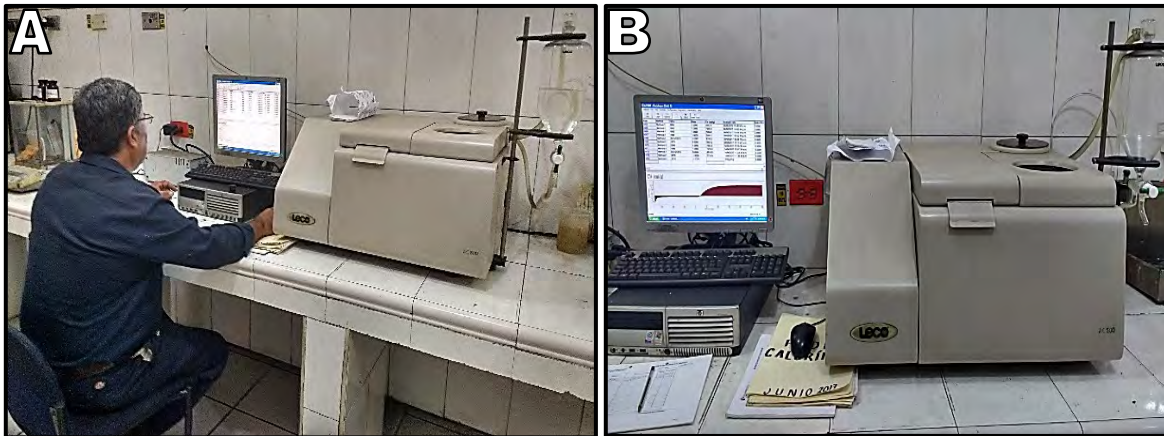


Figura 18. A: Monitoreo del análisis de poder calorífico. B: Equipo Leco AC 500.

Determinación del índice de hinchamiento libre de carbón

Para determinar el índice de hinchamiento conocido también como botón de las muestra de carbón se sigue el procedimiento del laboratorio de IMMSA basado en la norma ASTM D720, este método es una prueba que se utiliza para indicar ampliamente el grado de oxidación de los diferentes tipos de carbón; esta prueba no se recomienda como un método para la determinación de la expansión del carbón en hornos de coque debido a que únicamente es un microanálisis indicativo de aglomeración del carbón, por lo que no contempla el riesgo de afectaciones en el horno de coquización durante el proceso.

El índice de hinchamiento del carbón es una medida del incremento en volumen de un carbón cuando es calentado bajo condiciones específicas, este tipo de incremento en volumen está asociado con las propiedades plásticas del carbón e indica el grado de coquización, tanto que es posible determinar si el carbón es coquizable o no, generalmente se acepta un carbón como coquizable cuando el tamaño de botón es mayor de 3 con respecto a rangos establecidos por la tabla estandarizada de la norma ASTM D720. Se utiliza un horno eléctrico a una temperatura de $820\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5$, se pesa un gramo de muestra en crisoles de sílice con tapa, se coloca en el porta crisoles del horno programado con la siguiente rampa de calentamiento: $800\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10$ entre 11/2 min, $820\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5$, entre 21/2 min.

Finalmente, las muestras se extraen del horno y se comparan con la tabla reglamentaria ilustrada en la figura 19b.

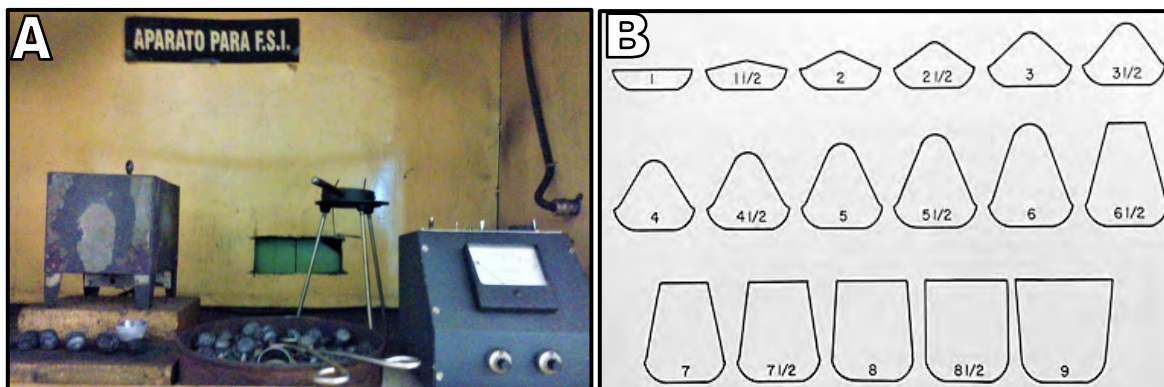


Figura 19. A: Horno programado. B: Tabla de referencia para determinar el tamaño de botón.

Rango de madurez del carbón

La norma ASTM 388 cubre la clasificación de carbones por rango, es decir, de acuerdo con su grado de metamorfismo o alteración progresiva en la serie natural de lignito a antracita, estos carbones se componen principalmente de vitrinita y la clasificación debe basarse en las propiedades gradacionales que dependen del grado de metamorfismo, a su vez, la clasificación también se hará de acuerdo con el carbono fijo y el poder calorífico bruto calculado para la base de materia libre de minerales. Estas categorías indican rangos de características físicas y químicas que son útiles para hacer estimaciones amplias del comportamiento del carbón en la extracción, preparación y uso. La precisión de la clasificación del carbón impuro puede verse afectada por el efecto de materia mineral en la determinación de la materia volátil y el poder calorífico; y en su cálculo para la base de materia libre de minerales.

