



# Instituto Politécnico Nacional

---

Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias  
Extractivas

Departamento de Ingeniería Química Petrolera

**“Estudio de colectores para lavado de carbón coquizable”**

## **TESIS**

Para obtener el título de

Ingeniero Químico Petrolero

## **Presenta:**

Mirla Benavides Rojas

Director de tesis

M. en C. Miguel Hesiquio Garduño



**T-157-16**

Ciudad de México, 3 de noviembre del 2016.

A la C. Pasante:  
**MIRLA BENAVIDES ROJAS**

Boleta:  
**2011320071**

Carrera:  
**IQP**

Generación:  
**2011-2015**

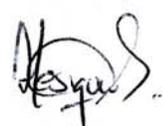
Mediante el presente se hace de su conocimiento que la Subdirección Académica a través de este Departamento autoriza que el **C. M. en C. Miguel Hesiquio Garduño**, sea asesor en el tema que propone usted desarrollar como prueba escrita en la opción **Tesis Individual**, con el título y contenido siguiente:

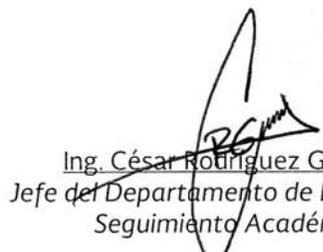
***“Estudio de colectores para lavado de carbón coquizable”.***

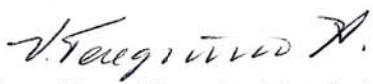
Resumen.  
Introducción.  
I.- Generalidades.  
II.- Desarrollo experimental.  
III.- Análisis de resultados.  
Conclusiones.  
Referencias.

Se concede un plazo máximo de un año, a partir de esta fecha, para presentarlo a revisión por el Jurado asignado.

  
Dr. José Felipe Sánchez Minero  
Presidente de la Academia de  
Conocimientos Científicos.

  
M. en C. Miguel Hesiquio Garduño  
Director de Tesis  
Ced. Prof. 2901155

  
Ing. César Rodríguez Guerrero  
Jefe del Departamento de Evaluación y  
Seguimiento Académico.

  
Ing. Víctor Manuel Feregrino Hernández  
Subdirector Académico

**T-157-16**

Ciudad de México, a 7 de diciembre de 2016

A la C. Pasante:  
**MIRLA BENAVIDES ROJAS**  
**PRESENTE**

Boleta:  
**2011320071**

Carrera:  
**IQP**

Generación:  
**2011-2015**

Los suscritos tenemos el agrado de informar a usted, que habiendo procedido a revisar el borrador de la modalidad de titulación correspondiente denominado:

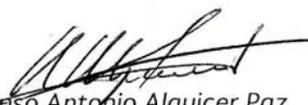
**"Estudio de colectores para lavado de carbón coquizable".**

encontramos que el citado Trabajo de **Tesis Individual**, reúne los requisitos para autorizar el Examen Profesional y **PROCEDER A SU IMPRESIÓN** según el caso, debiendo tomar en consideración las indicaciones y correcciones que al respecto se le hicieron.

Atentamente  
**JURADO**

  
Ing. Estelio R. Baltazar Cadena  
**Presidente**

  
M. en C. René Hernández Mendoza  
**Secretario**

  
Ing. Alfonso Antonio Alquicer Paz  
**1er. Vocal**

  
M. en C. Miguel Hesiquio Garduño  
**2º Vocal**

  
Dra. Carmen Magdalena Reza San Germán  
**3er. Vocal**



---

## Dedicatorias

Agradezco a Dios infinitamente, por rodearme de gente que siempre ha estado a mi lado alentándome a cumplir mis metas.

### **A MIS PADRES:**

**Israel Benavides Pineda y Guadalupe Rojas Hernández**, que han sido unos padres ejemplares, quienes siempre me han brindado ese amor incondicional, apoyo y al igual que yo han hecho sacrificios para cumplir una de mis metas, que es el llegar hasta aquí. Gracias por esas palabras de apoyo y comprensión que me han hecho ser la mujer que soy ahora, solo me queda decir que son los seres a quienes más AMO.

### **A MIS HERMANOS:**

**Andrea Benavides Rojas y Diego Benavides Rojas**, le agradezco a mis pequeños por estar siempre conmigo y brindarme su cariño en todo momento, así como su apoyo incondicional, los adoro pequeños.

### **A MI NOVIO:**

**Marcos Morales Barrientos**, te agradezco infinitamente por estar conmigo en todo momento en las buenas y en las malas durante estos últimos meses de mi carrea, gracias por hacerme forma parte de tu vida, porque no solo eres mi novio eres y serás mi mejor amigo, el cual comparte mis locuras sin juzgarlas. Gracias por esas palabras de aliento cuando más lo necesite, eres lo mejor que me ha pasado.

### **A MIS AMIGOS:**

**Karen Sánchez, Catalina Cuevas, Brian Barber y Daniel Geniz**, por siempre estar conmigo, y brindarme su valiosa amistad. Gracias por estar conmigo en la mejor etapa de mi vida, los quiero como la segunda gran familia que son para mí.

---



---

## Agradecimientos

Le agradezco infinitamente al M. en C. Miguel Hesiquio Garduño, por todo el apoyo que me ha brindado durante mi carrera, así como compartir conmigo el conocimiento y palabras de aliento. Le agradezco por hacerme formar parte de su vida profesional haciendo su colega desde el momento en que fui su tesista. Gracias por su paciencia y su buen sentido del humor de ver las cosas.

A la Ing. Mariana Álvarez del CIITEC, por apoyarme durante esta investigación.

A los Ingenieros Miguel Ángel González González, Javier Fernández Casas, José Luis Muñoz y Ramiro Alarcón, por recibirme durante mi estancia en la Planta de Minera México, en Nueva Rosita, Coahuila, les agradezco su tiempo y conocimiento brindado.

---



## Índice

	<b>Páginas</b>
Resumen	IV
Introducción	V
I.- Generalidades	1
I.1.- Origen del carbón	2
I.1.1.- Tipos de carbón	3
I.2.- Identificación y evaluación de zonas de explotación	7
I.3- Extracción de carbón	9
I.3.1.- Extracción subterránea	9
I.3.2.- Extracción de superficie	10
I.4.- Procesamiento	11
I.5.- Caracterización del carbón	13
I.6.- Preparación del carbón	19
I.6.1.- Limpieza del carbón	20
I.6.2.- Tipos de limpieza	21
I.6.3.- Metodología de limpieza física	21
I.7.- Proceso de lavado general	22
I.7.1.- Descripción de proceso general, Planta Lavadora Signum Coahuila	22
I.8.- Proceso o método de flotación	26
I.8.1.- Flotación por espuma	27
I.8.2.- Definición espumas	29
I.8.3.- Surfactantes o colectores	30
I.8.4.- Modificadores	31



---

I.9.- Técnicas de caracterización	32
I.9.1.- Espectroscopia de infrarrojo (IR)	32
I.9.2.- Difracción de Rayos X	34
II.- Desarrollo Experimental	37
II.1.-Caracterización por pruebas estandarizadas (ASTM) a muestras iniciales	38
II.1.1.- Trituración y tamizado de las muestras de carbón	38
II.1.2.- Preparación del carbón	38
II.1.3.- Determinación de cenizas y humedad	38
II.2.- Materiales	38
II.2.1.- Carbón	38
II.2.2.- Colectores	39
II.2.3.- Espumantes	40
II.3.- Caracterización estructural y molecular (IR y DRX)	41
II.3.1 Experimentación a escala de laboratorio	41
III.- Análisis de Resultados	43
III.1 Análisis estandarizados	44
III.2 Espectroscopia de Infrarrojo para los (CTU)	45
III.3 Resultados de los difractogramas para los sistemas de lavado de (CTU)	53
III.4 Pesos iniciales, de flotación y de fondo de cada lavado	58
Conclusiones	
Referencias	
Anexos	

---



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.- Formación del carbón	3
Figura 2.- Tipos de carbón	4
Figura 3.- Central termoeléctrica, Nava Coahuila	5
Figura 4.- Planta siderúrgica. AHMSA, Monclova Coahuila	6
Figura 5.- Diagrama de clasificación y uso según el tipo de carbón	7
Figura 6.- Cuencas carboníferas del estado de Coahuila	8
Figura 7.- Tajo Conquista, extracción a cielo abierto	10
Figura 8.- Tajo Lavadora con sus mantos	11
Figura 9.- Diagrama de la caracterización del carbón	12
Figura 10.- Determinación del F.S.I del carbón	15
Figura 11.- Tabla de perfiles estándar escala 1:1 para la determinación del F.S.I del carbón	16
Figura 12.- Equipo de análisis de azufre del carbón	17
Figura 13.- Esquema general de procesamiento del carbón	19
Figura 14.- Diagrama de flujo de proceso de planta de limpieza típica de carbón	20
Figura 15.- Diagrama general de proceso del carbón desde la llegada de mina o tajo a planta lavadora	25
Figura 16.- Diagrama del circuito de finos. IMMSA	24
Figura 17.- Diagrama de lavado de carbón, desde celdas de flotación	25
Figura 18.- Sistema de flotación	26
Figura 19.- Esquema estructural de flotación por espuma	28
Figura 20.- Simulación de un proceso de flotación	29
Figura 21.- Interacción del surfactante con el mineral a lavar	31



---

Figura 22.- Esquema básico de instrumento de IR	33
Figura 23.- Interacción entre los rayos X y la estructura cristalina de un material	34
Figura 24.- Difractómetro D8 Eco del CIITEC	35
Figura 25.- Tarjeta de DRX	36
Figura 26.- Diagrama de lavado de carbón detallado	41
Figura 27.- Espectrograma de las muestras de Carbón todo uno	46
Figura.28.- Espectrograma de lavado de carbón 2949 con petróleo-pino	47
Figura 29.- Espectrograma de lavado de carbón 2949 con diesel-pino	48
Figura 30.- Espectrograma de lavado de carbón 2949 con petróleo-dodecil	49
Figura .31.- Espectrograma de lavado de carbón 2949 con diesel-dodecil	50
Figura 32.- Difractograma de carbón 2949 CTU, antes de ser pasar por el proceso de lavado de carbón	53
Figura 33.- Difractograma del carbón 2949, lavado con petróleo-pino	54
Figura .34.- Difractograma del carbón 2949, lavado con diesel-pino	55
Figura 35.- Difractograma del carbón 2949, lavado con petróleo-dodecil	56
Figura 36.- Difractograma del carbón 2949, lavado con diesel-dodecil	56



## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Carbones extraídos de la subcuenca de las Esperanzas	39
Tabla 2 Colectores utilizados en la experimentación	39
Tabla 3 Espumantes utilizados en la experimentación	40
Tabla 4. Matriz del uso de colectores y espumantes	40
Tabla 5. Resultados de Análisis Estandarizados	44
Tabla 6: Interpretación cualitativa del espectro	45
Tabla 7. Tabla de longitudes de onda de lavado del carbón 2949 Tajo 4 IR	51
Tabla 8 fases identificadas por DRX	57
Tabla 9 Lavado con petróleo-pino	58
Tabla 10 Lavado con diesel-pino	58
Tabla 11 Lavado con petróleo-dodecil	59
Tabla 12 Lavado con diesel-dodecil	59



---

## RESUMEN

Se realizó el estudio de un sistema para lavado de carbón, fundamentado en la constante búsqueda de la industria del carbón para mejorar su proceso por medio de colectores. Este tuvo lugar en el laboratorio del departamento de Ingeniería Química Petrolera de la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, con el propósito de realizar la evaluación de colectores para el lavado de carbón en un proceso de flotación por espuma, donde se encontró que este proceso es el adecuado para la remoción de minerales no deseados contenidos en el carbón.

Para dicha experimentación se utilizó petróleo y diesel como colectores así como aceite de pino y dodecil bencen sulfonato de sodio como agentes espumantes. El carbón empleado pertenece a la categoría de lignito a carbón sub-bituminoso. Las muestras fueron caracterizadas por métodos estandarizados (ASTM), tales como humedad, ceniza, materia volátil.

Para la evaluación de las muestras, después de ser lavadas, fue necesario emplear métodos no estandarizados tales como DRX e IR, para la interpretación del desempeño del colector y espumante en las muestras de carbón.

Con los resultados obtenidos posteriores a la experimentación antes descrita, se concluye que de los colectores y espumantes evaluados, el que mejor rendimiento presentó de acuerdo a los porcentajes de recuperación de carbón tras el proceso de lavado, fue el sistema petróleo-pino, obteniendo el 50% de recuperación de carbón.



---

## INTRODUCCIÓN

La preparación de carbón, que también puede ser llamado lavado o limpieza de procesamiento, es el método por el que las materias primas de carbón se acondicionan con el fin de reducir costos de transporte, mejorar las propiedades de utilización y minimizar los impactos ambientales [1].

La necesidad del proceso de lavado se puede atribuir al hecho de que los carbones recién extraídos contienen una mezcla heterogénea tanto orgánica (carbonosa) como inorgánica (mineral). La materia inorgánica incluye materiales no combustibles como pizarra, silicatos y arcilla. Estas impurezas reducen el poder calorífico del carbón, dejan un residuo de ceniza indeseable y aumentan el costo de transporte de carbón al mercado. La presencia de humedad en la superficie también reduce el valor del poder calorífico y puede conducir a problemas de manipulación para los consumidores. Por lo tanto, en esencia todos los contratos de suministro de carbón con las centrales eléctricas imponen limitaciones estrictas sobre el contenido de energía específica (calor, cenizas y humedad) de carbón comprado. Las plantas de preparación de carbón buscan mejorar la aceptabilidad ambiental de carbón mediante la eliminación de impurezas que puedan ser transformadas en los contaminantes gaseosos o de partículas nocivas cuando se quema. Estos contaminantes incluyen típicamente partículas (cenizas) y dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), así como trazas de elementos tóxicos, como el mercurio.

La presencia de impurezas minerales influye en la idoneidad de carbón para la gran variedad de usos, como la fabricación de coque metalúrgico o generación de productos petroquímicos y combustibles sintéticos. Como tal, la preparación de carbón es necesaria para alcanzar los altos niveles de pureza de carbón exigidos por estos mercados secundarios.

Se necesitan mejoras en la tecnología de separación y prácticas para proporcionar una mayor reducción de la generación de residuos y el impacto ambiental. Estas mejoras también pueden generar ingresos adicionales debido a la recuperación del carbón utilizable a partir de los flujos de residuos, lo que podría



---

proporcionar un incentivo financiero para la industria del carbón. Por ello se buscan procesos de lavado más eficientes y menos contaminantes.

El proceso de lavado de carbón, a grandes rasgos, requiere de sistemas mecánicos, separación por flotación, y, en la última etapa, se obtienen partículas finas que deben recuperarse mediante flotación con uso de colectores y agentes espumantes.

Por lo anterior, el objetivo de esta investigación es describir el proceso del lavado de carbón a nivel industrial en México, ensayar un sistema de colector-espumante que sea eficiente, de bajo costo y que mejore el rendimiento de la producción de flotación del carbón para la última etapa que comprende el procesamiento de partículas finas.

En particular se buscará, un sustituto del diesel que permita obtener una mayor eficiencia en el proceso de flotación de la fracción ultra fina del carbón, así como un menor impacto ambiental a nivel industrial, así como un sustituto de espumante.

# I Generalidades





## I.1 Origen del Carbón

La formación de carbón comenzó durante el periodo carbonífero, conocido como la primera era del carbón, que comprende desde hace 360 millones de años hasta hace 290 millones de años.

El carbón es un tipo de mineral formado por el elemento químico carbono mezclado con otras sustancias. Es una de las principales fuentes de energía, es un mineral combustible, sedimentario y de origen orgánico, compuesto principalmente por carbono, hidrógeno y oxígeno. El carbón es de color marrón a negro, compuesto por material orgánico e inorgánico, se formó a partir de la vegetación (musgos, helechos, arbustos, árboles), los depósitos de lodos y otros sedimentos. La calidad de cada depósito de carbón se determina por el tiempo y condiciones geológicas de formación y se denomina también “madurez orgánica”. Junto con los movimientos en la corteza terrestre (conocidos como movimientos tectónicos) enterraron estos pantanos, formando las vetas de carbón [2]. Al quedar enterrado, el material vegetal provocó cambios físicos y químicos en la vegetación, transformándola en turba. La turba se convierte en lignito, que es bastante blando y su color puede variar de negro oscuro a diferentes tonalidades de marrón, ambos materiales son tipos de carbón con una madurez orgánica baja. **(Figura 1).**

Los cambios en el lignito, aumentan progresivamente su madurez orgánica transformándolo en la gama de carbones denominados “sub-bituminosos”. El estudio a nivel microscópico revela la falta de homogeneidad, mostrando que las diferentes áreas de la estructura de carbón tienen una apariencia diferente. Se produjeron más cambios químicos y físicos hasta que estos carbones se hicieron más duros y negros, formando los carbones “bituminosos” o carbones minerales. En las condiciones adecuadas, el aumento progresivo de la madurez orgánica pudo continuar, formando finalmente la antracita. [3]

Los componentes orgánicos de carbón se clasifican en seis grupos, denominados macerales: vitrinita, exinita, resinita, semifusinita, micrinita y fusinita. Los tres primeros son macerales reactivos (con relativa facilidad de reaccionar con hidrógeno u oxígeno) y los otros tres son relativamente inertes. La mayoría de los carbones son anillados, es decir, muestran una estructura de bandas (aromáticas o alifáticas).

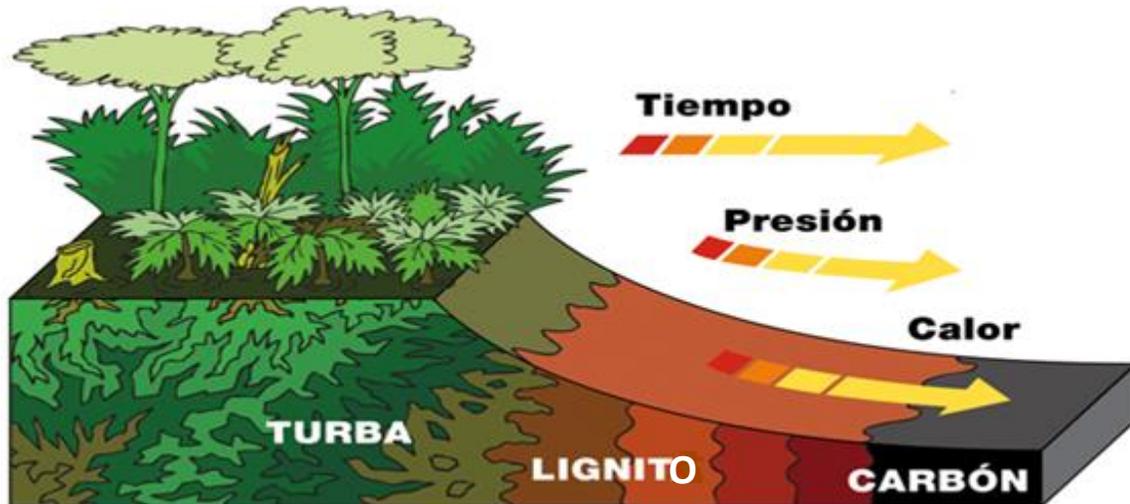


Figura 1. Formación del carbón

### I.1.1 Tipos de carbón

El índice de cambio sufrido por un carbón al madurar parte de la turba: inicio de la formación del carbón, hasta la antracita el cual es el carbón más puro que puede obtenerse en la naturaleza, este proceso de transformación conocido como carbonificación, tiene una gran importancia en las propiedades físicas y químicas y se denomina "nivel" o "rango" del carbón. El "rango" de un carbón es una medida de cuánto cambio se ha producido. El término "metamorfismo orgánico" es utilizado para este cambio. La composición y propiedades de los carbones están asignados a una progresión de rango que corresponde a su grado de metamorfismo orgánico.