Con base en los resultados obtenidos, se aplicaron las siguientes ecuaciones para clasificar las muestras en rango de semi-antracita, antracita o meta-antracita según lo especificado en la norma ASTM D-388. La ecuación 10 se utilizó para el cálculo del porcentaje de carbono fijo, libre de materia mineral y seco (ASTM D-388, 2017).

$$\% CF (lmm, s) = \frac{(\%CF_{bs} - (0.15 \times \%S_{bs})) \times 100}{100 - (1.08 \times \%C_{bs}) + (0.55 \times \%S_{bs})} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

$\%CF_{bs}$ = Carbono fijo base seca

$\%S_{bs}$ = Azufre base seca

$\%C_{bs}$ = Ceniza base seca

lmm, s = Libre de materia mineral, seco.

La ecuación 11 se aplicó para el cálculo de materia volátil, libre de materia mineral y seco.

$$\% Mv (lmm, s) = 100 - \%CF(lmm, s) \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde:

$\%CF$ = Porcentaje de carbono fijo

lmm, s = Libre de materia mineral, seco.

Adicionalmente, las ecuaciones 12 y 13 se aplicaron para el cálculo de poder calorífico en unidades de BTU/lb, libre de materia mineral y húmedo.

$$PC (BTU/lb) = (Pc_{bs} \left(\frac{Kcal}{kg} \right) \times 1.8) \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

Pc_{bs} = Poder calorífico base seca en kcal/kg

$$PC(BTU/lb) (lmm, h *) = \frac{Pc - (50 \times \%S_{bs}) \times 100}{100 - (1.08 \times \%C_{bs}) + (0.55 \times \%S_{bs})} \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde:

Pc = Poder calorífico en BTU/Lb

$\%S_{bs}$ = Azufre base seca

$\%C_{bs}$ = Ceniza base seca

lmm, h = Libre de materia mineral, húmedo

CAPÍTULO 5

5.1. Resultados

Tomar los puntos de localización en minas del área de estudio permitió generar una base de datos en la región de San Javier- Tecoripa que se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Ubicación de las obras mineras localizadas en el área de estudio.

ID muestra	Coordenada X	Coordenada Y	Coordenada Z (msnm)
El Camino	28°35.239'	109°39.167'	428
San Miguelito	28°34.084'	109°38.070'	604
La Paloma	28°34.269'	109°58.722'	547
El Refugio 30	28°34.540'	109°45.333'	614
El Refugio 180	28°34.540'	109°45.333'	614
La Esperanza II	28°34.719'	109°45.372'	655
La Esperanza I	28°34.693'	109°45.358'	656
Chankara	28°34.907'	109°45.356'	750
Margarito García	28°34.572'	109°45.081'	622
Sentimiento I	28°34.381'	109°45.195'	622
Pizarrines	28°34.340'	109°45.034'	665
A. Miranda (Comanche)	28°35.183'	109°37.844'	384
Ramón ICEDO I	28°35.406'	109°38.038'	340
Ramón ICEDO II	28°35.406'	109°38.038'	340
El Rosario II	28°32.730'	109°59.901'	615
M. El Rosario II	28°32.730'	109°59.901'	615
Suaqueña	28°35.422'	109°38.070'	350
El Milagro / Lote Paloma	28°34.273'	109°58.800'	578

Los resultados de cada análisis efectuado a las muestras de carbón se muestran en la tabla 2, donde se observa que el contenido de humedad es variable con un rango de 0.29-2.99 %, por otra parte el porcentaje de las cenizas están en el rango de 4.47-28.39 % mientras que el % de carbono fijo presenta un rango de 68.81-93.64 %, el porcentaje de la materia volátil es bajo y está en el rango de 4.11- 6.44 %, el porcentaje de carbono total 77.32-97.64 %, el rango de variación del porcentaje de azufre varía de 0.07-6.14 % y el poder calorífico está en el rango de 4598.08-7379.79 Kcal/Kg; sin embargo el poder calorífico se encuentra directamente relacionada con el porcentaje de carbón fijo y el porcentaje de carbono total; también se observa que el poder calorífico de los carbones varían inversamente proporcionales con el porcentaje de las cenizas; no se encuentra relación del contenido de materia volátil ni el contenido de azufre con el poder calorífico.

Tabla 2. Análisis de las muestras de carbón.

ID Muestra	H ₂ O %	Ceniza %	C.F. %	M.V. %	C. Total %	Azufre %	P. C. Kcal/kg	F.S.I
El Camino	1.64	24.94	72.10	2.96	77.42	0.16	5178.61	0
San Miguelito	2.35	11.89	81.78	6.33	85.57	0.69	6183.27	0
La Paloma	0.40	23.96	71.43	4.61	77.90	0.07	4598.08	0
El Refugio 30	1.65	13.82	81.86	4.32	87.33	0.55	6173.73	0
El Refugio 180	1.61	13.55	81.87	4.58	85.29	0.83	6472.95	0
La Esperanza II	2.45	8.13	90.26	1.61	91.78	0.52	6945.36	0
La Esperanza I	1.72	8.90	88.00	3.10	91.29	0.70	6734.34	0
Chankara	2.22	4.47	93.64	1.89	96.02	0.73	7327.66	0
Margarito García	2.36	15.03	83.25	1.72	85.14	0.33	6209.38	0
Sentimiento I	2.92	4.78	93.40	1.82	94.74	0.47	7237.79	0
Pizarrines	2.12	28.39	68.81	2.80	75.36	1.15	5244.76	0
A. Miranda (Comanche)	0.65	18.40	75.20	6.40	77.32	6.14	6039.55	0
Ramón ICEDO I	2.57	8.57	89.89	1.54	95.84	0.30	6818.77	0
Ramón ICEDO II	2.20	6.00	92.24	1.76	97.64	0.28	7309.60	0
El Rosario II	0.73	15.86	79.26	4.88	85.80	0.23	5604.58	0
M. El Rosario II	0.55	10.63	83.70	5.67	90.85	0.17	6363.93	0
Suaqueña	1.82	18.86	79.23	1.91	82.12	0.27	5977.66	0
Milagros Lote La Paloma	0.29	10.81	85.08	4.11	93.30	0.10	6361.61	0

Dónde: H₂O= Humedad, C. F.= Carbono fijo, M.V.= Materia volátil, C. Total=Carbono total, P.C.= Poder calorífico y F.S.I.= Índice de hinchamiento libre del carbón.

Finalmente, se presenta la clasificación en rango de madurez con base en la norma ASTM 388 en la tabla 3, en esta se muestra que se presentan dos tipos de carbón que son antracita y meta-antracita que igualmente presentan un poder calorífico que varía inversamente proporcional al porcentaje de la materia volátil.

Tabla 3. Clasificación en rangos del carbón.

ID Muestra	C.F. % (<i>lmm, s</i>)	M.V. % (<i>lmm, s</i>)	P.C. (BTU/lb) (<i>lmm, h</i>)	Rango
El Camino	98.76	1.23	12762.27	Meta – antracita
San Miguelito	94.12	5.88	11505.99	Antracita
La Paloma	96.40	3.60	8292.11	Antracita
El Refugio 30	96.47	3.53	11369.46	Antracita
El Refugio 180	96.27	3.73	11930.28	Antracita
La Esperanza II	99.17	0.83	12875.86	Meta – antracita
La Esperanza I	97.66	2.34	12408.89	Antracita
Chankara	98.69	1.31	13561.41	Meta – antracita
Margarito García	99.54	0.46	11492.52	Meta – antracita
Sentimiento I	98.68	1.32	13497.80	Meta – antracita
Pizarrines	99.90	0.10	9670.93	Meta – antracita
A. Miranda (Comanche)	96.78	3.22	11016.30	Antracita
Ramón ICEDO I	99.19	0.81	12655.23	Meta – antracita
Ramón ICEDO II	98.75	1.25	13521.34	Meta – antracita
El Rosario II	95.75	4.25	10198.37	Antracita
M. El Rosario II	94.63	5.37	11602.31	Antracita
Suaqueña	99.63	0.37	10995.94	Meta – antracita
Milagros Lote Paloma	96.37	3.63	11542.47	Antracita

Dónde: C.F. (*lmm,s*)= Carbono fijo, libre de materia mineral y seco; M.V.= Materia volátil, libre de materia mineral y seco; P.C. (BTU/Lb) (*lmm,h*)= Poder calorífico en BTU/Lb, libre de materia mineral y húmedo.

5.2. Discusión

En lo que se refiere a los resultados del análisis de ceniza, se encuentran en proporciones bajas ($< 28.5\%$); ejemplificando una de las características fundamentales de carbones muy maduros y en proceso de solidificación; dentro de los análisis de carbón en sus diferentes rangos, la ceniza es directamente proporcional a la materia volátil, dado que a menor cantidad de ceniza, menor cantidad de flujos y mayor poder de calentamiento. Este comportamiento es observable en la mina *Sentimiento I*, *Chankara* y *Ramón ICEDO II*. Además, algunos valores de ceniza se muestran con valores muy elevados respecto a la cantidad de materia volátil presente, esto podría derivar de factores de contaminación de suelo dentro del área de estudio.

Con relación al análisis de materia volátil, es útil para establecer el rango de madurez del carbón e indicar el rendimiento del coque en el proceso de carbonización, además de establecer características de combustión. Los resultados obtenidos a partir del análisis de volátiles son bajos, en proporciones menores al 7%, adicionalmente el contenido de carbono fijo es muy elevado ($>94\%$) y se relaciona directamente al alto poder calorífico de las muestras de carbón. Estas características son fundamentales en el estudio de carbones destinados a abastecer los hornos de fundición de aceros.

En cuanto a los valores de carbono total son muy elevados, propios del sepultamiento y la temperatura alcanzada durante el proceso de metamorfismo, en donde naturalmente el carbón se desprendió de minerales inorgánicos y dejó la carbonificación libre actuando.

Se explica además que los resultados del análisis de azufre se utilizan para determinar la preparación, lavado de carbón, evaluar las posibles emisiones de azufre durante la combustión y estimar la calidad en relación con las especificaciones industriales y científicas. Los criterios de compra y venta de carbón metalúrgico determinan que el contenido de azufre no debe exceder el 1.5%. Por lo anterior, las muestras recomendadas para mezclas con carbón metalúrgico son *El Camino*, *Margarito García*, *Sentimiento I*,

Ramón ICEDO I y *Ramón ICEDO II* por su bajo contenido de azufre (<0.50%) puesto que no incrementarían extremadamente el porcentaje del mismo en la mezcla.

El valor calorífico bruto se utiliza en la estimación del valor calorífico frente al contenido de azufre, para determinar si el carbón cumple con los requisitos reglamentarios para los combustibles industriales. Además, puede usarse para evaluar la efectividad de los procesos de beneficio y es requisito dentro de la clasificación de carbón de acuerdo con la norma ASTM D388. Para las muestras estudiadas y clasificadas como meta-antracita los valores de poder calorífico son muy elevados (entre 9500 y 14000 BTU/Lb) lo que les confiere mayor poder de calentamiento y un óptimo rendimiento en plantas carboeléctricas.

Por último, las muestras de carbón estudiadas presentan un tamaño de hinchamiento igual a 0 como producto del alto grado de maduración que tiene el carbón en rango antracítico y meta-antracítico, el cual ha perdido la virtud de expandirse al calentarse.