Los carbones de rango bajo, como el lignito y los carbones sub-bituminosos son normalmente más blandos y desmenuzables, con un aspecto más mate y terroso. Se caracterizan por niveles de humedad altos y bajo contenido en carbono, por lo que su contenido energético también es bajo. [3]

Los carbones de rango alto suelen ser más duros y resistentes y a menudo tienen un color más negro y vítreo. Contienen más carbono, menos humedad y producen más energía. La antracita se encuentra en el rango superior de la escala de categorías y tiene un contenido superior de carbono y energía y un nivel inferior de humedad (Figura 2).



Figura 2: Tipos de carbón

Para la utilización del carbón se necesitan conocer ciertos parámetros que el mercado exige, principalmente el poder calorífico, donde los carbones de bajo rango tienen un valor bajo, dentro de esta clasificación encontramos a los carbones sub-bituminosos y los lignitos. Por el contrario, los carbones de alto rango poseen un valor de poder calorífico alto dentro de esta clasificación encontramos bituminosos y antracíticos [5].

- **Carbón térmico**

El carbón térmico tiene alto contenido de energía por lo tanto es significativo para la generación de la electricidad, entre mayor sea el contenido de carbón más bajo contenido de humedad se obtiene un mayor contenido energético. Es considerado en términos generales como un semiconductor debido a los anillos bencénicos y radicales libres. El principal uso del carbón térmico corresponde a las centrales termoeléctricas.

En México, en la ciudad de Nava, Coahuila, se encuentran instaladas dos centrales Carboeléctricas.

La Central Termoeléctrica José López Portillo en Nava Coahuila, puesta en servicio el 21 de septiembre de 1982, tiene una capacidad instalada efectiva de 1200 MW en cuatro unidades generadoras de 300 MW cada una, la generación anual promedio es de 9, 200,000 MWH con un consumo de carbón de 5, 300,000 ton, situándose así entre las mejores a nivel nacional lo cual le ha ganado varios reconocimientos por su eficiencia en el Sistema Nacional.

La Central Termoeléctrica Carbón II que inició su operación el día 2 de noviembre de 1993, es la segunda central en gran escala construida en México que utiliza el carbón mineral no coquizable como fuente primaria de energía. La central carboeléctrica II cuenta con cuatro unidades generadoras con capacidad de 350 MW cada una, para un total de 1400 MW. Por lo que es en la actualidad la mayor central termoeléctrica a base de carbón de América Latina, produciendo aproximadamente el 10% de la capacidad efectiva instalada de generación para la Comisión Federal de Electricidad (CFE) [8]. En la **Figura 3** se muestra una panorámica de ésta central.



**Figura 3. Central carboeléctrica, Nava Coahuila.**

- **Carbón metalúrgico**

El carbón metalúrgico se caracteriza principalmente por ser coquizable, es decir, cuando se somete a altas temperaturas en ausencia de aire, se obtiene un sólido que recibe el nombre de coque. El coque es un combustible sólido obtenido por destilación a partir de carbones coquizables, los cuales permiten su ablandamiento, licuefacción y solidificación, siendo importantes los elementos que lo integran ya que estos carbones deben ser bajos en contenido de azufre y fósforo.

Este carbón se utiliza principalmente en las plantas siderúrgicas. En el país la industria llamada Altos Hornos de México S.A por sus siglas AHMSA es la mayor siderúrgica del país.

Opera una extensa cadena industrial desde la extracción de minerales de hierro y carbón hasta la manufactura de diferentes aceros.

Cuenta con dos plantas siderúrgicas en la ciudad de Monclova, que cubren una extensión de 1,200 hectáreas, opera a un ritmo cercano de 5 millones de toneladas anuales de acero líquido. Ver **Figura 4**.



**Figura 4. Planta siderúrgica. AHMSA, Monclova Coahuila.**

El consumo de carbón a nivel mundial, según la Administración de Información de Energía de EE.UU [25], el carbón representa el 28% del consumo de energía del mundo. En China, sin embargo, este índice asciende al 70%, es decir, consume casi tanto carbón como el resto del mundo junto (49,12%) y cuatro veces más que Estados Unidos, que ocupa el segundo puesto (10,52%) en el ranking mundial del consumo. India ocupa el tercer lugar (8,81%), seguido de Rusia (3,25%) y Alemania (3,19%) y el consumo o producción en México, no está contemplado en dicha lista.

La clasificación del carbón más utilizada es de acuerdo a su contenido en carbono. Así, de mayor a menor por ello los carbones son clasificados, para definir sus rendimientos dependiendo del tipo de carbón, este tendrá un uso específico como se describió anteriormente. En la Figura 5, se muestra esquema general de los tipos de carbón y sus usos.

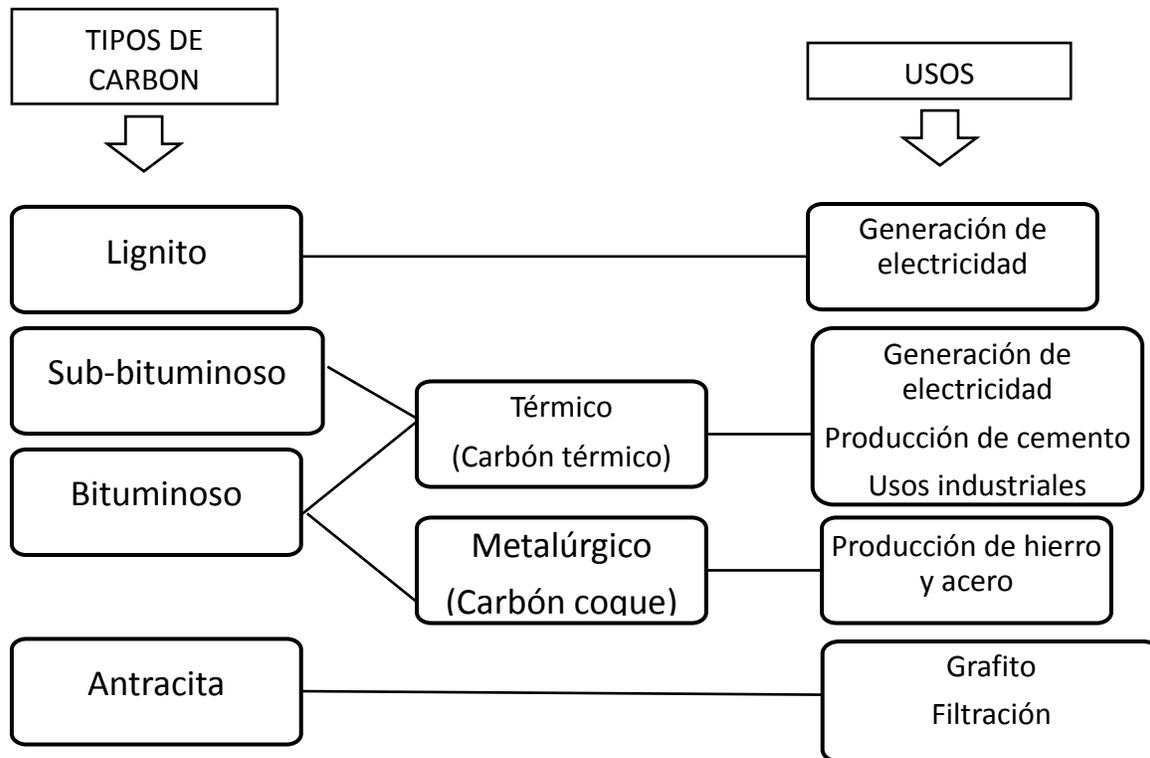


Figura 5. Diagrama de clasificación y uso según el tipo de carbón

## 1.2 Identificación y evaluación de zonas de explotación

Las reservas de carbón se descubren mediante actividades de exploración. El proceso suele suponer la creación de un mapa geológico de la zona, la realización de estudios geoquímicos y geofísicos y una perforación de exploración. Esto permite obtener una imagen precisa de la zona que se pretende desarrollar.

La zona sólo se convertirá en una explotación si hay suficiente carbón y de una calidad adecuada para que sea rentable su extracción. Una vez confirmados estos datos, se inician las operaciones de extracción.

En México se tienen varias cuencas carboníferas, principalmente en el norte del país, uno de los estados con dos de las cuencas más importantes es Coahuila, donde se tienen ocho subcuencas. Entre ellas, la de Sabinas es conocida debido a su extensa explotación de carbón, tiene aproximadamente 62 kilómetros de longitud, seguida por la subcuenca de Esperanzas localizada al poniente de Sabinas. La distribución de dichas zonas se muestra en la **Figura 6**).

El carbón de estas subcuencas es de tipo sub-bituminoso por lo que requiere ser acondicionado para su transformación en coque, ya que tiene volatilidad de media a baja.

### Cuencas Carboníferas



Figura 6. Cuencas Carboníferas del estado de Coahuila. [7]



---

## **I.3 Extracción de carbón**

Para la extracción del carbón existen dos métodos: en superficie o “a cielo abierto” y mediante extracción subterránea o “de profundidad”.

La selección del método de extracción viene determinada por la geología del depósito carbonífero.

### **I.3.1 Extracción subterránea**

La minería subterránea consiste en la extracción y transporte del material a través de túneles y galerías que alcanzan la superficie en donde se busca un mínimo de movimiento de material estéril.

El mineral se extrae perforando horizontalmente y avanzando a lo largo de un frente de explotación múltiple dejando espacios vacíos o cámaras detrás de él. Los pilares (secciones de roca) se van dejando entre las cámaras para evitar el hundimiento del techo. El resultado suele ser un diseño regular de cámaras y pilares con un tamaño que depende de la estabilidad del estrato rocoso, pero con el objetivo de extraer la mayor cantidad posible de mineral. El sistema de pilares resulta muy eficaz, la seguridad depende de la altura de las cámaras y de las normas de control de suelos.

Para tal fin, es necesario un cuidadoso análisis previo de factores, como la resistencia de los pilares o la resistencia de los estratos del techo. Los anclajes en la roca se utilizan habitualmente para aumentar la resistencia de la roca en los pilares. Las cámaras entre pilares sirven de paso para los camiones que transportan el mineral al almacén de la mina.

El frente en este tipo de minas se perfora como en el caso de las galerías. El ancho y alto del tajo dependen del tamaño de la galería, que puede ser bastante grande. En las minas de altura normal se utilizan grandes trenes perforadores y máquinas compactas cuando el mineral presenta un grosor inferior a 3.0 m.

El yacimiento se explota gradualmente desde la parte superior, lo que permite asegurar el techo a una altura adecuada para los mineros. Las secciones inferiores se extraen en estratos horizontales perforando barrenos planos y realizando la voladura contra el espacio superior. El mineral se carga en camiones en el frente. Normalmente, se utilizan retroexcavadoras convencionales. En las minas de poca altura se utilizan camiones y vehículos especiales.

### I.3.2 Extracción de superficie

La minería a cielo abierto se caracteriza por los grandes volúmenes de materiales que se deben mover; la disposición del yacimiento y el recubrimiento del material estéril (arcillas, pizarras, sulfuros, maderas), determinan la relación estéril/mineral que se debe extraer [4]. Las explotaciones a cielo abierto pueden cubrir una zona de muchos kilómetros cuadrados y utilizan piezas de maquinaria muy grandes. Se pueden utilizar dragas excavadoras, que retiran el material sobrante; excavador; camiones de gran tonelaje, para el transporte de carbón, excavadoras de cuba y cintas transportadoras en la **Figura 7** se muestra una mina a cielo abierto o tajo, fotografía por cortesía de IMMSA.



**Figura 7. Tajo Conquista, extracción a cielo abierto.**

Este método puede recuperar una mayor proporción del yacimiento de carbón que la extracción subterránea, ya que se trabaja en todas las vetas, llegándose a recuperar un 90% o más del carbón.

El material superior del suelo y la roca se rompe primero con explosivos, después se retira con dragas excavadoras o mediante excavadoras y camiones. Una vez expuesta la veta de carbón, se perfora, fractura y extrae de forma sistemática en tiras. El carbón se carga en camiones para su transporte a la planta de preparación de carbón o directamente el lugar en el que se utilizará.

## I.4 Procesamiento

El carbón recién extraído, generalmente no es apto para su utilización en los procesos de combustión y de coquización, ya que contiene estériles y minerales asociados al proceso de génesis del carbón. El primer manto en un tajo es usualmente encontrado a una profundidad de 30 metros aproximadamente, y los próximos mantos varían en profundidad. **(Figura 8)** Fotografía cortesía de IMMSA.

El carbón recién extraído, no tiene un uso en particular, pero existen procesos que permiten separar la parte útil para su comercialización y uso, con reducción de efectos contaminantes, utilizando la parte no útil para rellenos de minas ya explotadas o en las construcciones de vías.



**Figura 8. Tajo Lavadora, con sus mantos.**

Para el procesamiento del mineral que va desde la clasificación y trituración hasta su limpieza (usualmente física) en plantas llamadas lavadoras. Para poder llegar al proceso de lavado es previamente transportado se transporta a los patios donde se encuentran clasificados por tajos y el número de mantos.

Después pasa por el cribado, este proceso es una separación en función del tamaño de partícula, esto es logrado por el empleo de diferentes tipos de cribas.



Una vez que se llega al cribado este pasara por bandas transportadoras las cuales llevaran el carbón al proceso de lavado, el cual consta de varios circuitos; éstos dependen de la planta lavadora donde se desarrolla el proceso. Los circuitos generalmente están constituidos por varias etapas: el circuito de gruesos, circuito de finos y espirales, los cuales tienen una función para lavar el carbón y pasar al siguiente proceso.

Finalmente cuando el carbón esta lavado, pasa a camiones de carga para transportarlos al proceso de coquización, en este proceso de coquización previamente se hace un análisis en el laboratorio para saber qué tipo de carbón se tiene.

El análisis de carbón se hace generalmente para determinar las propiedades del carbón con propósito de venta o para determinar si es o no coquizable y a partir de ello determinar las características del lavado. Para caracterizar completamente un carbón recién extraído que contiene una mezcla heterogénea orgánica (carbonosa) e inorgánico (mineral) se hacen varios tipos de análisis: ceniza, materia volátil, índice de hinchamiento libre (F.S.I), azufre, poder calorífico y humedad, ver **(Figura 9)**. Esta caracterización del carbón se hace antes de lavarlo y pasarlo a coquización. Al omitir estos análisis se corre el riesgo de una posible falla en lo hornos debido a las condiciones incorrectas de operación.

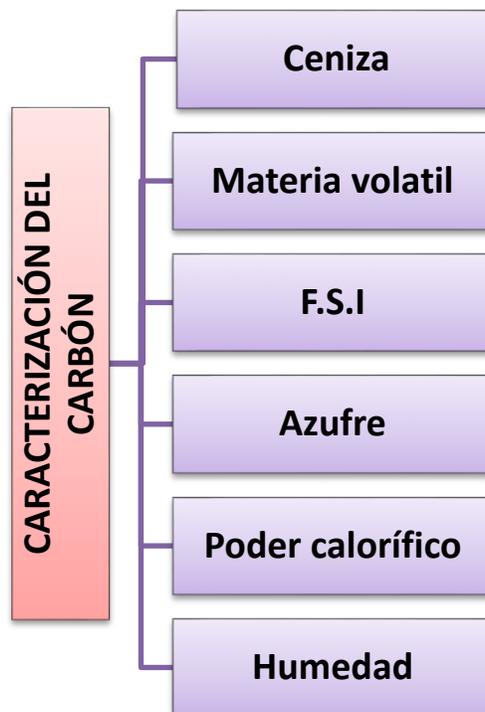


Figura 9. Diagrama de la caracterización del carbón



## I.5 Caracterización del carbón

Para la caracterización del carbón se utilizan métodos de pruebas estandarizadas, por la Sociedad Americana de Prueba de Materiales (ASTM), o por Normas Mexicanas (NMX).

- **Contenido de Cenizas**

Método de prueba estándar para cenizas en la muestra de análisis de carbón y coque **(ASTM D 3174-04) (NMX-B-157-1982)**.

Este análisis se va a definir como el residuo no combustible que permanece cuando se quema el carbón y es el resultado de cambios químicos que toman lugar durante el proceso de quemado. Se determina pesando 1 gr. de muestra de menos 60 mallas (0.250mm) y calentándola a 750 ° C durante al menos dos horas.

La ceniza es de primordial importancia en la planta lavadora ya que el principal objetivo de la planta es reducir el % de ceniza del carbón a través de una serie de procesos como ciclones, espirales y celdas de flotación.

Los materiales que forman la ceniza son de dos clases: materia mineral extraña y materia mineral inherente. La materia mineral extraña se compone de constituyentes arcillosos o esquistos, calcita, pirita, ò marcasita y componentes menores como sulfatos inorgánicos, cloruros y fluoruros. La ceniza inherente incluye elementos inorgánicos combinados con la parte orgánica del carbón, cuyo origen probablemente fue del material del tajo donde fue formado el carbón.

El contenido de cenizas determina el precio del carbón y por ende el tratamiento al cual debe someterse antes de su comercialización o uso final. El conocimiento de las cenizas de carbón es importante para expresar los resultados de clasificación del carbón por rango en cálculos de valores analíticos. **[10]**

Los cálculos para la determinación de las cenizas son los siguientes:

Porcentaje de ceniza en la muestra:

$$\% \text{ Ceniza} = [(A-B)/C] \times 100$$

Donde:

A= Peso de la capsula y residuo de cenizas en gramos.

B= Peso de la capsula vacía, en gramos.

C= Peso de la muestra en gramos.

Los resultados obtenidos del contenido de ceniza por este método cambian en composición debido a los constituyentes inorgánicos presentes en la muestra original del carbón.



- **Materia Volátil**

El método empleado es de acuerdo a: Método de prueba estándar para materia volátil en la muestra de análisis de carbón y coque (**ASTM D3175-07**) (**NMX-B-162-82**).

Este análisis se determina calentando 1 gr. de muestra pasado por 60 mallas y secada a 950°C por 7 minutos.

Un carbón se aglomera cuando el botón de coque obtenido en la prueba de materia volátil muestra estructura de celdas e hinchamiento y soporta un peso de 500gr. También es útil para para estimar los rendimientos del coque y para determinar si un carbón se puede coquizarse. Se sabe que la materia volátil está en relación directa con la ceniza porque a mayor ceniza en el carbón menor la materia volátil. **[10]**

Los cálculos para la determinación de la materia volátil son los siguientes:

El porcentaje perdido en peso se calcula como sigue:

$$\% \text{ perdido en peso} = [(A - B)/A] \times 100$$

Donde:

A= peso de muestra usada en gr. y

B= peso de muestra después del calentamiento, en gr.

Cálculo del porcentaje de materia volátil:

$$\% \text{ Materia volátil} = C - D$$

Donde:

C= % perdido en peso

D= % humedad de análisis.

- Índice de hinchamiento libre del carbón. (F.S.I.)

El método empleado es de acuerdo a: Método de prueba estándar para el índice de hinchamiento de carbón (**ASTM D 720-10**), por sus siglas en ingles Free-Swelling Index (F.S.I).

El hinchamiento libre del carbón: es el grado de expansión del carbón en relación al recipiente que lo contiene, se compara contra una escala estándar. Este método de prueba sirve para indicar las propiedades de endurecimiento del carbón cuando es quemado como combustible, puede ser usado para dar una indicación del grado de oxidación de un carbón. [10].