CAPÍTULO 6

6.1. Conclusiones

La clasificación por rangos del carbón asigna a las muestras *El Camino, La Esperanza II, Chankara, Margarito García, Sentimiento I, Pizarrines, Ramón ICEDO I, Ramón ICEDO II* y *Suaqueña* el rango meta-antracita, con menor cantidad de materia volátil pero mayor poder de calentamiento y carbono fijo que el resto de las muestras. Por lo anterior, el carbón extraído en estas minas podría destinarse al proceso de coquización como inerte en mezclas con carbón metalúrgico, pagándose así con base en calidad y no en volumen.

Las muestras más competentes para mezclar con carbón fino lavado para la producción de coque metalúrgico son: *Pizarrines, Suaqueña, Margarito García, Ramón Icedo I* y *La Esperanza II*, por su alto contenido de carbono fijo (> 99%) teniendo un efecto directo en el incremento de carbono fijo del coque resultante.

En materia de seguridad este estudio permite concluir que no existe riesgo por explosión en las minas subterráneas estudiadas debido a la baja concentración de volátiles.

El análisis de los parámetros fisicoquímicos permitió generar datos sin precedentes con respecto al carbón del Distrito Minero de San Javier y Tecoripa, proporcionando las bases para sugerir nuevas aplicaciones industriales con base en el poder de calorífico, dándole un valor agregado. La caracterización permitió sugerir usos como:

- Energético para calderas en centrales eléctricas.
- Producción de gas para alumbrado o gas para plantas eléctricas de subestación.
- Industria siderúrgica para fundiciones ferrosas y no ferrosas.
- Otros usos alternativos son: filtros de agua y como generadores de vapor (saunas, baños turcos y piscinas temperadas).

6.2. Recomendaciones

El análisis de antracita como aditivo en mezclas para la producción de coque metalúrgico debe contemplar la posibilidad de rompimiento de ladrillo refractario en los hornos de coque debido a la baja cantidad de volátiles y con base en los resultados obtenidos las mezclas se estiman en proporciones menores al 10%. Por lo anterior, se recomienda el análisis de carbón meta-antracita como aditivo en las mezclas de carbones para la producción de coque metalúrgico y así conocer con certeza la capacidad de elevar el poder calorífico, el efecto sobre la presión ejercida durante el proceso de coquización y las propiedades del coque resultante. Adicionalmente, las mezclas de coque y antracita se sugieren en proporciones de entre 10 y 15% debido a que es muy útil en la fundición de aceros, principalmente porque las muestras de carbón de tipo antracita y meta-antracita no son objeto de riesgo por explosividad debido a la escasa presencia de volátiles.

Es importante mencionar que aunque no existe alto riesgo por explosión en las obras mineras subterráneas, se sugiere la constante ventilación. Por otro lado, la revisión bibliográfica realizada para el sustento de esta investigación menciona que existe un riesgo latente por derrumbes, principalmente asociados a la falta de estructuras apropiadas en las obras mineras y al escaso equipo de protección de los trabajadores, por consiguiente se recomiendan estudios enfocados a la mejora del sistema de extracción.

GLOSARIO

A

Aglomeración: Término general que describe la tendencia de las grandes moléculas o las partículas coloidales a combinarse en masas, especialmente en solución. En el caso de minerales, consiste en la formación de terrones a partir del mineral fino mediante la acción de un aglomerante o por compactación.

Alquitrán: Sustancia oscura, untuosa al tacto, producto de la destilación de la hulla, se le utiliza como gas de alumbrado.

Antracita: Variedad de carbón mineral con un contenido en carbono de alrededor del 90%. Es de color negro intenso y brillo vítreo submetálico, en ocasiones con irisaciones; poder calorífico superior a 36 MJ/kg. Se emplea como combustible industrial y en la fabricación de gas de agua y carbono amorfo.

Apófisis: En paleontología, proyección interna a partir de las placas interambulacrales de los equinoideos.

B

Basculamiento: Inclinación de un bloque geológico, a la manera del movimiento de una báscula o balanza. Junto con el plegamiento, es responsable de la inclinación de los estratos.

Batolito: Complejo intrusivo de grandes dimensiones, compuesto generalmente por varias unidades plutónicas con relaciones muy complejas. Los tipos litológicos incluyen desde gabros a leucogranitos, pero los más abundantes son tonalitas, granodioritas o granitos sensu stricto.

Bioclasto: Elemento clástico procedente de la parte dura de un organismo presente en una roca sedimentaria.

Brea: Sustancia viscosa, oscura, presenta fractura concoidal, es producto de la destilación de la hulla o del petróleo.

C

Carbón bituminoso: Sinónimo de hulla (Ver hulla).

Carbón mineral: Carbón natural, sólido y combustible, de color pardo a negro y de consistencia pétreo o terrosa, constituido por carbono amorfo acompañado de hidrocarburos, compuestos orgánicos complejos y materiales inorgánicos. Tiene su origen en la carbonificación de vegetales en épocas geológicas pasadas, tras quedar sepultados en

ambientes anóxicos. Según el porcentaje de carbono fijo, se denomina turba, lignito, hulla o antracita.

Carbonificación: Alteración tafonómica de los restos organógenos por enriquecimiento en carbono, durante la fosilización.

Carbonización: Es el proceso de formación y diagénesis del carbón mineral, cuyas etapas principales son: deposición de restos vegetales, formación de la turba, formación del carbón (hulla, antracita, grafito, lignito).

Ceniza de carbón: Residuo que queda después de quemar el carbón y el coque.

Ciclotema: 1.Ciclo sedimentario que suele contener sedimentos marinos y continentales. Entre estos últimos se intercalan normalmente capas de carbón. || 2. Unidad elemental en la sedimentación cíclica o rítmica.

Constricta: Estrechada, con una ceclidura.

Coque: 1.Material resistente y poroso, producto de la destilación seca destructiva del carbón mineral, realizada a alta temperatura en ausencia de aire. 2. Residuo sólido producto de la destilación seca (entre 500 y 1.000°C) del carbón. El coque se puede volver a usar como combustible, pues todavía contiene más de 90% de carbono.

Coquización: 1.Proceso pirometalúrgico mediante el cual se obtiene coque a partir del carbón, a través de una combustión incompleta de este último. || 2. Destilación destructiva del carbón en ausencia de oxígeno.

Creosota: Aceite espeso, viscoso y cáustico que se obtiene por destilación de la madera, el alquitrán, etc., y se emplea como antiséptico, para preservar de la putrefacción, para proteger la madera y en procesos metalúrgicos.

Cuenca sedimentaria: 1. Área de la superficie terrestre en la que, durante un prolongado intervalo de tiempo geológico, se han acumulado grandes espesores de sedimentos. Var.: cuenca. || 2. Sector de la corteza terrestre que durante un prolongado intervalo de tiempo ha estado sometido a subsidencia y en el que la sedimentación ha rellenado parcial o totalmente el hueco dejado por la propia subsidencia.

D

Deleznable: Mineral, roca o material que se rompe, disgrega o deshace con cierta facilidad. Poco resistente.

F

Filotaxis: Disposición que presentan las hojas en el tallo.

G

Génesis: Origen, fuente principio. Conjunto de causas y efectos que conducen a un resultado. Ej. Litogénesis, paragénesis, orogénesis.

Graptolitos: Seres fitozoarios que vivieron en colonias durante el Silúrico, su evolución se realizó hacia una vida independiente. Rango: Cámbrico Medio-Carbonífero.

H

Helicoidal: En figura de hélice o provisto de ellas.

Hulla: Variedad de carbón mineral con un contenido en carbono de aproximadamente el 80%. Es de color negro intenso y brillo mate o graso. Se diferencia del lignito por su mayor poder calorífico, entre 30 y 36 MJ/kg. Se utiliza como combustible y para la producción de coque siderúrgico, gas ciudad y alquitrán. Es característica del Carbonífero, aunque también existen yacimientos en el Permo-Triásico de Australia y África del Sur, y el Cretácico de Canadá.

Humedad del carbón: Contenido de agua presente en el carbón, la cual puede ser clasificada en: humedad bruta o libre (también llamada agua de superficie), humedad de retención o residual, y humedad total. La humedad es determinada cuantitativamente por métodos normalizados que varían de acuerdo con el tipo de humedad que se desee determinar.

Humita: Variedad de carbón análogo a la vitrinita.

I

Índice de hinchamiento libre del carbón (FSI): Medida del incremento en volumen de un carbón cuando es calentado bajo condiciones específicas.

Inerte: Sustancia que se añade a otra para aumentar o mejorar cualidades. Sinónimo de aditivo.

Inertinita: Grupo maceral constituido por micrinita, esclerotinita, fusinita y semifusinita.

Interestratificación: Dos o más series de estratos que se interponen unos a otros debido a los cambios de materiales durante la deposición.

L

Lanceolado: Se refiere a la hoja, pétalo u otro órgano laminar que tienen forma de punta de lanza.

Lignito: Variedad de carbón mineral con un contenido en carbono de aproximadamente 70%. Su poder calorífico varía entre 8.4 y 30 MJ/kg. Se diferencian uno más rico en carbono (lignito negro) y otro de menos rico (lignito pardo).

Liptinita: Grupo maceral constituido por esporinita, cutinita y resinita.

Lote: Cantidad de carbón equivalente a la producción de un manto de carbón o a la compra de carbón de un proveedor y del cual se toman las muestras que van a mezclar para obtener la muestra bruta.

M

Maceral: Constituyente de un carbón considerado como roca. Su papel es análogo al de los minerales de las rocas cristalinas.

Materia volátil: En carbones, materia gaseosa que se desprende del carbón cuando éste es sometido a un calentamiento en condiciones determinadas.

Muestra en bruto: Se trata del material que no ha sufrido ningún tipo de beneficio o manufacturación, es decir, es el material tal cual sale de la mina.

N

Nafta: Petróleo crudo líquido.

Nivel freático: 1. Superficie en la que la presión hidráulica es igual a la atmosférica. Es la superficie que separa la parte del subsuelo saturada de agua con presión superior a la atmosférica de la franja capilar. || 2. Nivel al que llega libremente el agua de un pozo y en el que la presión es igual a la presión atmosférica.

O

Orgánica (ref. roca): Es la roca que proviene de la acumulación de restos orgánicos, tales como, fragmentos de huesos (peces, mamíferos, cetáceos, etc.), de conchas calcáreas (coquinas, lumaquelas, etc.), de foraminíferas, diatomeas, restos de plantas (turba, lignito, hulla, antracita, grafito, diamante). Los zoolitos son de origen animal o zoógenas y los fitolitos son de origen vegetal o fitógenas y en general los biolitos son tanto de origen animal como vegetal o biógenas.

Organogénico: Dícese de las rocas sedimentarias de origen orgánico.

P

Pecíolo: Raballo que une la lámina de una hoja al tallo.

Poder calorífico del carbón: Cantidad de calor producido por el carbón durante su combustión a volumen constante.

Poder de coquificación: Razón de desgasificación y de las propiedades plásticas del carbón durante el quemado retardado.

R

Reflectancia: La reflectancia de vitrita es la proporción de luz incidente reflejada desde una superficie de vitrinita pulida. Como la vitrinita se calienta en la tierra durante el entierro, cambia sistemáticamente sus propiedades de reflexión. Estos cambios son causados por el aumento de la condensación de estructuras aromáticas (anillos de carbono) en la matriz de carbón.