En la Figura 10 se muestra el equipo para el análisis de Índice de hinchamiento del carbón. El equipo consta de un horno calentado por resistencias eléctrica hasta la temperatura 820°C, la muestra a calentar debe pesar 1 gr y se coloca en una cápsula de porcelana, que se sujeta con unas pinzas. El lapso de tiempo para el calentamiento de la muestra es de 2 minutos



Figura 10. Determinación de F.S.I del carbón

En la figura 11 se observa una escala 1:1 de una tabla de perfiles estandarizados para la determinación del F.S.I, hay una numeración del 1 al 9. El 1 denota que la muestra no ha sufrido incremento de volumen y 9 es un hinchamiento que ocupa todo el volumen de la cápsula. La utilidad de esta prueba es determinar si el carbón es coquizable. Que cumpla con dicha característica se debe tener un F.S.I de 4, este valor es el usado en la planta de lavado Signum en Nueva Rosita. [25]

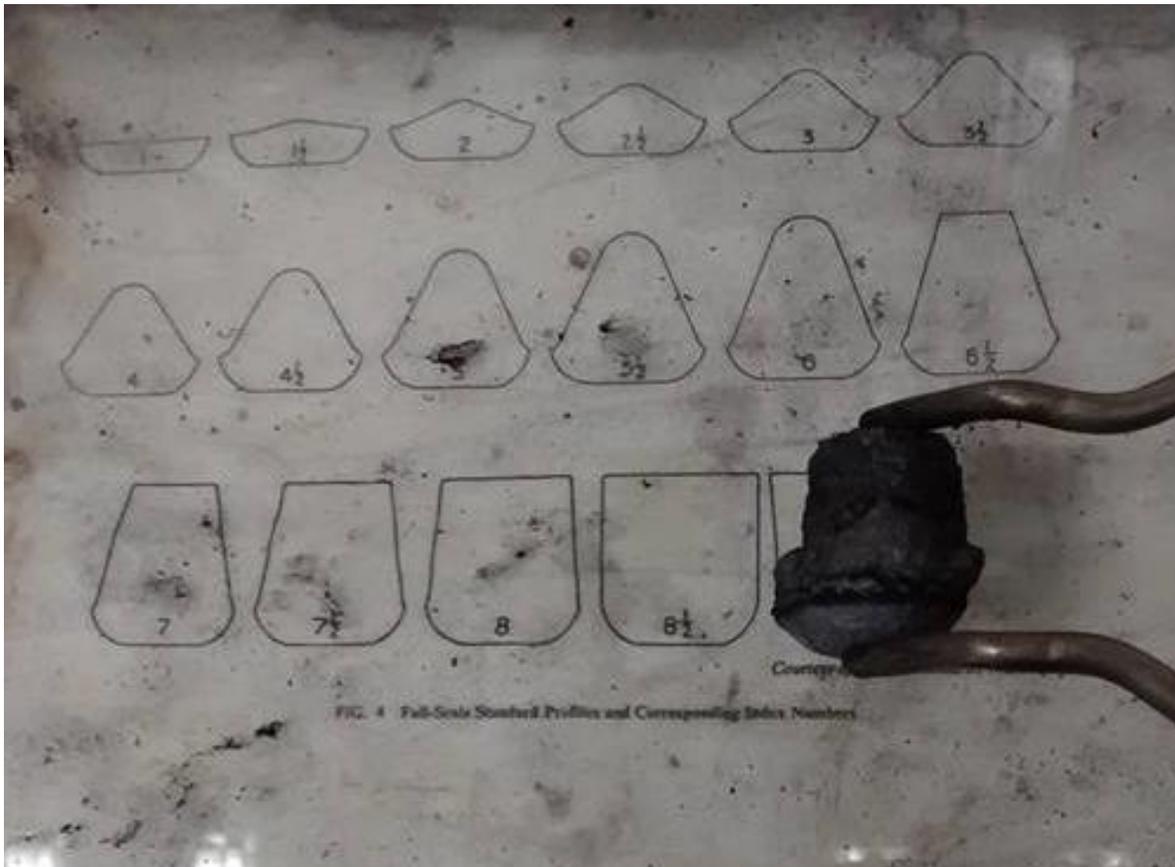


Figura 11. Tabla de perfiles estándar escala 1:1 para la determinación del F.S.I

- **Contenido de Azufre**

El método empleado es de acuerdo a: Métodos de prueba estándar para determinar el azufre total en la muestra de carbón y coque. **(ASTM D 4239-10) (NMX-B-158-1982)**

El azufre está presente en el carbón como parte de la materia orgánica y en combinación inorgánica en la pirita, marcasita y sulfatos. Uno de los principales

propósitos del lavado de carbón es reducir el contenido de azufre total ya que se requiere por las acereras que el contenido de azufre sea bajo.

Sólo el azufre piritico puede ser removido por el proceso de lavado, ya que el azufre orgánico es difícil de separar. El azufre total se determina por medio de un equipo.

El método requiere un horno eléctrico en el que se coloca una muestra de 0.25 gr. de carbón a 1350°C, se le inyecta oxígeno y produce SO<sub>2</sub>, que es cuantificado por un sensor infrarrojo que determina el % de azufre total (**Figura 12**).

Los resultados del análisis se usan para evaluar el proceso de preparación del carbón, verificando la calidad del carbón en relación a las especificaciones contractuales, o bien para propósitos científicos [10].



Figura 12. Equipo de análisis de azufre del carbón

- **Poder calorífico**

El método empleado es de acuerdo a: Método de prueba estándar para valor calorífico bruto del carbón y coque (**ASTM D 5865-10**) (**NMX-B-030-1984**).

El poder calorífico es el calor producido por la combustión de una cantidad bajo condiciones controladas. Esta variable está en relación inversa con la ceniza ya que a mayor ceniza menor poder calorífico.



El poder calorífico de una muestra de carbón es determinado por el quemado de una muestra previamente pesada 1 gr y colocada dentro de un ambiente rico en oxígeno en un calorímetro isoperibólico calibrado bajo condiciones controladas. Calorímetro Isoperibólico es aquel en el que se mantiene una chaqueta circundante a una temperatura constante mientras que la temperatura de la bomba y la cubeta se elevan a medida que el calor se libera por la combustión. **[10]**

- **Análisis de Humedad**

El método empleado es de acuerdo ha: Método de prueba estándar para la húmeda en la muestra de análisis del carbón y coque **(ASTM D3173-08) (NMX-B154-1981)**.

La humedad total que se usa para propósitos de pago del carbón, se determina al calentar una muestra de carbón sin quebrar a 107 °C por un determinado lapso de tiempo hasta peso constante.

La humedad puede ser controlada en la planta lavadora por medio de centrifugas, cribas, filtros al vacío o con filtro prensa.

Los cálculos para la determinación de la humedad es el siguiente:

El porcentaje de humedad en la muestra:

$$\% \text{ Humedad} = [(A-B)/A] \times 100$$

Donde:

A= Gramos de muestra usados.

B= Gramos de muestra después del calentamiento.

## I.6 PREPARACIÓN DEL CARBÓN

El carbón pasa por una serie de procesos antes de ser lavado como se muestra en la Figura 13.

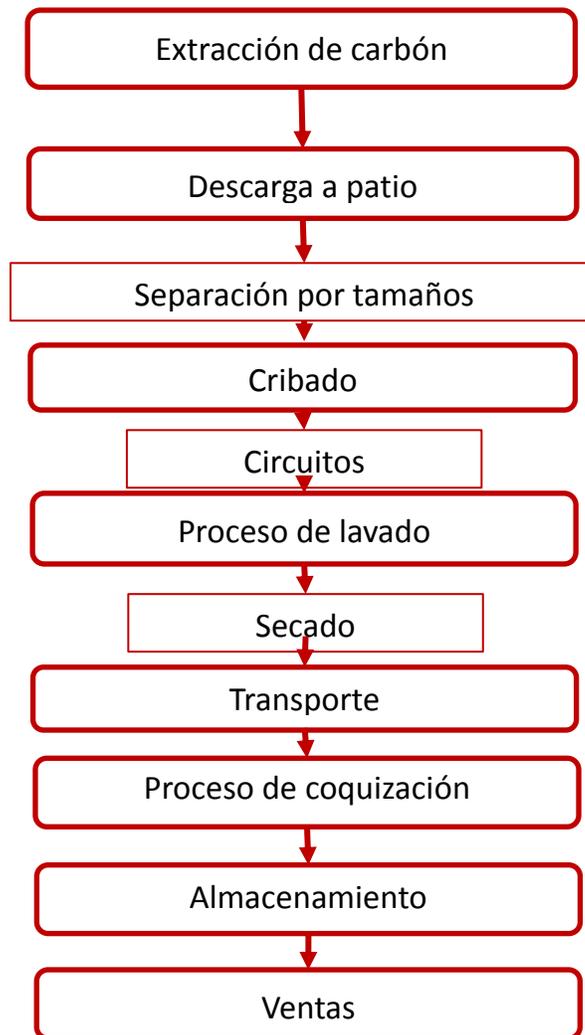


Figura 13. Esquema general de procesamiento del carbón

El lavado del carbón depende de las propiedades, características y especificaciones que dependen directamente de la calidad siendo esencialmente: el contenido de cenizas, la humedad y la granulometría.

Las reglas de lavado consisten en obtener, a partir del crudo, el máximo de carbón útil eliminando los estériles o rechazos de altas cenizas, al máximo. Para lograr estos resultados se deben conocer no solamente los equipos de una planta lavadora sino también hacer control de las propiedades del carbón lavado y el conocimiento previo de las características del crudo alimentado a la planta lavadora.

### I.6.1 Limpieza del carbón

El carbón directamente extraído del suelo, conocido como mineral bruto (Carbón Todo Uno o por sus siglas, CTU), a menudo contiene impurezas no deseadas, como rocas y suciedad, y llega en una mezcla de fragmentos de diferentes tamaños. Sin embargo, los usuarios de carbón necesitan un carbón con una calidad constante. La preparación del carbón, también conocida como lavado, se refiere al tratamiento del mineral bruto para asegurar una calidad consistente y la mejora de su idoneidad para usos finales.

El tratamiento depende de las propiedades del carbón y de su uso previsto. Puede requerir un simple triturado o pasar por un proceso de tratamiento complejo para reducir el nivel de impurezas, para reducir o eliminar estas impurezas la limpieza, consiste en procesos de limpieza de carbón ya sea de tipo físico o químico. El proceso de limpieza física de carbón es el más usado hoy en día, esta separación mecánica de carbón está basada en las diferencias de densidades de los componentes contenidos en el CTU. [6]. En la figura 16 se muestra un diagrama de flujo de cómo es un proceso de limpieza general.

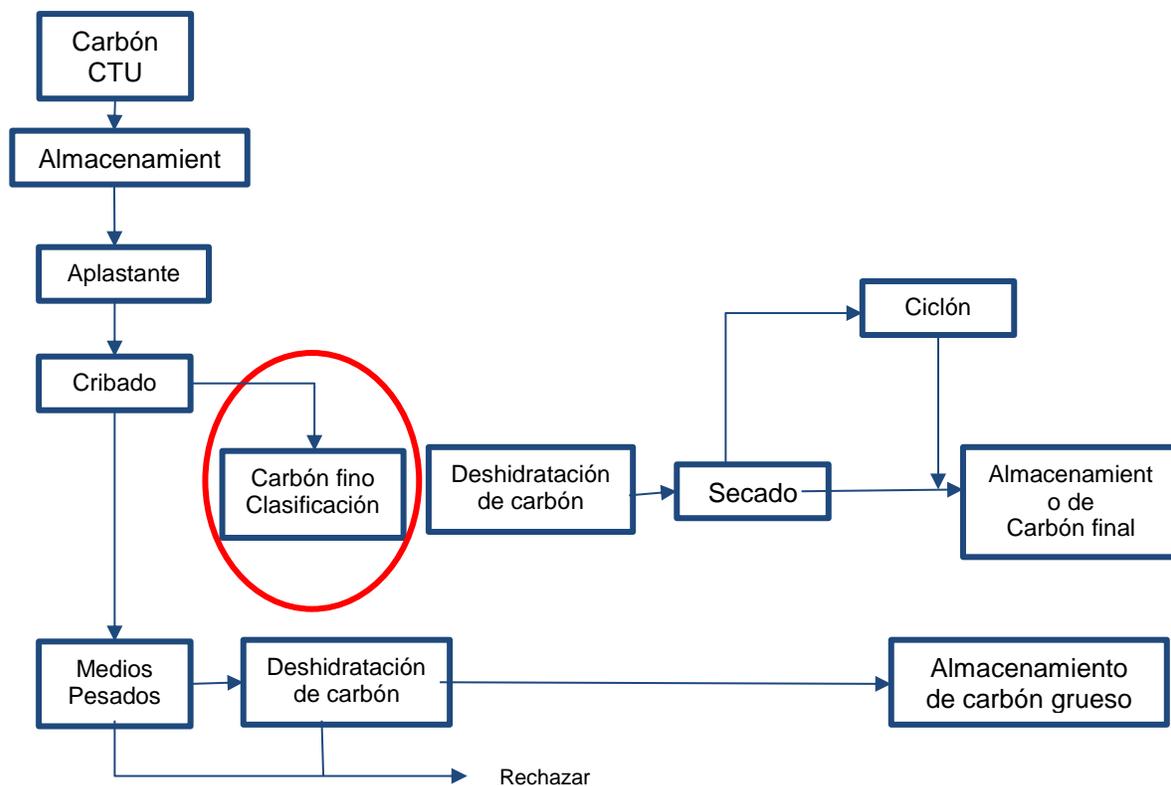


Figura 14. Diagrama de flujo de proceso de planta de limpieza típica de carbón [6]



## I.6.2 Tipos de limpieza

El objetivo del proceso de lavado es obtener un carbón con un porcentaje de ceniza igual o inferior al 13.5% aproximadamente [26]. Para este propósito es posible utilizar dos tipos diferentes de limpieza para el mejoramiento del lavado.

Un proceso es la Limpieza física, que implica la reducción de tamaño, la limpieza y la deshidratación. En general, este proceso utiliza diferencias en la densidad o propiedades de la superficie entre la materia orgánica y la materia mineral en el carbón. [1]

El otro proceso es de tipo químico y sigue e en desarrollo, se basa en las propiedades químicas de los compuestos sulfurados presentes en el carbón, el carbón se expone a un químico a base de sodio y/o potasio en un horno rotatorio liberando el azufre y materia mineral del carbón, lo cual implica que el rendimiento y costo no sean convenientes a nivel industria actualmente.

## I.6.3 Metodología de limpieza física

En general, los procesos de limpieza física aprovechan las diferencias en la densidad o propiedades entre la materia orgánica y mineral en el carbón. Dependiendo del tamaño de las partículas de carbón que se está limpiando. Las técnicas de limpieza se llevan a cabo mediante lo que se denomina como “circuitos” y éstos se pueden dividir en tres tipos: bajo, medio y fino.

Las tecnologías que hacen separaciones sobre esta base son particularmente eficaces para el tratamiento de tamaños gruesos a tamaños intermedios de carbón (es decir, tamaños de partícula que van desde más de 10 cm a alrededor de 0.1-0.5mm), con eficiencia decreciente a medida que el tamaño de partícula disminuye, esto con ayuda de fuerza centrífuga se aplica a menudo para mejorar la separación, sobre todo para las partículas más finas. Los procesos basados en la densidad son particularmente eficaces en la eliminación de la pirita, cuarzo y caolinita en el carbón [2].

Este método de separación también implica la búsqueda de colectores y espumantes para la mejora de la limpieza del carbón.

## I.7 Proceso de lavado general

En la fase de preparación inicial de la limpieza del carbón, el carbón crudo se descarga, almacena, transporta, aplasta, y se clasifica con tamizado en fracciones de carbón grueso y fino. Las fracciones según el tamaño son entonces remitidas a sus respectivos procesos de limpieza.

### 1.7.1 Descripción de proceso general, Planta Lavadora Signum, Coahuila

La planta de preparación Signum cuenta con una capacidad instalada para procesar 150 toneladas por hora de CTU. Se divide en dos secciones que son Tipple y Lavadora.

En la figura 15, la primera sección se descarga el carbón recibido en camiones del Tajo a un cono de almacenamiento o se recibe directamente de la mina a través de bandas y se les somete a una etapa de acondicionamiento y uniformizado tanto en contenido final de inertes como en tamaño, en un quebrador rotatorio del tipo Bradford. El material obtenido pasa luego a la segunda sección en donde es lavado pasándolo a través de un proceso de medio denso con magnetita diluida y por medio de ciclones se separa del material alimentado el carbón de los inertes o desperdicio.

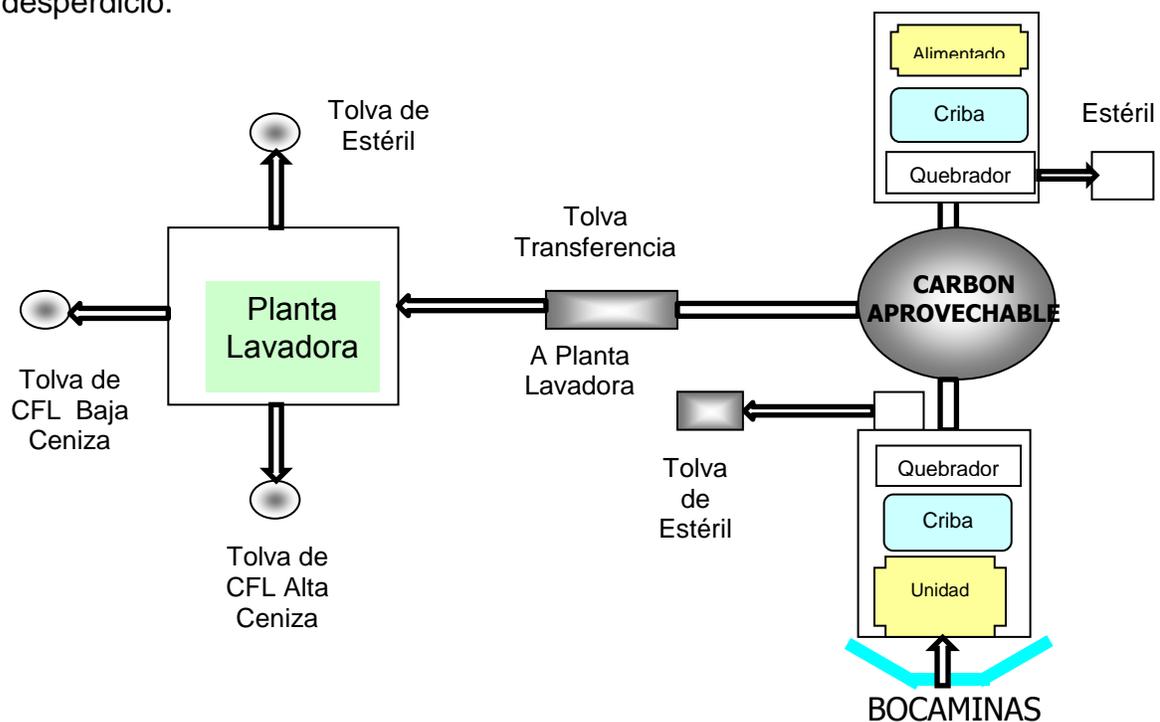


Figura 15. Diagrama general de proceso del carbón desde la llegada de mina o tajo a planta lavadora



El proceso de lavado empieza con la recepción del CTU se deposita en los patios de recepción de la planta para posteriormente alimentarlo con un cargador frontal o pala mecánica a las tolvas. Éste pasa a una banda que va directa a una criba que sólo separa el material más grande de 1 1/2" para que el mayor tamaño entre al quebrador Bradford y el más pequeño pase directo al cono de alimentación de la planta el Bradford es un quebrador que reduce todo el material a 1 1/2" lo que no se puede quebrar sale como desperdicio y se le llama desperdicio Bradford.

Una vez que el material de 1 1/2" pasa, entra a la planta y pasa por otra criba que se encarga de separar el carbón por medidas lo mayor a 1 mm hasta 1 1/2" entra al tanque de gruesos y las partículas de tamaño menor a 1 mm hasta "0 mm" entran al tanque de finos.

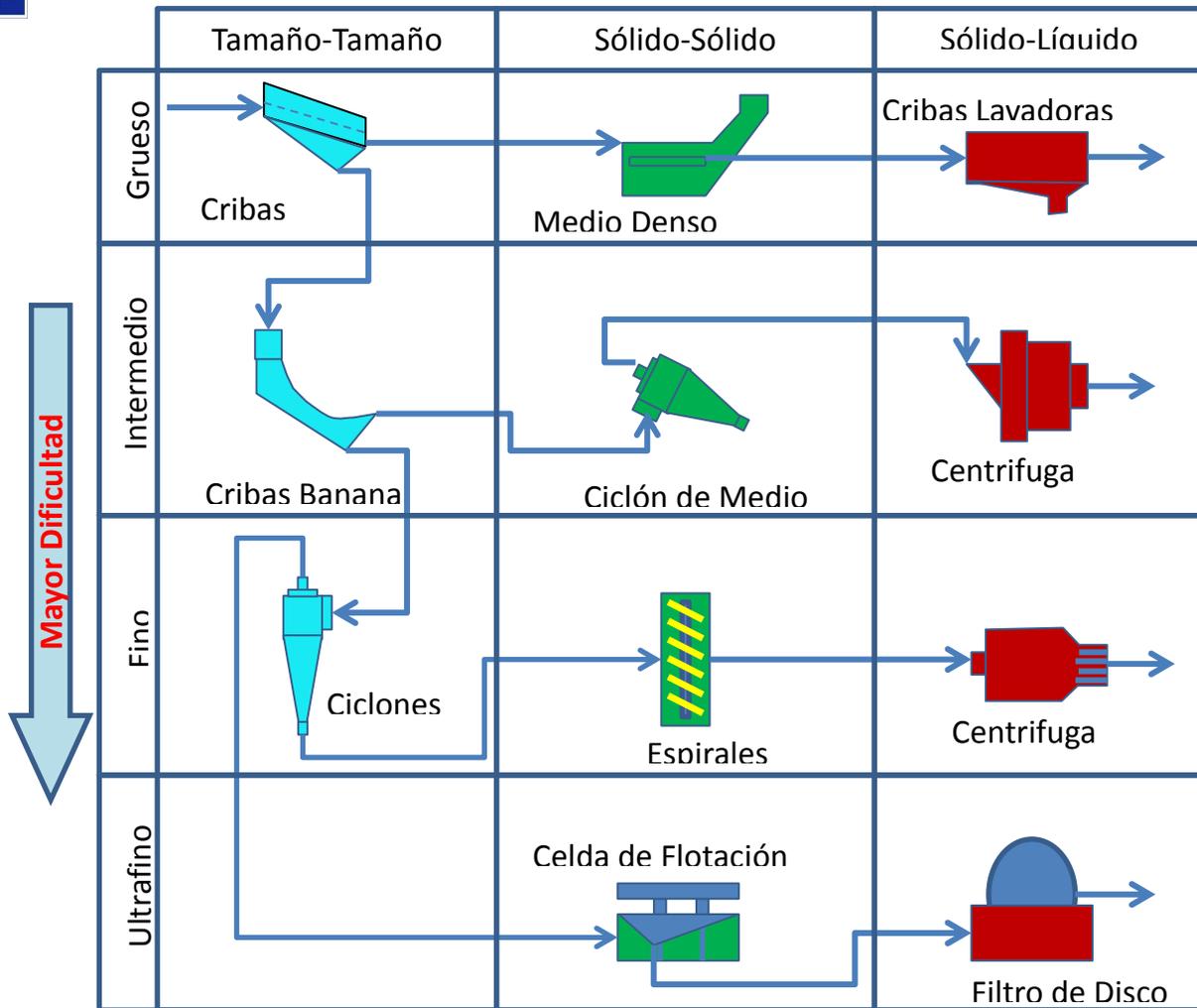
#### ❖ El circuito de gruesos

Al material que entró al tanque de gruesos se le adiciona magnetita, que incrementa la densidad del agua, para que el material más limpio pueda flotar. Ya que el material que se adiciona al tanque, se bombea a un ciclón y por medio de gravedad separa lo más limpio de lo más sucio a lo más limpio se le llama "grueso lavado" y a lo más sucio "rechazo grueso".

#### ❖ El circuito de finos

El circuito de finos solo trabaja con agua y carbón, esta fracción es bombeada a los hidrociclones que como su nombre lo dice sólo trabajan con agua y gravedad. El carbón más ligero tiende a flotar y este material se va a las celdas de flotación porque es una partícula muy pequeña (menor a 100 mallas), se le adiciona Metil Isobutil Carbinol como agente espumante y el diésel como colector. Al adicionar aire a las celdas forman burbujas que atrapan el material más limpio y hacen que flote, a este material se le llama concentrado, al material que no logró flotar es porque es un carbón más sucio o es rechazo se le llama colas y es bombeado a la presa de jales o "lamero" porque es desperdicio.

El material que se hunde en el hidrociclón se va a los espirales (menor a 1mm) que también se trabajan por medio de gravedad, el material más fino o más limpio siempre estará en la parte de arriba del espiral y lo más pesado o más sucio estará en medio o al centro del espiral; lo más limpio se le llama lavado fino y a lo más sucio rechazo fino. **(Figura 16)** Diagrama del circuito de finos.



(Figura 16) Diagrama del circuito de finos. IMMSA

El lavado grueso posterior a su enjuague en la criba de lavado grueso (para quitar la magnetita) pasa a una secadora, cuya función es quitarle el exceso de agua y se junta en una banda con el lavado fino (criba de alta frecuencia esta se encarga de quitar el exceso de agua ) y el concentrado (entra a una secadora en vertical llamada "bird" para quitar el exceso de agua), después pasa por un quebrador que lo reduce al tamaño de 1/8" y posterior a su reducción de tamaño se embarca para la planta coquizadora.

El rechazo grueso entra a una criba de enjuague donde quita la magnetita que se encuentre pegada para que posteriormente se use en el proceso de nuevo, también se uniéndose con el rechazo fino (este entra a una criba de alta frecuencia su función es quitar el exceso de agua) todo se junta y va a una banda para posteriormente depositarlo en un camión para tirarse en el terrero ya que este material no servirá. **En la Figura 17** se muestra el diagrama de operación del circuito de finos, que comprende desde las celdas de flotación.

RECICLADO DE LICOR FINOS

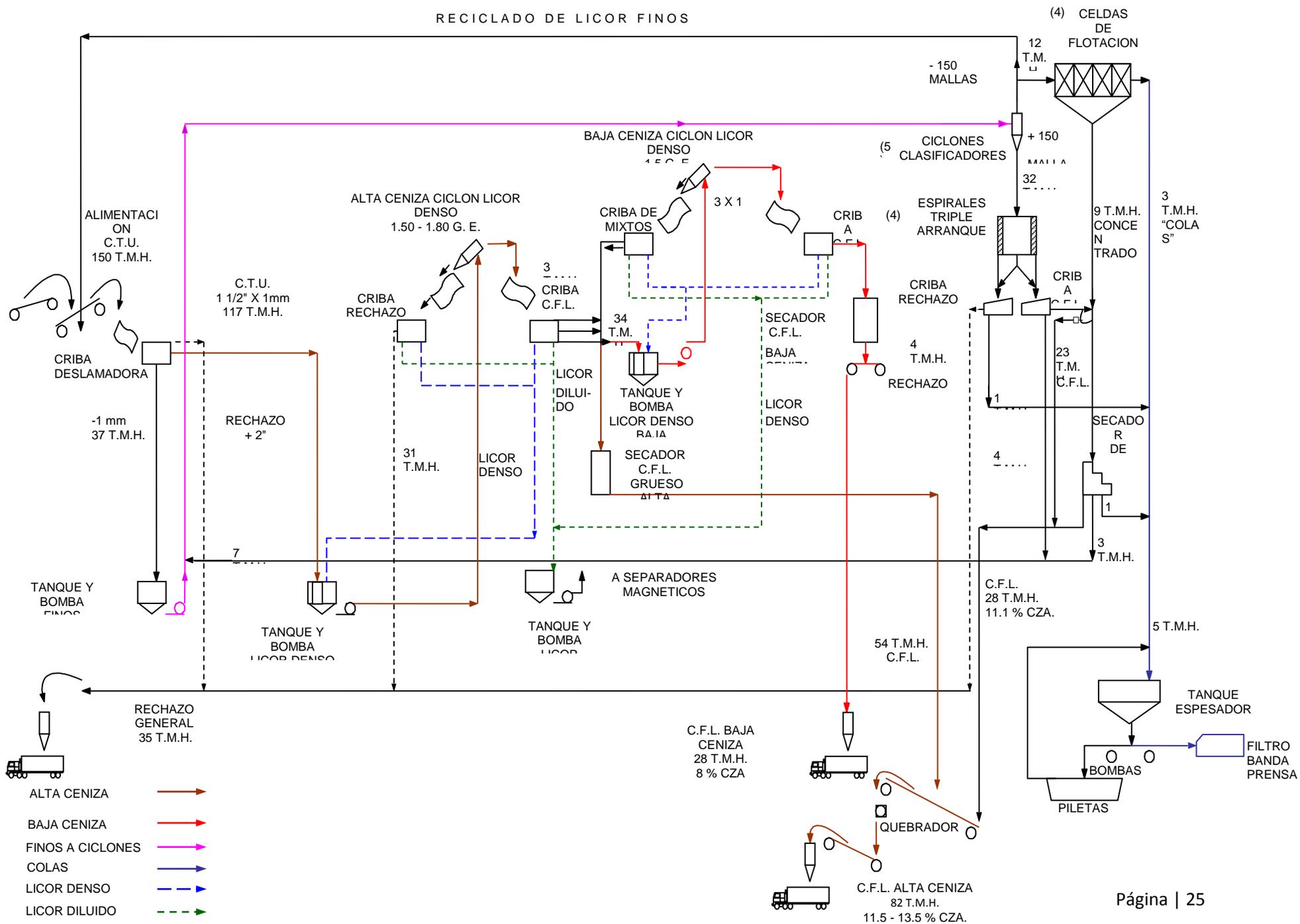


Figura 17. Diagrama de lavado de carbón, desde celdas de flotación.

## I.8 Proceso o método de Flotación

La flotación se define como un proceso físico-químico de tensión superficial que separa los minerales útiles de la mena mediante la eliminación de los minerales sin valor [22]. Es el método de procesamiento de minerales más eficaz y con mayores aplicaciones de todos los existentes, aunque en muchos aspectos, es el más complejo de ellos, estos métodos alternativos por flotación son:

- Flotación por aceite
- Flotación por película
- Flotación por espuma

Los desarrollos tecnológicos actuales han permitido aumentar la recuperación de material carbonífero ultra fino. Durante la flotación, el carbón se separa del resto de impurezas haciéndolo flotar en un depósito que contenga un líquido normalmente una suspensión de magnetita. El carbón es más ligero flotará y separará del resto, mientras que las rocas y el resto de impurezas más pesadas caen al fondo y se retiran como material residual. [3]

En un sistema de flotación se incluyen muchos componentes relacionados entre sí, como se muestra en la **Figura 18**. El presente trabajo aborda la Flotación por espuma para el lavado de carbón

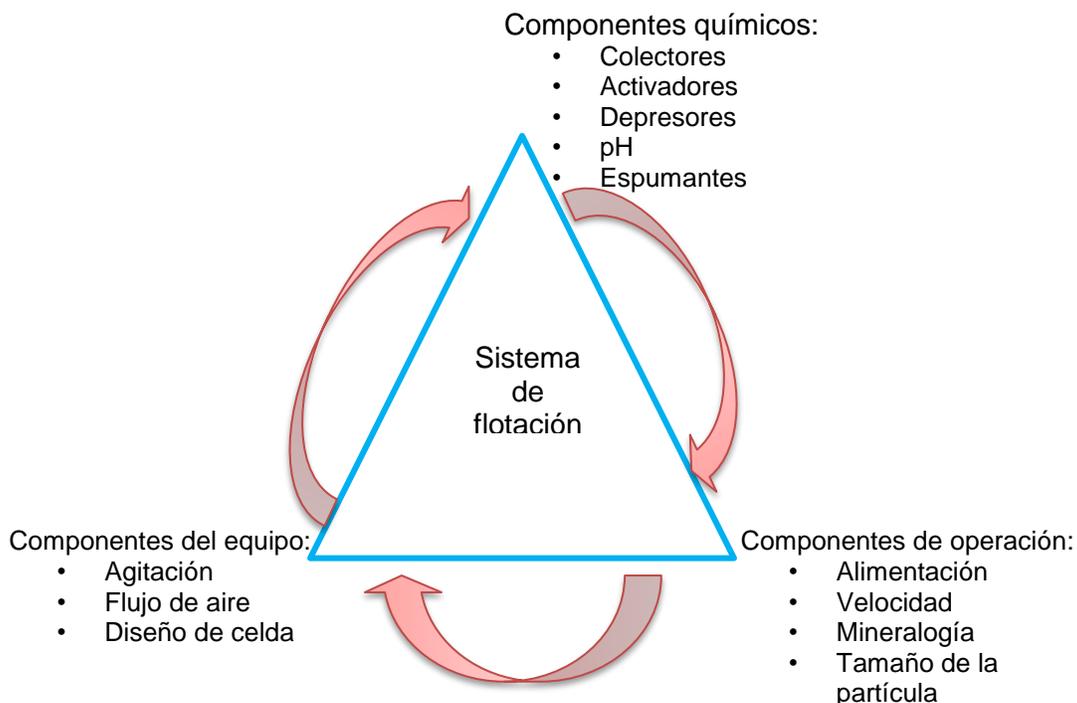


Figura 18. Sistema de flotación. [11]



### I.8.1 Flotación por espuma

La flotación por espuma se puede adaptar a una amplia gama de separaciones minerales. Se utiliza para la separación física de las partículas considerando las diferencias en la capacidad de burbujas para adherirse selectivamente a las superficies minerales en suspensión mineral / agua.

Las partículas minerales unidas con las burbujas de aire tienen menor densidad que la suspensión de agua y por lo tanto permanece flotando en la superficie. El carbón es hidrófobo mientras que los minerales son hidrófobos, dicha diferencia en la hidrofobicidad es explotada de forma natural, inducida o químicamente mejorada.

Para este proceso se requiere una cuidadosa selección de colector y espumante. Entre los colectores, el combustible diesel o el aceite de queroseno se pueden utilizar mientras que espumantes tales como alcoholes pueden ser considerados.

En la **Figura 19** se muestra un esquema estructural de flotación por espuma [23] que describen las etapas correspondientes:

- ❖ En la primera etapa se mezclan en agua las partículas de minerales previamente definidos para separación. Para aumentar diferencia en mojabilidad de superficie de los minerales, la pulpa se elabora con los reactivos de flotación; se forma pulpa de flotación.
- ❖ En la segunda etapa se agrega aire a la pulpa, se realiza dispersión del aire. Se forman muchas burbujas gaseosas, se ocurre aereación de la pulpa.
- ❖ En la tercera etapa las partículas hidrofóbicas se pegan a las burbujas y forman complejos de flotación, que constituyen las partículas hidrofóbicas pegadas a burbujas.
- ❖ En la cuarta etapa complejos de flotación suben a superficie de pulpa.
- ❖ En la quinta etapa los complejos de flotación que subieron a la superficie, forman espuma de flotación que contiene las partículas hidrofóbicas. Las partículas hidrofílicas, se unen con el agua y se quedan en la pulpa.
- ❖ En la sexta etapa se elimina la espuma de la superficie de la pulpa, se separan los productos de flotación por: un producto espumoso (concentrado), y producto de la celda (relaves, colas).

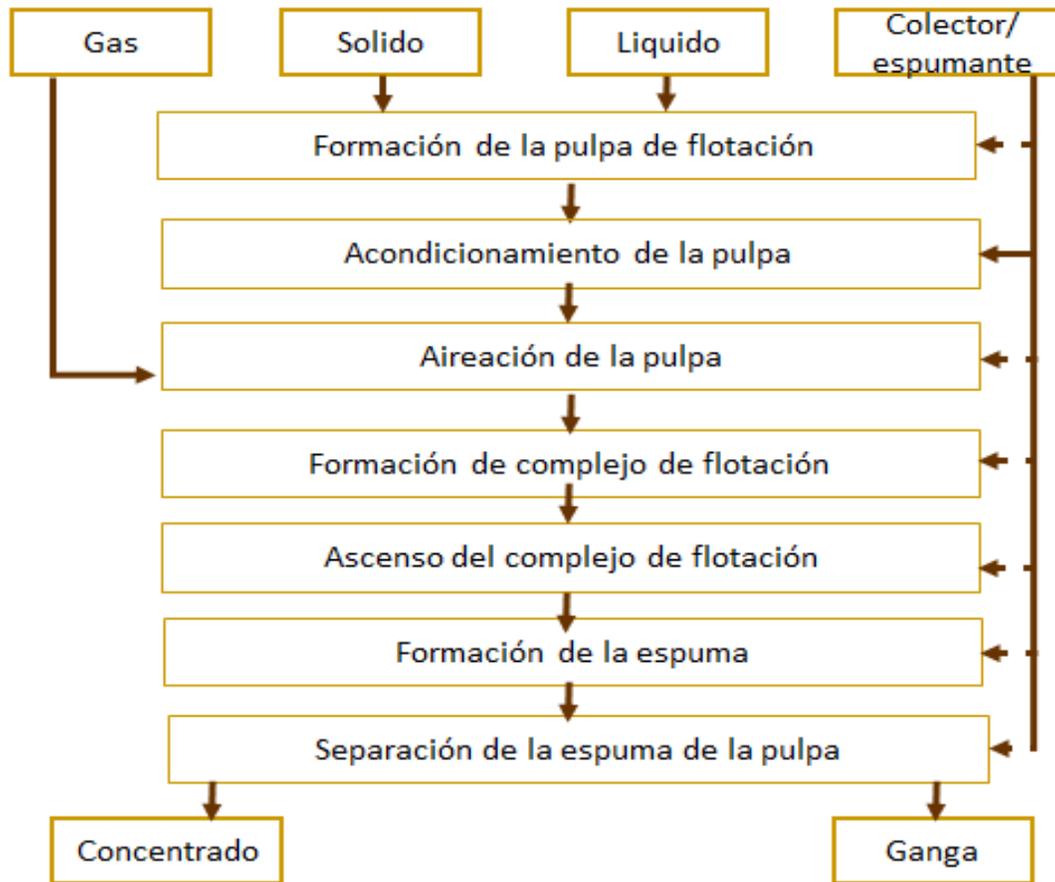


Figura 19. Esquema estructural de flotación por espuma. [23]

El objetivo del espumante es disminuir la tensión superficial del agua y por lo tanto disminuir el tamaño de la burbuja con un aumento en el área superficial de aire dentro en la celda. Una serie de factores puede variar el rendimiento de beneficio de carbón tales como velocidad de aireación, la adición del reactivo, la densidad de la pulpa, el grado de agitación y tamaño de partícula [12].

En la figura 20 se tiene un esquema de un proceso de flotación, cuando sucede una agitación las partículas empiezan a separarse, esto se debe a que el colector empieza a interactuar con el mineral.