S

Stock granítico: Plutón granítico de pequeño tamaño.

T

Tolueno: Hidrocarburo homólogo del benceno. Procede del alquitrán y la brea.

Turba: Producto de descomposición de materias vegetales al quedar enterradas bajo el agua y sedimentos terrígenos. Se produce así una carbonificación lenta, en la que la turba es la primera etapa de la transformación del tejido vegetal en carbón. Es de color pardo amarillento a negro, y conserva la estructura vegetal. El contenido en carbono aumenta aproximadamente del 40%, en el material vegetal original, al 60% en la turba. Tiene poder calorífico inferior a 8.4 MJ/kg.

V

Vitrinita: Grupo maceral constituido por colinita y telinita.

REFERENCIAS

- Adabie V.H. (1981). *Geología de la Sierra Moradillas, Sonora, México*. Tesis de maestría. Universidad Stand Ford, California.
- Águeda, J.A., Bahamonde, J.R., Barba, F.J., Barba, P., Colmenero, J.R., Fernández, L.P., Salvador, C.I. y Vera, C. (1991). *Ambientes de depósito en sucesiones carboníferas westfalianas de la Cordillera Cantábrica, Noreste de España*, en: Bertrand, P. (Editor), *Carbón: Formación, ocurrencia y propiedades relacionadas*. Boletín: Sociedad Geológica de Francia.
- Alencáster, G. (1961). *Estratigrafía del Triásico Superior de la parte norte-central del Estado de Sonora*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Paleontología Mexicana 11, p. 1–18.
- Alexandri, R. (1954). *Archivo técnico: Informe sobre algunos mantos de carbón en Zacualtipán y Tehuiztla, Estado de Hidalgo*. Consejo de recursos no renovables. México, D.F. p.18.
- ASTM D2013. (2012). *Práctica estándar para la preparación de muestras de carbón para análisis*. ASTM International, West Conshohocken, PA. Recuperado de <https://www.astm.org/Standards/D2013.htm>
- ASTM D3172. (2013). *Práctica estándar para el análisis próximo de carbón y coque*. ASTM International, West Conshohocken, PA. Recuperado de <https://www.astm.org/Standards/D3172.htm>
- ASTM D3173. (2017). *Método de prueba estándar para la humedad en la muestra de análisis de carbón y coque*. ASTM International, West Conshohocken, PA. Recuperado de <https://www.astm.org/Standards/D3173.htm>
- ASTM D3174. (2012). *Método de prueba estándar para ceniza en la muestra de análisis de carbón y coque*. ASTM International, West Conshohocken, PA. Recuperado de <https://www.astm.org/Standards/D3174.htm>
- ASTM D3175. (2017). *Método de prueba estándar para materia volátil en la muestra de análisis de carbón y coque*. ASTM International, West Conshohocken, PA. Recuperado de <https://www.astm.org/Standards/D3175.htm>
- ASTM D3180. (2015). *Práctica estándar para el cálculo de análisis de carbón y coque según determinadas bases*. ASTM International, West Conshohocken, PA. Recuperado de <https://www.astm.org/Standards/D3180.htm>
- ASTM D3302. (2017). *Método de prueba estándar para la humedad total en carbón*. ASTM International, West Conshohocken, PA. Recuperado de <https://www.astm.org/Standards/D3302.htm>

- ASTM D388. (2017). *Clasificación estándar de carbones por rango*. ASTM International, West Conshohocken, PA. Recuperado de <https://www.astm.org/Standards/D388.htm>
- ASTM D4239. (2017). *Método de prueba estándar para azufre en la muestra de análisis de carbón y coque usando combustión en horno de tubo a alta temperatura*. ASTM International, West Conshohocken, PA. Recuperado de <https://www.astm.org/Standards/D4239.htm>
- ASTM D5865. (2013). *Método de prueba estándar para el valor calorífico bruto de carbón y coque*. ASTM International, West Conshohocken, PA. Recuperado de <https://www.astm.org/Standards/D5865.htm>
- ASTM D720. (2015). *Método de prueba estándar para el índice de hinchamiento libre del carbón*. ASTM International, West Conshohocken, PA. Recuperado de <https://www.astm.org/Standards/D720.htm>
- ASTM D7708. (2011) *Método de prueba para la determinación de la reflectancia de la vitrinita dispersa en las rocas sedimentarias*. ASTM International, West Conshohocken, PA. Recuperado de <https://www.astm.org/Standards/D7708.htm>
- ASTM VOLUMEN 5.06. (2015). *Combustibles gaseosos, carbón y coque, bioenergía y químicos industriales de biomasa, catalizadores*. ASTM International, West Conshohocken, PA. Recuperado de <https://www.astm.org/BOOKSTORE/BOS/0506.htm>
- Ávila De Santiago, G. (1960). *Geología de los depósitos de antracita de la Sierra San Javier y Santa Clara, municipio de San Javier, Sonora, México*. Facultad de Ingeniería .Tesis de Ingeniería. Universidad Autónoma de México, México.
- Barrera-Moreno, E., Domínguez-Perla. (1987). *Geología de la carta Tonichi (H12D65) con énfasis en el Paleozoico, porción central del Estado de Sonora*. Tesis de maestría. Departamento de Geología. Universidad de Sonora. México.
- Bartolini, C. (1988). *Estructura regional y estratigrafía de la Sierra El Aliso, Sonora central, México*. Tesis de maestría. Universidad de Arizona, Tucson.
- Bartolini, C., Stewart, J.H, Carter, C., Murchey, B.L. y Repetski, J.E. (1989). *Estratigrafía de estratos eugeoclinales del Paleozoico en Sierra El Aliso, Sonora central, México*. Universidad de Sonora. Boletín: Departamento de Geología, Segunda Época, V.6, No. 1 y 2, p. 11-21
- Bartolini, C., Morales, M., Damon, P. y Shafiqullah. (1991). *Geología y geocronología de la Sierra Lista Blanca, centro de Sonora, México*: Reporte en proceso. Universidad de Sonora. Boletín: Departamento de Geología, V.8, No. 1, p. 1-5.