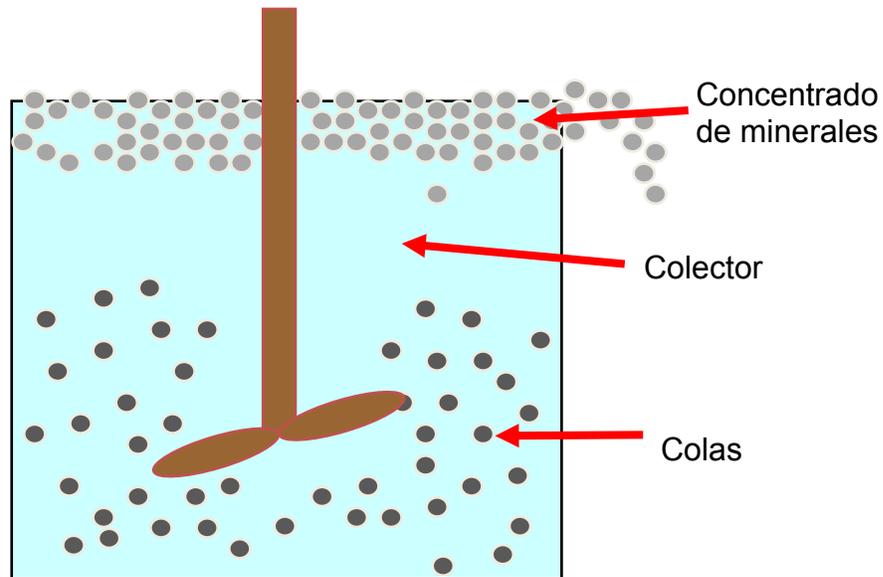


Figura 20. Simulación de un proceso de flotación

Los reactivos de flotación representan el grupo más diverso de compuestos utilizados en la industria minero-metalúrgica se clasifican de acuerdo a su función:

**Colectores:** su función principal es la de proporcionar propiedades hidrofóbicas a las superficies de los minerales

**Modificadores:** sirven para crear condiciones favorables en la superficie de los minerales, principalmente para el funcionamiento selectivo de los colectores. Existen varios tipos, Activantes, reguladores de pH, espumantes entre otros.

### 1.8.2 Definición de Espumas

Las espumas juegan un papel muy importante en el lavado de carbones por flotación, ya las características de estos espumantes influyen en la eficiencia del proceso.

Una espuma se define como la dispersión de un gas en cantidad relativamente pequeña de un líquido, son sustancias orgánicas de superficies activas heteropolares, que se concentran por absorción en interfases aire-agua, ayudando a mantenerse las burbujas de aire dispersas.

Debido a que un líquido puro no puede formar espuma, es necesaria la existencia de un soluto que se adsorba en la interfase líquido-gas (surfactante) [13].



### I.8.3 Surfactantes o colectores

Los surfactantes son sustancias cuyas moléculas poseen a la vez un grupo polar y un grupo apolar. La parte polar tiene la afinidad para los solventes polares, particularmente el agua, mientras la apolar tiene afinidad para los solventes orgánicos, en particular los hidrocarburos, aceites o grasas. Es por ello que la parte polar se denomina también hidrofílica, mientras que la parte apolar le corresponderá al calificativo de lipofílico o hidrófobo.

Los tensoactivos se clasifican generalmente en tres tipos de acuerdo con sus productos de ionización: catiónicos, aniónicos y no iónicos. [14]

- **Surfactantes aniónicos**

Los surfactantes aniónicos son moléculas orgánicas en las cuales el grupo soluble en agua (grupo hidrofílico) está cargado negativamente. Ejemplos: los carboxilatos ( $-\text{COO}^-$ ), sulfonatos ( $-\text{SO}_3^-$ ), sulfatos ( $-\text{OSO}_3^-$ ), fosfatos ( $-\text{OPO}(\text{OH})\text{O}^-$ ).

- **Surfactantes catiónicos**

Los surfactantes catiónicos son moléculas orgánicas donde el grupo soluble en agua está positivamente cargado. Casi todos los surfactantes catiónicos son compuestos nitrogenados, formando sales cuaternarias de amonio.

- **Surfactantes no iónicos**

Los surfactantes no iónicos son aquellos que en solución acuosa no se disocian, la parte polar está conformada principalmente por cadenas de varios grupos etoxilatos (distinguiéndose los alquilfenoles y alcoholes etoxilados), derivados de carbohidratos (los cuales son biodegradables), copolímeros de óxido de etileno y óxido de propileno, entre otros. Son frecuentemente utilizados en detergencia a bajas temperaturas y como emulsificantes, siendo compatibles con los otros tipos de surfactantes. Los surfactantes no iónicos sirven principalmente como cosurfactantes para mejorar el comportamiento del sistema de fases.

Las propiedades de los surfactantes, que los diferencian de otros compuestos químicos, están basadas en dos fenómenos fundamentales, la capacidad de adsorberse en las interfases y su tendencia a asociarse en agregados llamados micelas.[15]. En la **Figura 21** se muestra que cuando el mineral interactúa con el colector y espuma se forman las micelas haciendo que las partículas floten

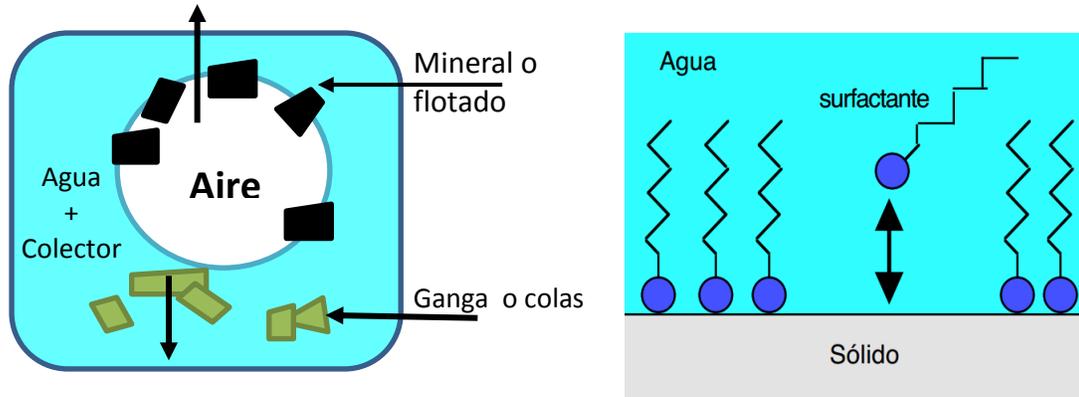


Figura 21. Interacción del surfactante con el mineral a lavar

- **Los colectores que pueden considerarse no iónicos para el lavado de carbón:**

El petróleo, sus derivados queroseno, gasóleo y otras fracciones medianas y los aceites de hulla son colectores típicos, que tienen la desventaja, respecto a los reactivos mencionados anteriormente, de formar una espuma grasosa que contiene una masa pegajosa de burbujas difícil de romper en la operación posterior de sedimentación y en algunos casos conviene no tener trazas de aceite en el mineral concentrado.

El aceite de pino, que generalmente se clasifica como espumante, actúa también como colector con la ventaja sobre los anteriores de que no es tan pegajoso. Todos estos reactivos colectores se utilizan para flotar carbono, grafito, azufre y molibdenita ( $\text{MoS}_2$ ) dado que se adsorben fácilmente sobre estos minerales naturalmente hidrófugos. [12]

#### I.8.4 Modificadores

Los modificadores son varios tipos de productos químicos que adsorbidos sobre la superficie del mineral modifican la naturaleza de ésta y con ello su afinidad natural para la fijación del colector o promotor, entre los modificadores se incluyen los siguientes:

- Activadores:** Se usan para hacer tratable la superficie de los minerales con el revestimiento de colector o promotor; en general se adsorben con reacción química.
- Depresores:** Se usan para modificar la superficie de algunos de los materiales de modo que se dificulte la adsorción del colector o promotor sobre la superficie de las partículas de dicho material. Estos reactivos



ayudan a dar selectividad (agudeza de la separación) a la flotación pues retienen a los materiales no deseados. En general se adsorben con reacción química al igual que los activadores y como en ese caso se requiere una capa mono molecular parcial por lo que la cantidad de reactivo requerida por tonelada de efluente es muy pequeña.

**c) Reguladores de pH:** El pH de la pulpa es un factor de gran importancia pues regula la facilidad de formación de las películas e influye en la carga superficial del mineral. En muchos casos la flotación sólo es posible en una estrecha zona de valores de pH, de modo que en una variación grande de pH puede dar lugar a la inversión completa de la flotación. Por esta razón, los reguladores de pH. Hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ), ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) y carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), pueden actuar tanto como activadores o como depresores según las condiciones.

**d) Espumantes:** Son necesarios para evitar la unión de las burbujas de aire cuando llegan a la superficie del agua (lo que implicaría la destrucción de la espuma) manteniendo una espuma persistente que luego permite la separación del mineral flotado. Deben ser sustancias poco solubles y no ionizables que al concentrarse en aire-agua reduzcan la tensión superficial del agua.

Se usan alcoholes alifáticos relativamente pesados como el hexílico y el metil isobutil carbinol que cumplen con las especificaciones. El ácido cresílico (Cresol y compuestos Fenólicos) produce espuma poco estable sino se le utiliza junto a pequeña cantidad de petróleo. Los aceites de pino y eucalipto pueden usarse sin adición de otras sustancias porque funcionan como colector y espumante. [16]

## I.9 Técnicas de caracterización

Para el desarrollo de nuevos materiales existen técnicas de preparación y caracterización, que ayudan a conocer las propiedades de un material y así valorar su utilidad en diversas aplicaciones. Dentro de estas técnicas de caracterización se encuentran: espectroscopia de infrarrojo (IR) y la difracción de rayos X (DRx).

### I.9.1 Espectroscopia de Infrarrojo (IR)

La espectroscopia infrarroja es una técnica basada en las vibraciones de los átomos de una molécula. Un espectro infrarrojo se obtiene comúnmente mediante el paso de radiación infrarroja a través de una muestra y determinar qué fracción de la radiación incidente es absorbida en una energía. La energía a la que cualquier pico en un espectro de absorción aparece corresponde a la frecuencia de la vibración de una parte de una molécula de la muestra. [17].

Los espectrofotómetros IR son instrumentos para medir la transmisión de radiación electromagnética de una muestra en función de la longitud de onda o del número de onda. El elemento más importante debe permitir aislar la radiación de regiones espectrales definidas y permite diferenciar entre los distintos tipos de espectrofotómetros: no dispersivos, dispersivos y de transformada de Fourier (FT). La espectrometría infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) es una técnica de análisis para obtener el espectro infrarrojo con mayor rapidez. En lugar de registrar los datos variando la frecuencia de luz infrarroja monocromática, se guía una luz (con todas las longitudes de onda de pista utilizada) a través de un interferómetro. Después de pasar por la muestra, la señal medida da el interferograma o espectro. Un elemento esencial en los espectrofotómetros es una fuente de radiación que debe aportar la mayor intensidad posible en la región de longitud de onda que se está investigando. Las fuentes de radiación térmicas (sólido inerte calentado eléctricamente) son las más utilizadas, proporcionando una radiación continua, en contraste, el uso de fuentes láser suministra longitudes de onda muy concretas. El propósito del sistema óptico es transmitir la radiación desde la fuente al detector con la mínima pérdida. [18]

El sistema óptico va equipado con un compartimento para la muestra, en el que ésta se sitúa en el camino de la radiación, bien mediante celdas u otros accesorios que permitan realizar medidas diferentes a la transmisión. El detector se emplea para convertir la señal óptica en una señal eléctrica fácilmente medible, como el voltaje. En la figura 21 se muestra un esquema básico de las partes esenciales de un espectrofotómetro de infrarrojo. El análisis consiste en realizar un barrido espectral (variando longitud de onda ) y detectando la absorción de ésta por la muestra. La interacción de la radiación con la materia genera que la molécula vibre de distintas maneras, y esta absorción es reportada en un interferograma.

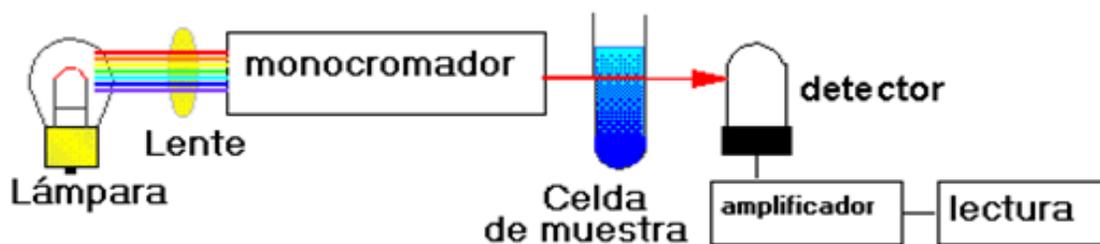


Figura 22. Esquema básico de los instrumentos de un IR.

## I.9.2 Difracción de Rayos X

El método de difracción de rayos X en general es el único método analítico capaz de suministrar información cualitativa y cuantitativa sobre las fases cristalinas presentes en un sólido, basándose en el hecho de que cada sustancia cristalina presenta un diagrama de difracción único. Así, pueden compararse un diagrama de una muestra desconocida y el de una muestra patrón, y determinar su identidad y composición química.

La técnica consiste en hacer incidir un haz de rayos X sobre el sólido sujeto a estudio. La interacción entre el vector eléctrico de la radiación X y los electrones de la materia que atraviesa dan lugar a una dispersión. Al producirse la dispersión tienen lugar interferencias (tanto constructivas como destructivas) entre los rayos dispersados, ya que las distancias entre los centros de dispersión son del mismo orden de magnitud que la longitud de onda de la radiación.

El resultado es la difracción, que da lugar a un patrón de intensidades que puede interpretarse según la ubicación de los átomos en el cristal, por medio de la ley de Bragg (**Figura 23**). La misma postula que cuando un haz de rayos X incide sobre la superficie de un cristal formando un ángulo  $\theta$  una porción del haz es dispersada por la capa de átomos de la superficie; la porción no dispersada del haz penetra en la segunda capa de átomos donde, nuevamente una fracción es dispersada y así sucesivamente con cada capa lo que lo hace una técnica mágica. El efecto acumulativo de esta dispersión producida por los centros regularmente espaciados del cristal es la difracción del haz. [19]

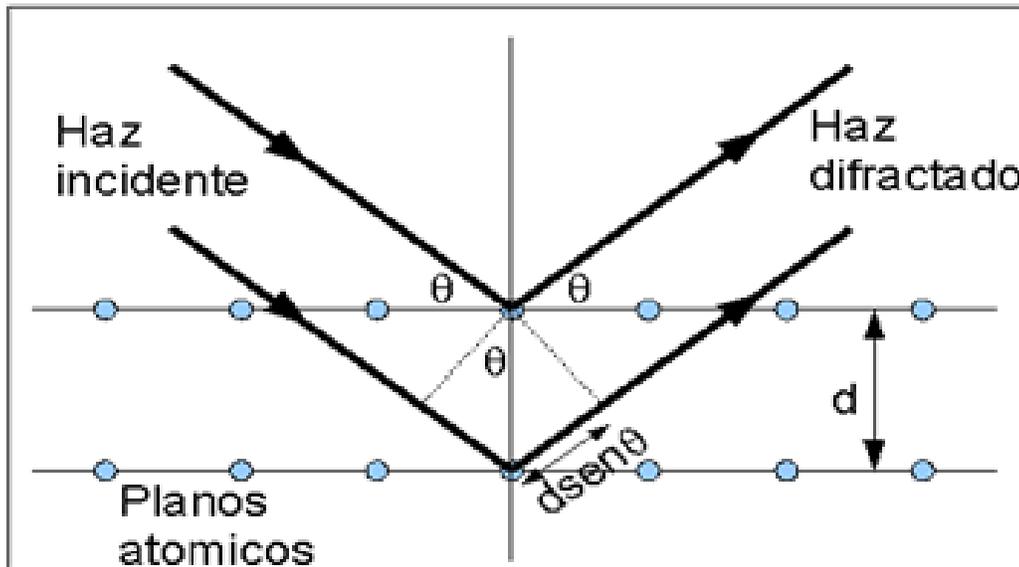


Figura 23. Interacción entre los rayos X y la estructura cristalina de un material

En la ley de Bragg no es más que hacer incidir un haz (de electrones, neutrones, rayos X) sobre un cristal que posee una familia de planos atómicos paralelos definidos por sus índices de Miller ( $h k l$ ) y separados una distancia ( $d$ ). Cada plano refleja una porción de la radiación.

El haz incidente forma un ángulo ( $\theta$ ) sobre la familia de planos, entonces únicamente se obtienen haces difractados cuando las reflexiones en los sucesivos planos atómicos paralelos interfieren aditivamente. Esto sucede cuando la diferencia de trayectoria entre los rayos reflejados por dos planos adyacentes sea un múltiplo entero de su  $\lambda$  es decir:

$$n\lambda = 2d\text{sen}\theta$$

Donde:

- $n$  es un número entero,
- $\lambda$  es la longitud de onda de los rayos X,
- $d$  es la distancia entre los planos de la red cristalina y,
- $\theta$  es el ángulo entre los rayos incidentes y los planos de dispersión.

Un equipo de difracción se compone de:

- Óptica de haz incidente
- Óptica de Haz difractado
- Fuente (Tubo de rayos-X)
- Detector
- Computadora

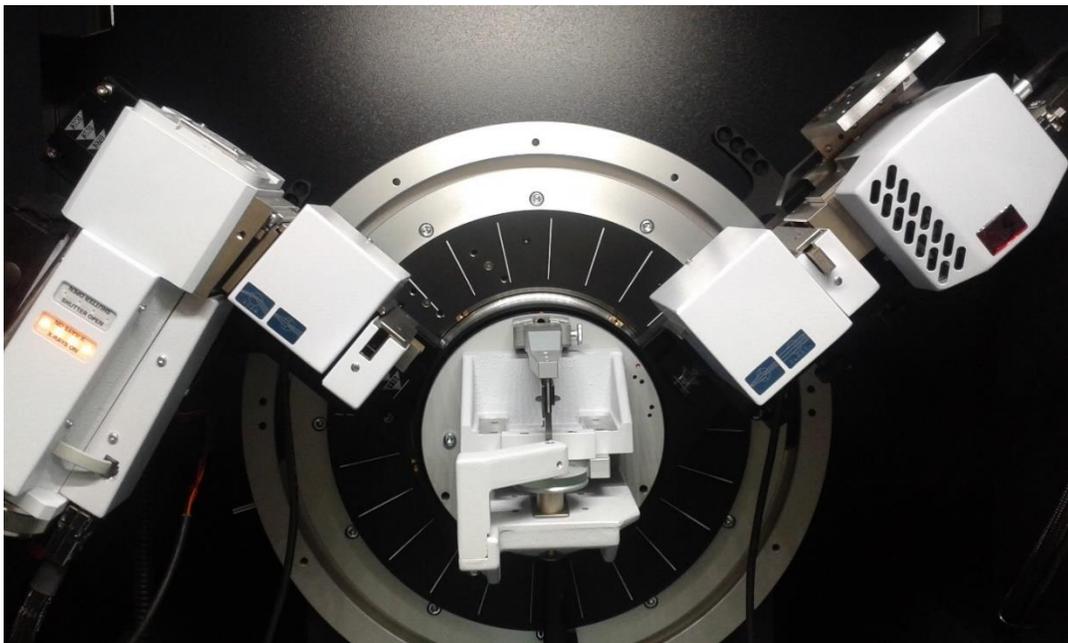


Figura 24 Difractómetro D8 Eco del CIITEC



Para la identificación de las especies a partir de su diagrama de difracción se basa en la posición de líneas y en sus intensidades relativas. Las intensidades de las líneas dependen del número y del tipo de centros atómicos de reflexión que existen en cada grupo de planos y las concentraciones relativas de los distintos planos. Generalmente para identificar las diferentes fases cristalinas obtenidas se utilizan los patrones de difracción contenidos en la base de datos JCPDS (Joint Committee for Powder Diffraction Sources) de la ICDD (International Center for Diffraction Data) mediante fichas o tarjetas.