- Burckhardt, C. (1930). *Estudio sintético sobre la primera parte del Mesozoico mexicano*. Sociedad Suiza de Paleontología. Vol. 49, p. 39-42.
- Bustin, R.M., Barnes, M.A. y Barnes, W.C. (1985). *Cuantificación y modelado de la diagénesis orgánica*. Geociencias Canadá. V. 12, no.1, p. 4-21.
- Calder, J.H., Gibling, M.R. y Mukhopadhyay, P.K. (1991). *Formación de turba en las inmediaciones de Westfalia, cuenca de Cumberland, Nueva Escocia: implicaciones para las interpretaciones de macerales*. Boletín: Sociedad Geológica de Francia.
- Chen P., Ma J. (2002). *Características petrográficas de los carbones chinos y su aplicación en el proceso de utilización de carbón*. Revista Fuel. Vol. 81, p. 1389-1395.
- Clayton, J.L. (1998). *Geoquímica del gas asociado a la capa de carbón*. Revista Internacional de Geología de Carbón. Vol. 35, p. 159-173.
- Cojan I., Potter P.E. (1991). *Ambiente deposicional, petrología y procedencia de la Formación Santa Clara, Grupo Barranca: Triásico Superior, este de Sonora, México*. Sociedad Geológica de América. Publicación especial. Vol. 254, p. 37-51.
- Coordinación General de Minería. (2014). *Perfil del mercado del carbón*. Dirección General de Desarrollo Minero. Secretaría de economía. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/5564/pm_carbon_2014.pdf
- Corona-Esquivel, R., Tritlla, J., Benavides-Muñoz, M.E., Piedad-Sánchez, N. y Ferrusquía-Villafranca, I. (2006). *Geología, estructura y composición de los principales yacimientos de carbón mineral en México*. Boletín: Sociedad Geológica Mexicana. Tomo LVIII. n. 1, p. 141-160.
- Cortes, V. (2001). *Libro verde de la energía: el papel de los combustibles fósiles*. Club Español de la Energía.
- Diessel, C.F.K. (1986). *Correlación entre facies de carbón y ambientes deposicionales. Avances en el estudio de la cuenca de Sydney: Newcastle, Australia*. Memorias del XX Simposio de Newcastle. Universidad de Newcastle.
- Diessel, C.F.K. (1992). *Sistemas deposicionales portadores de carbón*. Berlín: Springer. ISBN 3 540 52516 5.p. 721.
- Dumble, E.T. (1900). *Notas sobre la geología de Sonora, México*. Transcripciones de la Sociedad de Ingenieros de Minas del Instituto Americano de Minería, Ingenieros Metalúrgicos y del Petróleo. Vol. 29, p. 122-152.
- Durán, M.H. y Chairez, B.J. (1993). *Exploración e inventario minero por carbón en la región carbonífera de Coahuila*. Memorias de la XX Convención de la AIMMGM, Acapulco, Gro., México.

- ECOCARBÓN. (1995). *Normas generales sobre muestreo y análisis de carbones*. Gerencia de planificación de carbón, división análisis de reservas. Santafé de Bogotá D.C. Vol. 1.
- Ferrari, L., Valencia-Moreno, M. y Bryan, S. (2005). *Magmatismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margen occidental de Norteamérica*. Boletín: Sociedad Geológica Mexicana. Volumen Conmemorativo del Centenario Temas Selectos de la Geología Mexicana. Tomo LVII, núm. 3, p. 343-378.
- Flores-Galicia, E. (1988). *Geología y reservas de los yacimientos de carbón en la República Mexicana*, en Salas, G.P. (Editor) Geología de México: México. Fondo de Cultura Económica.
- Flores, K., Monreal, R., Rodríguez A., Torres, J.M., Ramírez, M., Esquivel, C., Muñoz, J.L. (2016). *Geología y geoquímica de la cuenca carbonífera de la zona de San Javier -Tecoripa, Sonora (México)*. XXVI Congreso Nacional de Geoquímica. ISSN-Latindex 2310-2799. Vol. 22, p. 150-152.
- Henry, C.D. y Aranda-Gómez, J.J. (2000). *La interacción de placas y su control durante el Mioceno tardío, sobre el proto-Golfo y la provincia Basin and Range*. Tectonofísica. Vol. 318, p. 1–26.
- Hernández, J. M. (2012). *Evaluación de cristalinidad y grado de grafitización de los mantos de grafito en Sonora Central, utilizando espectroscopía MicroRAMAN*. Tesis de maestría. Departamento de Geología. Universidad de Sonora. México.
- Kabe, T., Ishihara, A., Qian, E.W., Sutrisna I.P. y Kabe, Y. (2004). *Carbón y compuestos relacionados con el carbón: estructuras, reactividad y reacciones catalíticas en Estudios en ciencia de superficie y catálisis*. Kodansha. Tokyo. Vol.150. p. 335.
- King, R.E. (1939). *Reconocimiento geológico en el norte de la Sierra Madre Occidental*. Boletín: Sociedad Geológica Americana. Vol.50, p. 1625-1722.
- McDowell, F.W., Roldán-Quintana, J. y Connelly, J.N. (2001). *Duración del magmatismo del Cretácico tardío- Terciario temprano en la porción este-centro Sonora, México*. Boletín: Sociedad Geológica Americana. Vol. 113, p. 521–531.
- Montijo-Contreras, O. (2007). *Estratigrafía y depósitos de grafito del Grupo Barranca, área La Lourdes-La Cumbre; La Colorada, Sonora, México*. Instituto de Geología, Estación Regional del Noroeste. Tesis de maestría. Universidad Autónoma de México, México.
- Philp, R.P. (1994). *Características geoquímicas de los aceites derivados predominantemente de materiales de origen terrígeno*, en Scott, A.C. y Fleet, A.J. (Editores), Carbón y rocas carbonosas como fuentes propensas de petróleo. Sociedad Geológica de Londres. Publicación especial.