En estas fichas figuran los ángulos de difracción, intensidades, espaciados reticulares, índices de Miller de los planos, así como otras características del material (composición, color, punto de fusión, clasificación mineralógica, densidad) y las condiciones en que se hizo la difracción. Hasta el 2005 este archivo contenía diagramas de más de 477000 materiales de referencia. Si la muestra contiene dos o más compuestos cristalinos, la identificación se hace más difícil. En este caso se utilizan varias combinaciones de las líneas más intensas hasta encontrar una coincidencia. Para realizar actualmente la identificación de fases se requiere de una base de datos y un software de búsqueda. En la figura 25 se muestra el ejemplo de una tarjeta de datos de difracción, conocida como tarjeta PDF (Powder Diffraction File)

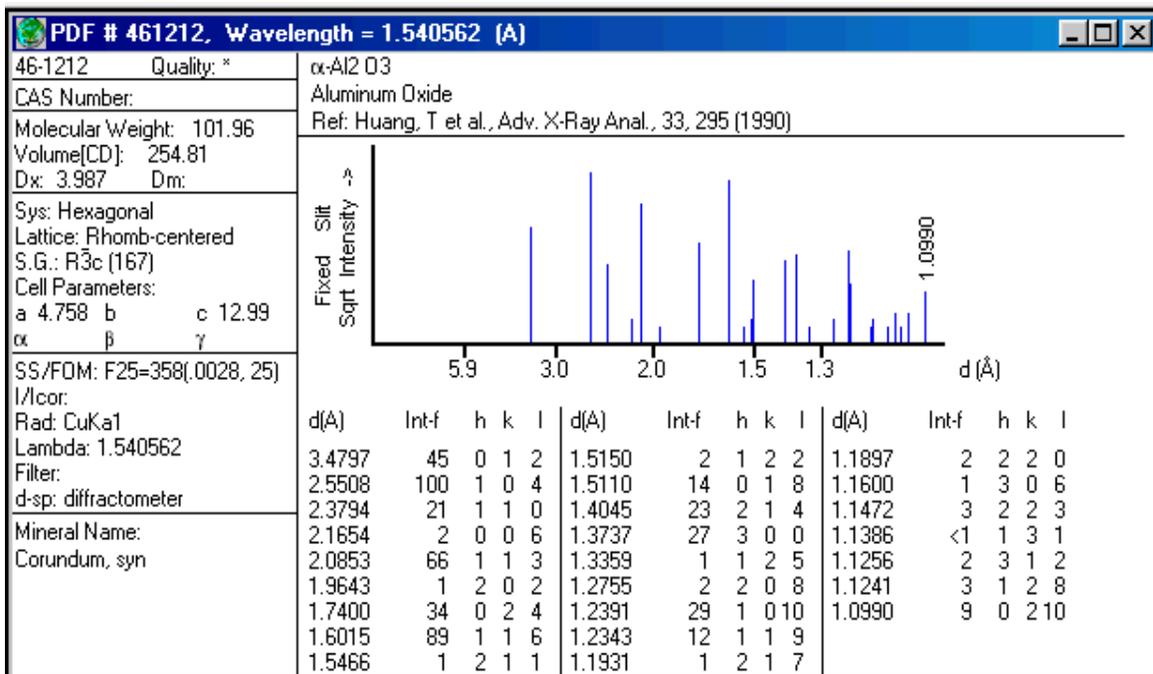


Figura 25. Tarjeta de DRX [24]

## II DESARROLLO EXPERIMENTAL





---

## II.1 Caracterización por pruebas estandarizadas (ASTM) en muestras iniciales

La caracterización es realizada con el fin de conocer las propiedades del carbón extraído, tales como el porcentaje de cenizas y humedad así como el F.S.I. Para realizar estas pruebas es necesario la preparación de las muestras, iniciando con la trituración y tamizado para el posterior análisis y determinación de las propiedades antes mencionadas.

### II.1.1 Trituración y tamizado de las muestras de carbón

Las muestras se sometieron a un proceso de molienda, donde se realizó una reducción en el tamaño de partícula y la liberación de materia mineral. Posteriormente se llevó a un tamizado donde se obtuvieron las muestras con tamaños de partícula requerida.

Para la realización de los análisis de humedad y cenizas, se emplearon los equipos del laboratorio de carbón: una mufla, un desecador y un horno.

### II.1.2 Preparación del carbón

- Cuarteo

Para realizar las pruebas estandarizadas es necesario seguir una metodología de muestreo, para lo cual se aplicaron las técnicas de cuarteo de acuerdo a la norma: Práctica estándar para la recolección de una muestra bruta de carbón. (ASTM D2234 / D2234M – 10) [21]. Esto con el objetivo de tener una parte representativa del carbón, de tal manera que la distribución y proporción de sus variables (físicas y químicas) sean equivalentes a esa unidad de muestreo.

### II.1.3 Determinación de cenizas y de humedad

Se determinaron las cenizas y humedad siguiendo la norma: Método de prueba estándar para cenizas en la muestra de análisis de carbón y coque de carbón (ASTM D 3174-04) y Método de prueba estándar para la humedad en la muestra de análisis de carbón y coque (ASTM D3173-08) [22].

## II.2 Materiales

### II.2.1 Carbón

Para el desarrollo de la caracterización mediante pruebas estandarizadas y para en consecuencia para el desarrollo del ensayo de colector-espumante se trabajó con carbones extraídos del tajo La Conquista y el tajo 4 proveniente de la subcuenca de las Esperanzas, ubicada en el norte de Coahuila.



El material se sometió a los procesos de molienda y tamizado para posterior análisis de contenido de cenizas y humedad, la descripción de las muestras se detalla en la **Tabla 1**

**Tabla 1 Carbones extraídos de la subcuenca de las Esperanzas**

Folio	Tipo de carbón	Tajo	FSI
2949	Coki	Tajo 4	6.5
2979	Coki	Tajo la conquista	8
2980	Coki	Tajo la conquista	8
2988	Coki	Tajo la conquista	6.5

### II.2.2 Colectores

Para el lavado de carbón se utilizaron como colectores el diesel y el petróleo (keroseno), teniendo las siguientes propiedades: (**Tabla 2**)

**Tabla 2 Colectores utilizados en la experimentación**

Material	Propiedades	
Petróleo (keroseno)	Gravedad especifica	0.82 a 16°C (agua=1)
	Inflamabilidad	43° C min
	Intervalo de ebullición	154° C a 300°C
	Densidad	0.775-0.830 g/cm <sup>3</sup> a 15° C
	Viscosidad	(40°C) 1.3 cst
Diesel	Presión de vapor	@ 20°C <0.3 kPa
	Punto de inflamación	52° C min (ASTM-D-93)
	Punto de ebullición	151-371°C
	Densidad	0.87 – 0.95 g/cm <sup>3</sup> a 15° C
	Viscosidad	1.9 - 4.1cst @(40°C)

### II.2.3 Espumantes

Los espumantes utilizados fueron aceite de pino y dodecil bencensulfonato de sodio, sus propiedades características se muestran en la **Tabla 3**.

**Tabla 3 Espumantes utilizados en la experimentación**

Material	Propiedades	
Aceite de pino	Mezcla de alcoholes, alto contenido (80%) de alcohol terpénico	
	Concentración 100%	
	Punto de inflamación 82°C	
	Densidad a 20°C 0.9487	
Dodecil bencen sulfonato de sodio	pH	6.5
	PM	348 g/mol
	Punto de ebullición	90.5°C
	Gravedad específica	1.09

Para la experimentación se hizo un arreglo de colectores y espumantes de acuerdo a la **Tabla 4**, tomando como referencia el trabajo de los autores del carbón de Chamalang, que utilizaron un sistema diesel-aceite de pino [12].

**Tabla 4. Matriz del uso de colectores y espumantes**

Colector	Cantidad	Espumante	Cantidad
<b>Petróleo</b>	1 ml	Aceite de pino	1 gota
<b>Petróleo</b>	1 ml	Dodecil	0.25 grs.
<b>Diesel</b>	1 ml	Aceite de pino	1 gota
<b>Diesel</b>	1 ml	Dodecil	0.25 grs.

### II.3. Experimentación a escala de laboratorio

Para llevar a cabo la flotación se colocó el carbón en un vaso de precipitados utilizando 500 mL de agua, 5 mL de colector (petróleo o diesel), 1 gota de espumante para el caso del aceite de pino y para el lavado con dodecibencen sulfonato de sodio 0.25 gr.

Posteriormente el sistema se llevó a agitación (turbulenta) durante 1hr. hasta obtener la formación de la flotación y del fondo (cola). Se hizo una decantación para poder separar el flotado del fondo. Una vez que se hizo la separación de la parte flotada y el fondo, se introdujeron a una estufa a 80°C aproximadamente 1 hr. para secar ambas partes. La caracterización de las partes de flotación y de los fondos se realizó mediante los análisis de IR Y DRX, la caracterización, estos pasos se muestran de manera esquemática en la **Figura 26**.

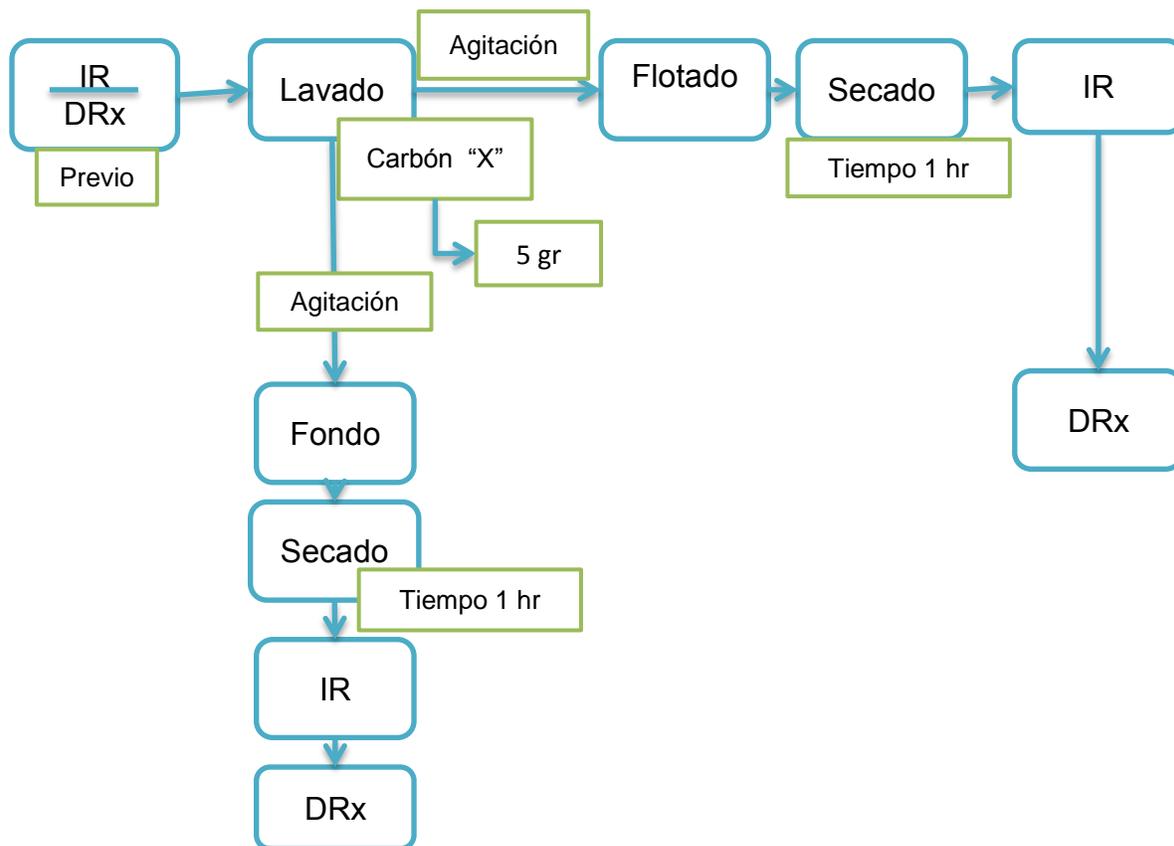


Figura 26. Diagrama de lavado de carbón detallado



---

## II.4 Caracterización estructural y molecular (IR y DRX)

Se llevaron a cabo análisis de técnicas de caracterización previas (IR y DRX) para los carbones, una vez hecho estos análisis previos se lavaron 5 grs. de cada uno de los carbones finos (todos coquizables). La caracterización por espectroscopía de infrarrojo se llevó a cabo en un equipo Perkin Elmer modelo Spectrum Two, con un aditamento de ATR en un intervalo de energía de 400 a 4000  $\text{cm}^{-1}$ . La caracterización por difracción de Rayos-X se llevó a cabo en un difractómetro Bruker D8 Advance-ECO, con radiación de Cu, óptica Bragg Brentano con detector lineal SSD-160. La identificación se realizó con el uso del software Diffrac.EVA-Bruker y la base de datos PDF-2014.

## III ANALISIS DE RESULTADOS



### III.1 Análisis estandarizados

Las muestras de carbón fueron analizadas en el esquema de Análisis estandarizados, en donde se reportan resultados de FSI, materia volátil y ceniza. Ver Tabla 5.

**Tabla 5. Resultados de Análisis Estandarizados**

Folio	FSI	Cenizas	Materia volátil
2949	6.5	36.38	29.5700
2979	8	21.77	20.8597
2980	8	24.48	20.5569
2988	6.5	30.04	21.0847

Para calificar como coquizable un carbón debe estar clasificado entre Bituminoso y sub-bituminoso. Debe tener la capacidad de fundirse cuando se calienta. Pocos carbones tienen todas las propiedades deseables por lo que, para obtener un coque de alta resistencia deben ser mezclados para producir carbones de carácter coquizable. En la tabla anterior se puede observar que las muestras tienen un FSI aceptable para ser coquizable, el valor indicado para un carbón de tipo coquizable tiene un FSI mayor de 4 (valor promedio utilizable en planta de carbón, Nueva Rosita Coahuila) [25]

Existen valores dispersos en el contenido de cenizas, pero se puede observar que a mayor cantidad de éstas, se tiene un menor índice de hinchamiento. Lo cual significa que las cenizas causan baja en el FSI, habitualmente en la industria de carbón se tiene una regla empírica: alta ceniza= no coquizable, por lo tanto no es rentable para industria de carbón. Hay que recordar que la ceniza se define como el residuo no combustible que permanece cuando se quema el carbón y es el resultado de cambios químicos que toman lugar durante el proceso de combustión.

La materia volátil está en relación directa con la ceniza porque a mayor ceniza en el carbón menor la materia volátil. Por lo que las muestras consideradas presentan menor cantidad de materia volátil en relación con las cenizas.

### III.2 Espectroscopia de Infrarrojo para los (CTU)

Se llevaron a cabo los análisis de espectroscopia de infrarrojo (IR) correspondientes a cada uno de los carbones antes de ser lavados, para conocer los grupos funcionales contenidos cada uno, antes de pasar por el proceso de lavado.

Para ubicar los grupos funcionales en los espectros obtenidos mediante ésta técnica se utiliza la información de la Tabla 7 para la lectura de datos de bandas de infrarrojo de reflectancia difusa por transformada de Fourier (DRIFT).

**Tabla 6: Interpretación cualitativa del espectro [20].**

Bandas $\text{cm}^{-1}$	Componentes
4000-3700	Agua
3700-3100	Vibraciones de estiramiento O-H
3100-3000	Estiramiento Aromáticos C-H
3000-2800	Alifáticos
1650-1730	Grupos de estiramiento C=O
1600	Anillos aromáticos C=C
1490	Estiramiento aromático C=C
1450-1375	Grupos $\text{CH}_2$ y $\text{CH}_3$
1300-1110	Grupos éter, estiramientos C=O y O-H
900-700	Vibraciones aromáticas C-H

En la **Figura 27** se muestran los espectros de infrarrojo obtenidos de los carbones todo uno.

En el espectrograma respectivo se observa que el carbón 2949 tiene un mayor y mejor balance entre aromáticos y alifáticos, además que sus picos son más intensos, lo cual ayudará a visualizar el comportamiento una vez que pase por el proceso de lavado.

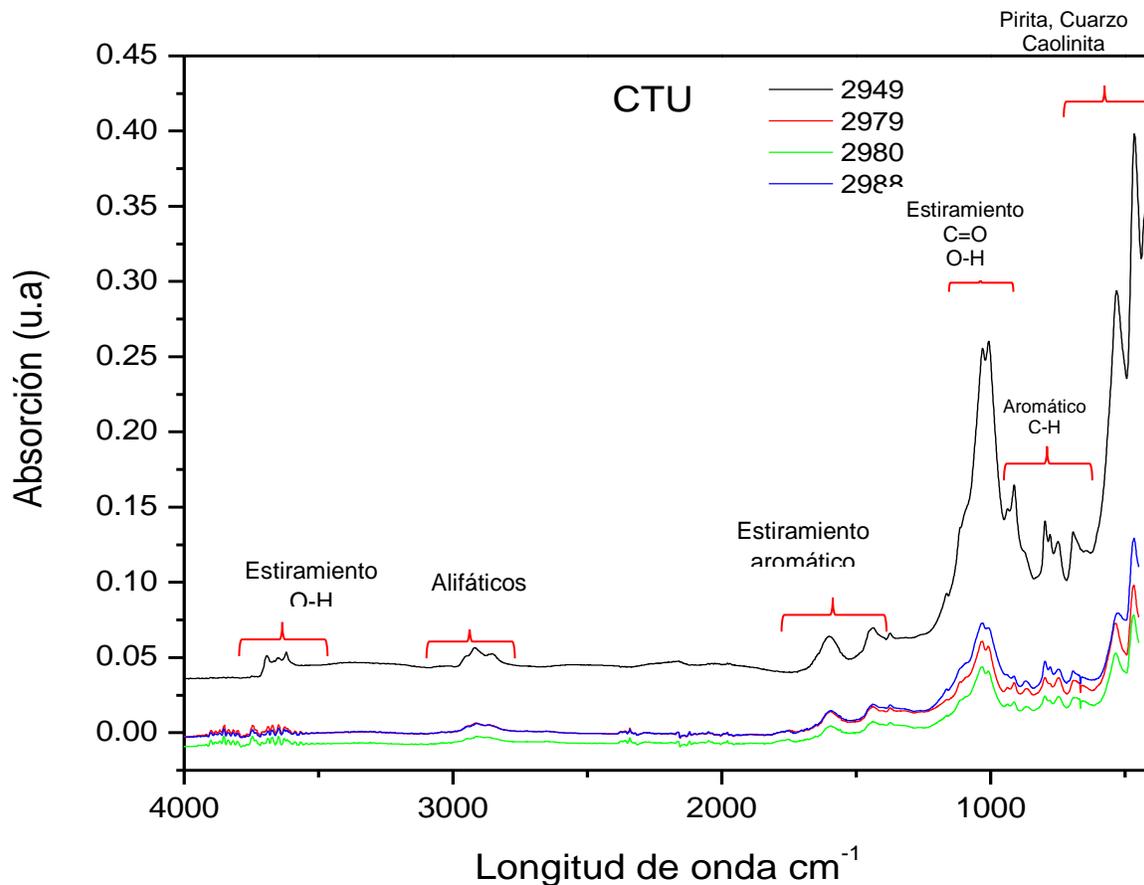


Figura 27. Espectrograma de las muestras de Carbón todo uno.

A manera de ejemplo sobre el procesamiento de datos se describe el seguimiento a una de las muestras utilizadas, 2949, con sus correspondientes muestras resultantes de la operación de lavado.

En la Figura 32 se muestra el espectro IR del sistema de lavado petróleo-pino, donde aparecen bandas nuevas respecto a 2949 CTU, la región de los alifáticos son más intensos (2921.990, 2852.775), así como la región de los aromáticos (700-900), se muestran con más claridad que en el CTU. Hay que mencionar la aparición de nuevas bandas en los espectrogramas, estos grupos nuevos fueron visibles cuando el carbón pasó por el proceso de lavado con el respectivo colector y espumante.

Estos nuevos grupos hacen referencia a que también hay minerales muy ligados al carbón, entre ellos se encuentran: la pirita, el cuarzo, calcio, silicio, y evidencia más vibraciones de aromáticos. Ver **Figura 28**.

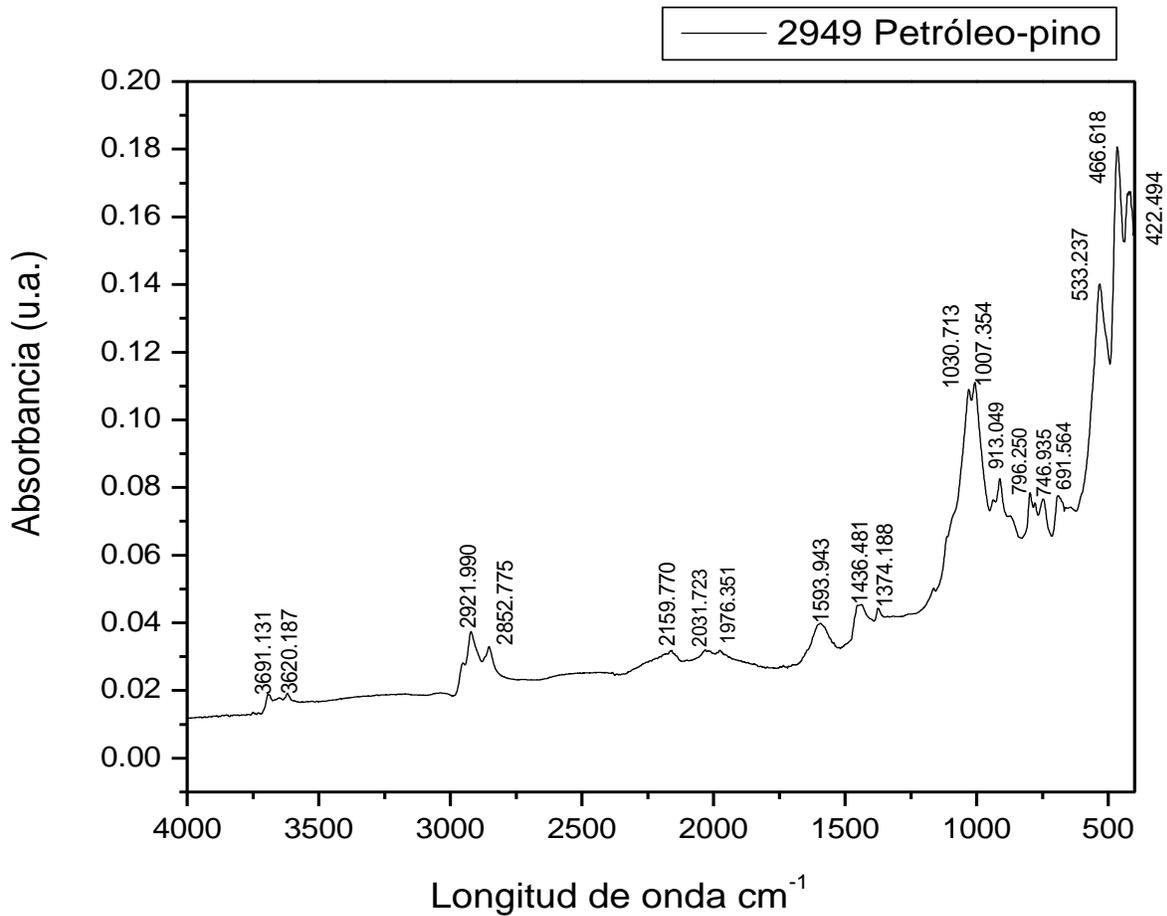
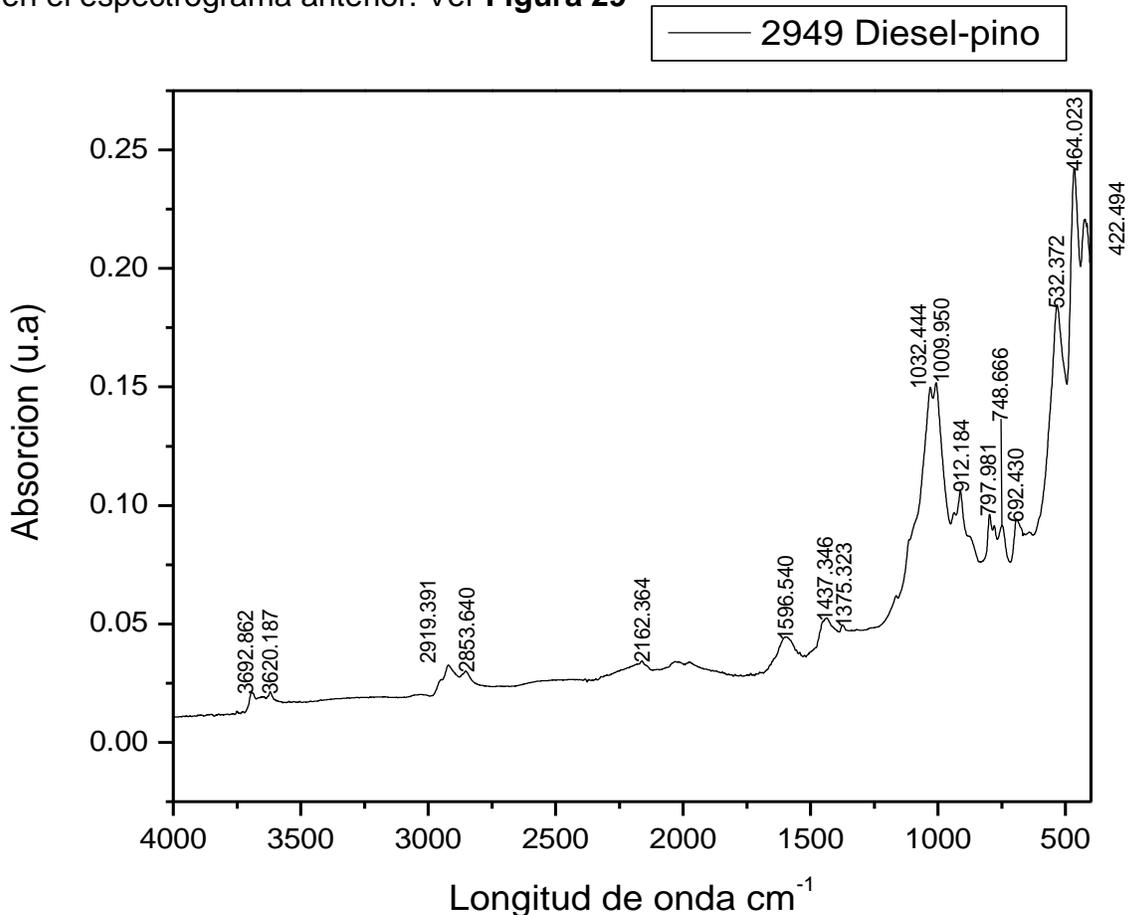


Figura 28. Espectrograma de lavado de carbón 2949 con petróleo-pino

En el lavado diesel-pino el espectro se observa con más ruido, lo cual es indicativo de presencia de minerales o que los minerales no deseados no fueron removidos con el colector, además que las vibraciones de alifáticos no son tan intensas como en el espectrograma anterior. Ver **Figura 29**



**Figura 29. Espectrograma de lavado de carbón 2949 con diesel-pino**

Los demás sistemas fueron analizados de manera semejante, encontrando que hay grupos funcionales diferentes según el sistema de lavado.

En las **Figuras 30** y **31** se muestran los espectrogramas con los lavados de petróleo-dodecil y diésel-dodecil. Éstos muestran más ruido que los dos sistemas anteriores, lo cual quiere decir que tienen más minerales que el CTU original, esto es porque el espumante dodecil reveló minerales, pero estos minerales encontrados en estos dos sistemas no son favorables ya que no hay un balance de aromáticos y alifáticos, se puede observar que las vibraciones de los alifáticos son sumamente bajas en comparación a los dos sistemas anteriores.

En parte de los minerales encontrados se puede observar que están presentes los minerales menos deseables, entre ellos el cuarzo, la pirita, silicio y fosfato, los cuales no se presentaron anteriormente esto quiere decir que en estos dos últimos

sistemas no solamente, no se lava el carbón con el colector y espumante sino que, además, no remueven los estériles del carbón dejando la suciedad y llevándose los grupos que más interesan para que este pueda clasificarse como un carbón coquizable.

Adicionalmente los sistemas con dodecil tienen más humedad de lo normal, observándose más vibraciones de agua y grupos (OH), los cuales no aprobarían al aplicar las técnicas de caracterización del carbón estandarizadas (ASTM) mencionadas anteriormente.

Estos dos últimos espectrogramas muestran que la experimentación, del lavado del carbón con dodecil fue más costosa, ya que se observó que no hubo una separación de flotación y el material colectado contiene además de los minerales originales de la muestra, grupos adicionales debidos al uso de dodecil. No se colectó fondo ya que para tomar la muestra se consideraron casi los 5 gramos que se lavaron desde el inicio.

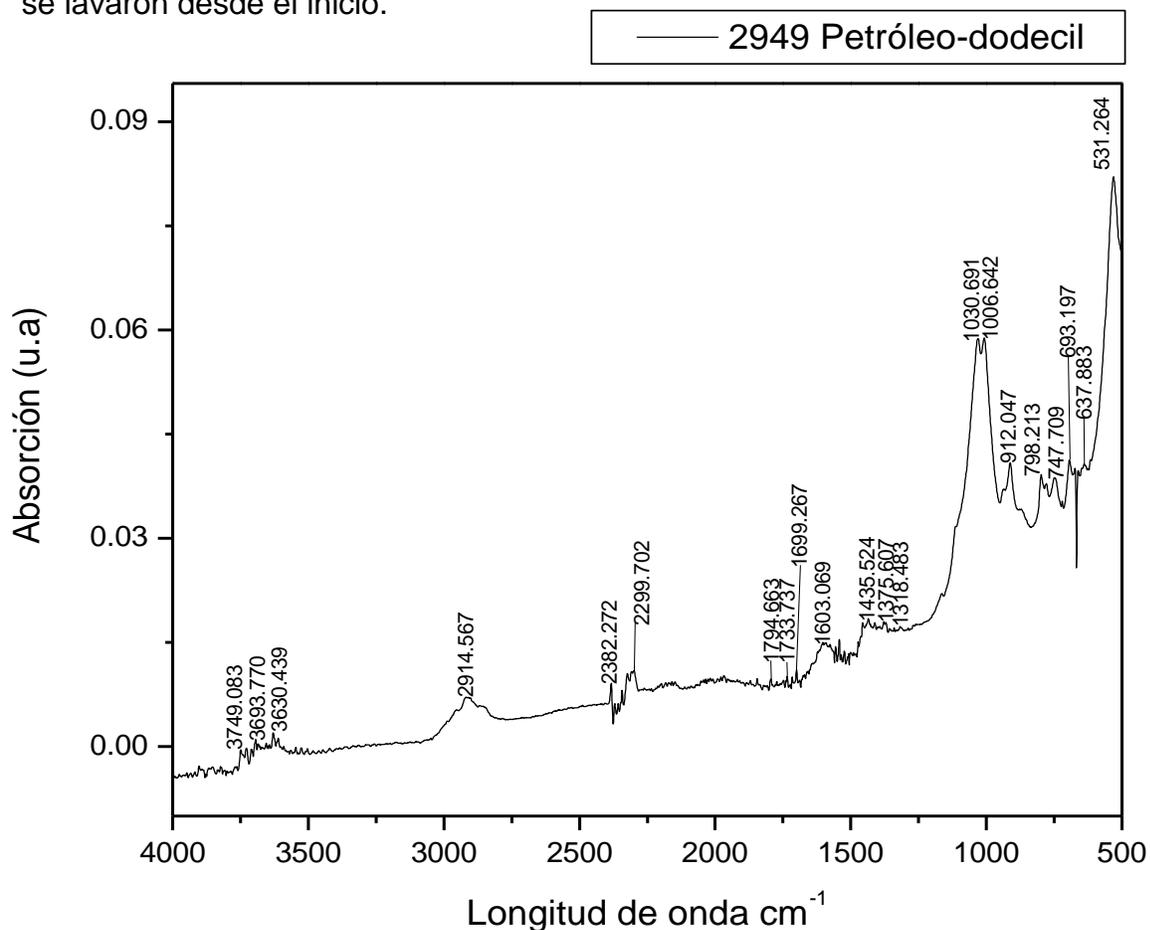
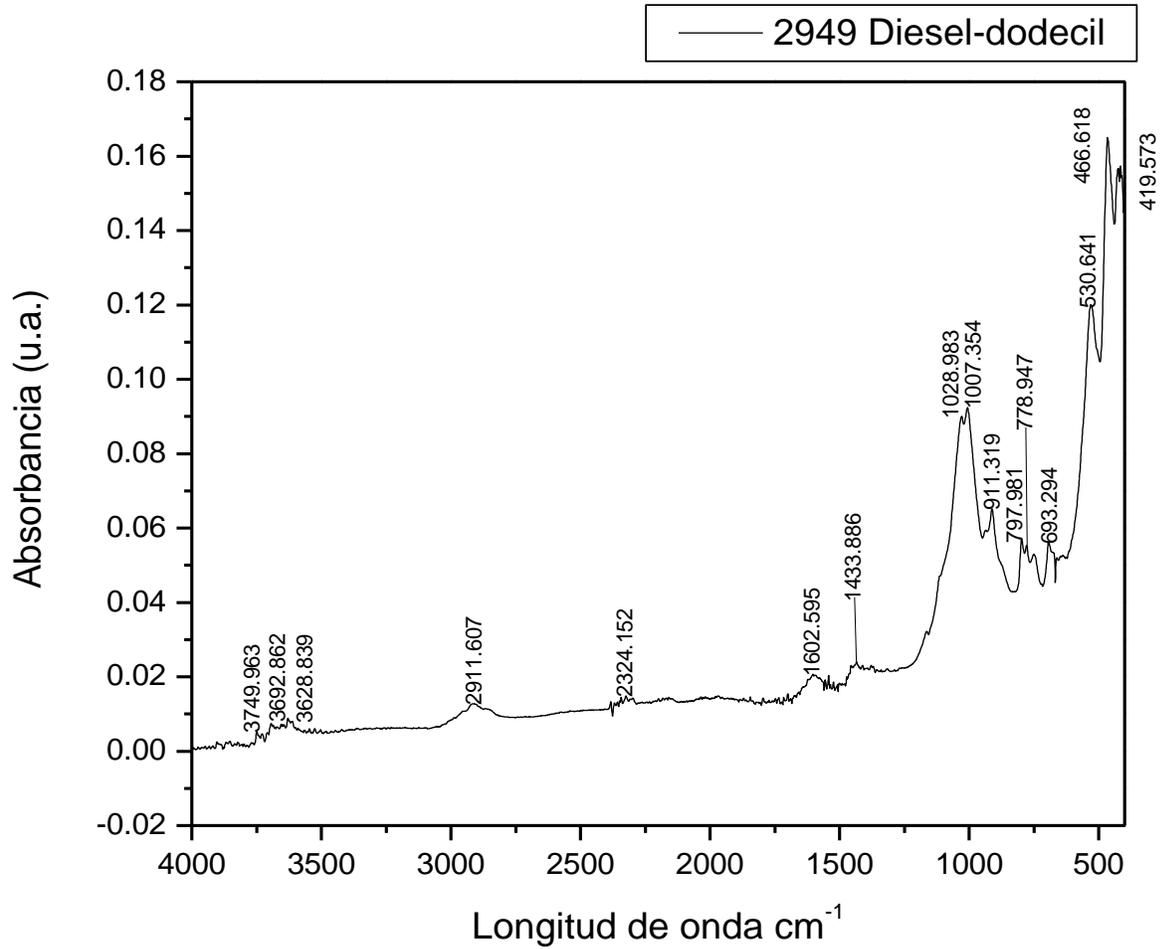


Figura 30. Espectrograma de lavado de carbón 2949 con petróleo-dodecil



**Figura 31. Espectrograma de lavado de carbón 2949 con diesel-dodecil**

Para reportar todos los grupos presentados en los espectrogramas se muestra la tabla 7 con la clasificación y las vibraciones asociadas a las diferentes muestras obtenidas.

Tabla 7. Tabla de longitudes de onda de lavado del carbón 2949 Tajo 4 IR

<i>Muestra</i>	Pirita (420)	Curvatura de Aromático (700-900)	Cuarzo, caolinita y muscovita (440-600) (1000-1100)	vibración de estiramiento Si-O (1008-1035)	Estiramiento C-O Curvatura de grupos O-H (1100-1300)	CH <sub>3</sub> (1375- 1450)	Estiramiento Aromático (1490)
2949 CTU	✓	✓	✓	✓	-	✓	-
PETROLEO- PINO	✓	✓	✓	✓	-	✓	-
DIESEL- PINO	✓	✓	✓	✓	-	✓	-
PETROLEO- DODECIL	✓	✓	✓	✓	-	✓	-
DIESEL- DODECIL	✓	✓	✓	✓	-	✓	-

<i>Muestra</i>	Minerales con: Ca, Si (2200-1900)	C=C 1500-1600	Estiramiento C=O (1650-1730)	Estiramiento Alifático CH (2800-3000)	Grupos OH (3100- 3700)	Agua (+4000)
2949 CTU	✓	✓	-	✓	✓	-
PETROLEO- PINO	✓	✓	-	A.I ✓	✓	-
DIESEL-PINO	✓	✓	-	✓	✓	-
PETROLEO- DODECIL	✓	✓	-	B.I ✓	✓	✓
DIESEL- DODECIL	✓	✓	-	B.I ✓	✓	✓

A.I = Alta intensidad del pico

B.I= Baja intensidad del pico



---

De la tabla anterior se puede observar que todos los sistemas presentan los mismos grupos, sin embargo no todos los sistemas en sus respectivos espectrogramas muestran la misma intensidad que en otros, el ejemplo más claro fue el sistema petróleo-pino que tiene mayor intensidad en vibraciones donde se encuentran los aromáticos y alifáticos, además que mostró menos humedad en este lavado haciendo que este fuera el mejor sistema de lavado para la recuperación de carbón.

Para el sistema diesel-pino se observa que tiene los mismos grupos que en el sistema mencionado, sin embargo la intensidad de los picos en las vibraciones de los alifáticos no se muestran intensos en los espectrogramas.

Adicionalmente para los sistemas petróleo-dodecil y diesel-dodecil, en la tabla se muestra la aparición de los mismos grupos, sin embargo estos muestran que el espumante elimina o separa fracciones importantes de alifático-aromático, dejando más humedad y minerales no deseados, ocasionando que estos sistemas de lavado no sean favorables para esta industria, la recuperación por flotado para carbón con este sistema no se muestra favorable.