- Potter, P.E., Cojan, I. (1985). *Descripción e interpretación de la sección tipo del Grupo Barranca, al este de Rancho La Barranca, municipio de San Javier, Sonora*. Instituto de Geología. UNAM. Congreso Latinoamericano de Paleontología, 3, Oaxtepec, Mor., México. Memoria, p. 101-105.
- Prothero, D.R. y Schwab F. (1996). *Geología sedimentaria: Una introducción a las rocas sedimentarias y la estratigrafía*. New York: W.H. Freeman and Company, p. 575.
- Radelli, L., Menicucci, S., Mesnier, H., Calmus, T., Amaya-Martinez, R., Barrera, E., Domínguez, E., Navarro, L., Soto, L. (1987). *Cuerpos alóctonos paleozoicos del centro de Sonora*. Boletín: Departamento de Geología. Universidad de Sonora. Vol. 4, p. 1-15.
- Roldán-Quintana, J. y McDowell, F.W. (1992). *La Formación Báucarit en el área de Río Yaqui, Municipio de Onavas, Sonora*. Sociedad Geológica de El Paso. Guía para la Conferencia de Campo de 1992, p. 223-228.
- Ruiz, C. y Saucedo, S. (2016). *Caracterización geotécnica de macizos rocosos en la zona carbonífera de San Javier, Sonora centro-este, México*. Tesis de maestría. Departamento de Geología. Universidad de Sonora. México.
- Salas, G. y Benavides, L. (1976). *La exploración y las reservas mexicanas de carbón*. Instituto Latinoamericano del Fierro y el Acero (ILAFSA), en Congreso: Usos del carbón en siderurgia: abastecimiento y tecnologías. México DF.
- Sánchez, M.T. (1995). *La minería del carbón y su impacto geográfico-económico en el centro-oriente y noreste de Coahuila, México*. Investigaciones geográficas. Instituto de Geografía. UNAM. Boletín núm. 31. p. 93-112.
- Servicio Geológico Mexicano. (2004). *Carta geológico-minera Tecoripa H12-D64 y carta geológico-minera Tónichi H12-D65*. Secretaría de Economía. México.
- Silva-Pineda, A. (1961). *Flora fósil de la Formación Santa Clara (Cárnico del Estado de Sonora)*. Instituto de Geología. Paleontología Mexicana. UNAM. Núm. 11, Parte II, p. 37.
- Soto-Contreras, L.A., Navarro-Martínez, L.A. (1987). *Geología de la carta Tecoripa (H12D64) porción este-central del Estado de Sonora; nuevas contribuciones paleozoicas*. Tesis de maestría. Departamento de Geología. Universidad de Sonora.
- Speight, J.G. (1994). *La química y la tecnología del carbón*. (2nd ed), New York: G.J. Antos.
- Stach, E., Mackowsky, M.Th., Teichmüller, M., Taylor, GH, Chandra, D. y Teichmüller, R. (1982). *Libro de texto de la petrología del carbón de Stach*. Gebrüder Borntraeger,

Stuttgart,Alemania.

- Stewart, J. H. y Roldán-Quintana, J. (1991). *Triásico Superior: Grupo Barranca, depósitos de cuencas rift no marinas y poco profundas del noroeste de México*, en Pérez-Segura, E. y Jacques-Ayala, C. (Editores), Estudios de la geología de Sonora. Sociedad Geológica Americana. Publicación especial. No.254, p. 19-36.
- Universidad de Granada. (2018). *Petrografía del Carbón*. Instituto Nacional del Carbón. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Recuperada de <https://petrografiicarbon.es/introduccion/rango-carbon/>
- Vassallo, L.F. (1985). *Sobre la evolución geológica de la parte central del Estado de Sonora, México y su relación con los depósitos de grafito*. Instituto de Geología, Estación Regional del Noroeste. UNAM. p. 101-114.
- Weber, R. (1980). *Mega fósiles de coníferas del Triásico tardío y del Cretácico tardío de México y consideraciones generales sobre las coníferas mesozoicas de México*. Instituto de Geología. UNAM. Revista. Vol. 4, Núm. 2, p. 111-124
- Weber, R., Zambrano-García, A., Amozurrutia-Silva, F. (1980). *Nuevas contribuciones al conocimiento de la tafoflora de la Formación Santa Clara (Triásico tardío) de Sonora*. Instituto de Geología. UNAM. Revista. Vol. 4 Núm. 2, p. 1258-137.
- Weber, R. (1985). *Las plantas fósiles de la Formación Santa Clara (Triásico tardío, Sonora, México): estado actual de las investigaciones*, en: Weber, R. (Editor.). III Congreso Latinoamericano Paleontológico México. Simposio Floras Triásico Tardío, Fitogeografía y Paleoecología. Mem., p. 107-124.
- Wilkins R.W.T. y George S.C. (2002). *El carbón como roca fuente de petróleo*. Revista Internacional de Geología de Carbón. Vol. 50, p. 317-361.
- Wilson, E.I. y Rocha, S.V. (1949). *Depósitos de carbón del distrito de Santa Clara cerca de Tonichi, Sonora, México*. Boletín de estudio geológico de Estados Unidos. No.962- A, p. 80.