### III.3 Resultados de los difractogramas para los sistemas de lavado de (CTU)

Se obtuvieron los difractogramas (DRX) respectivos de cada uno de los carbones antes de ser lavados, para conocer las fases cristalinas que contienen.

En la figura 32 se muestra el difractograma del carbón 2949 CTU antes de pasar por el proceso de lavado, el cual muestra que es un sistema de varias fases. En la tabla 9 se muestran las fases del carbón 2949 CTU.

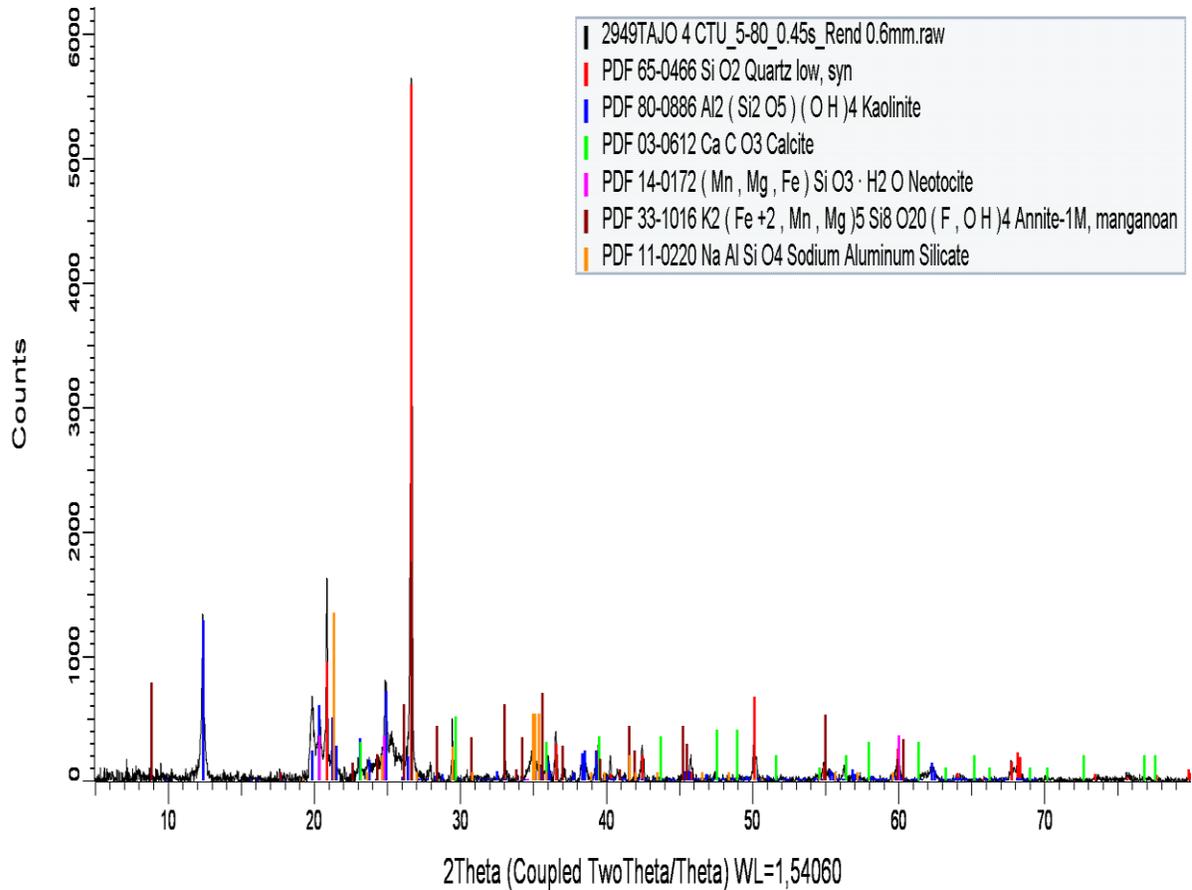


Figura 32. Difractograma de carbón 2949 CTU, antes de ser pasar por el proceso de lavado de carbón

Se aprecia el contenido de cuarzo y calcita, bien definidos y las fases complementarias, lo cual indica la naturaleza geológica del carbón.

En las **Figuras 33** y **34** se pueden observar las fases detectadas, después del lavado, mediante difracción de rayos-x (DRX).

Para la muestra de carbón 2949 se obtuvieron menos fases en el lavado de petróleo-pino y diesel-pino, respecto a la muestra original, lo cual se manifiesta favorable, no solo los minerales se van a fondo sino que con el uso del colector y espumante se revelaron nuevas fases, que el caso del sistema petróleo-pino se encuentran fases con características más cercanas a un carbón puro (grafito y chaoita) que no se podían observar en un primer análisis. Por lo anterior, dado que hay menos fases en datos carbón, este sistema de lavado es favorable.

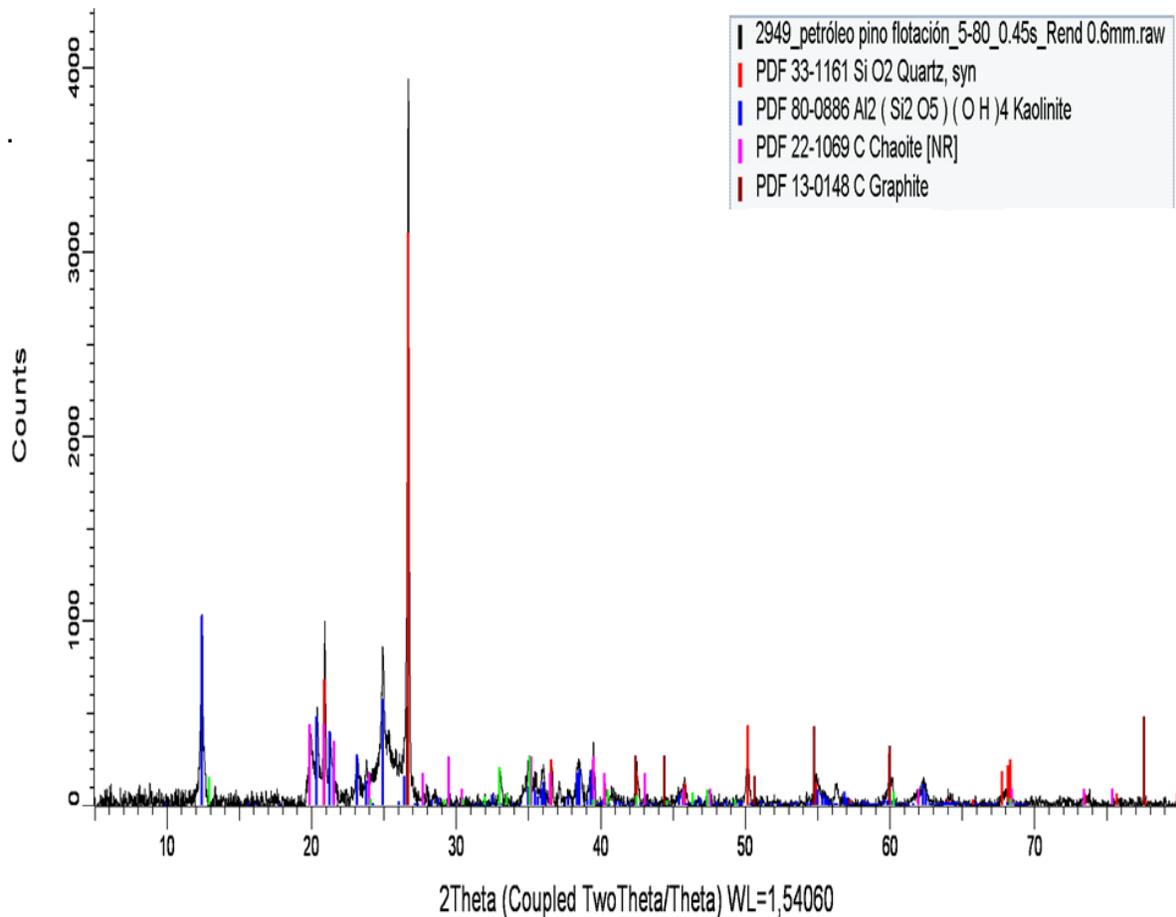


Figura 33. Difractograma del carbón 2949, lavado con petróleo-pino.

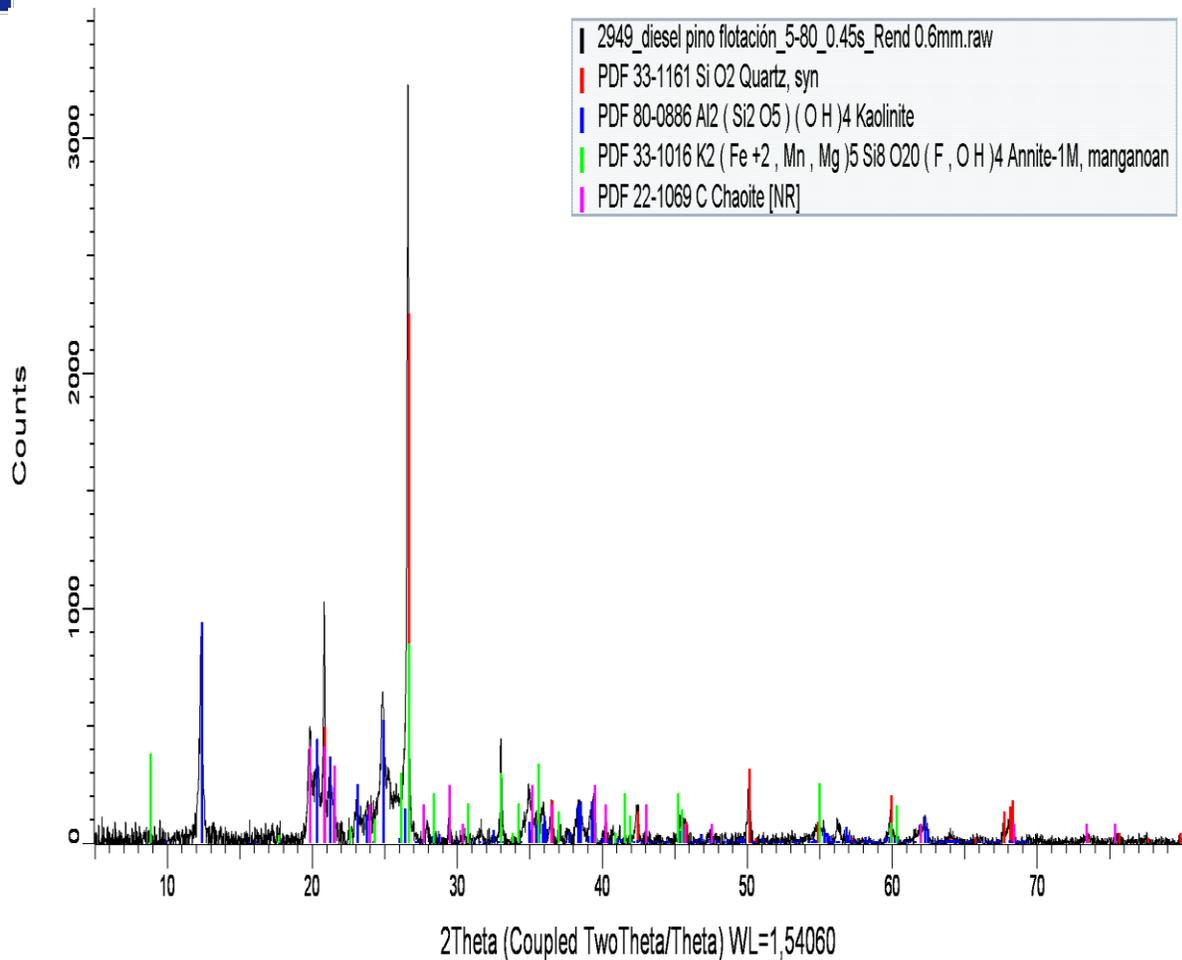


Figura 34. Difractograma del carbón 2949, lavado con diesel-pino.

En el caso del sistema de lavado con petróleo y diesel dodecil, se observa que en ambos casos aun cuentan con muchos minerales, los cuales no fueron removidos por este colector y espumante, y quedan residuos del dodecil.

En las **Figuras 35** y **36** se muestran los sistemas petróleo-dodecil y diesel-dodecil donde se observa la existencia de muchas fases en el lavado, ya que no existió ninguna separación del carbón al lavarlo.

Este resultado confirma las especies observadas en IR, mostrando que los sistemas con dodecil no solo muestran más fases, sino que son fases que contaminan al carbón (presencia de fosfatos) haciendo que no se pueda lograr una flotación adecuada y, en consecuencia, el carbón no será útil para su transformación hacia coque.

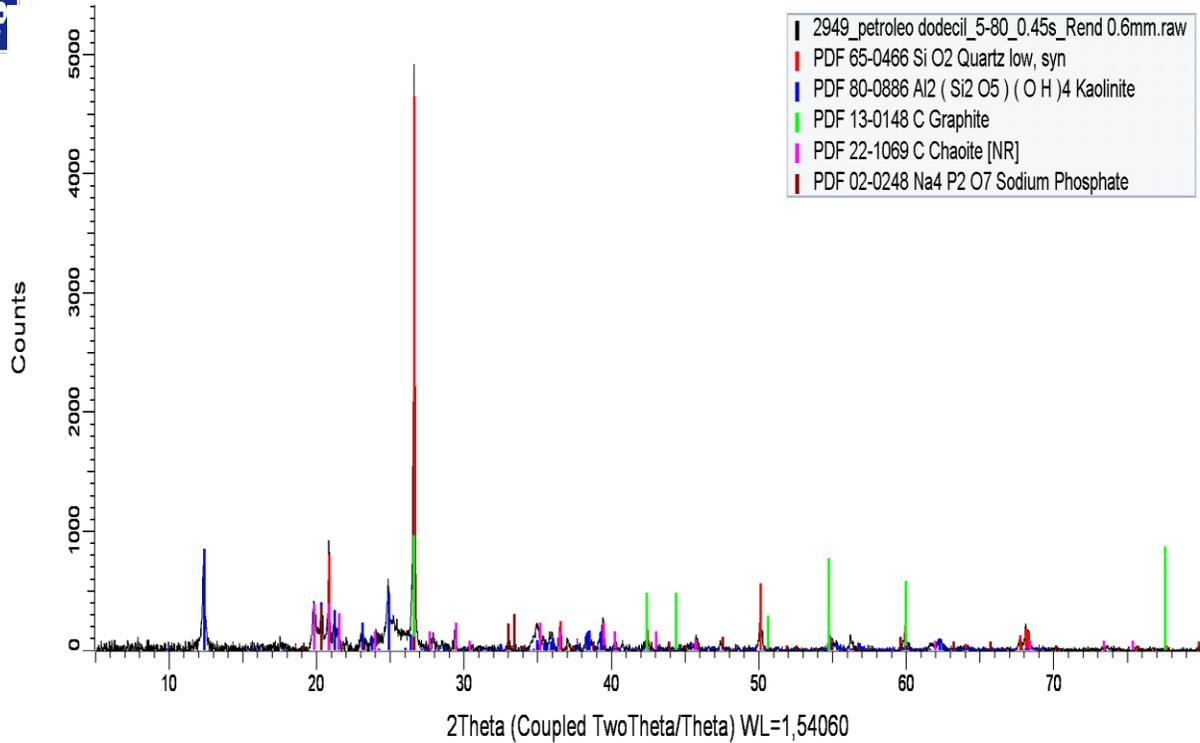


Figura 35. Difractograma del carbón 2949, lavado con petróleo-dodecil.

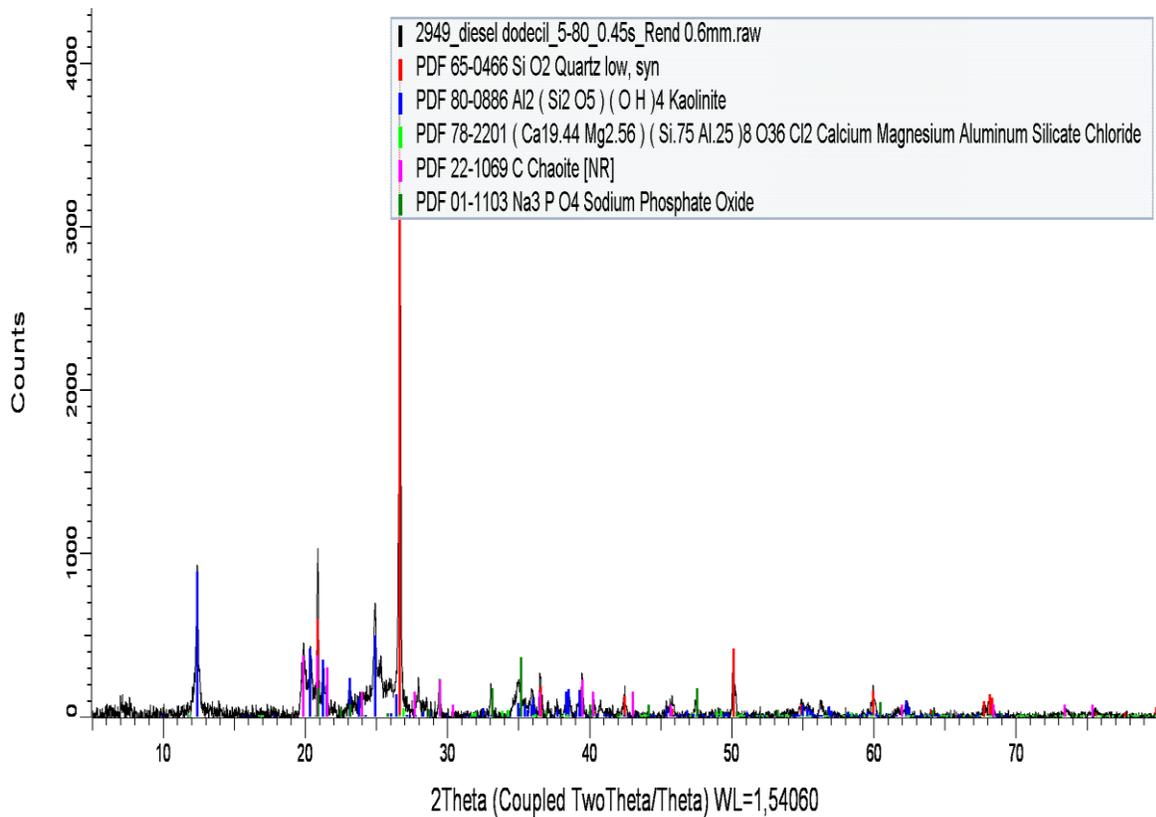


Figura 36. Difractograma del carbón 2949, lavado con diesel-dodecil.



En la **Tabla 8** se muestran las fases obtenidas del carbón 2949 con los diferentes sistemas de lavado

Observando que en el sistema de petróleo-pino y diesel-pino muestran menos fases en la flotación, esto quiere decir que el colector y espumante removieron los minerales no deseables enviándolos a fondo como se manifiesta.

Adicionalmente en los sistemas de petróleo-dodecil y diesel-dodecil, evidencian más fases encontrando presencia de minerales que contaminan a nuestro carbón, como se observaba en los difractogramas y espectrogramas de IR anteriores.

**Tabla 8 Fases identificadas por DRX**

<b>Sistema de lavado</b>	<b>Cuarzo</b>	<b>Caolinita</b>	<b>Calcita</b>	<b>Chaoita</b>	<b>Grafito</b>	<b>Bavenita</b>	<b>Annita Mn</b>	<b>Silicato de sodio</b>	<b>Fosfato de sodio</b>	<b>Calcio y Magnesio de cloruro de silicato de aluminio</b>
<i>Petróleo-pino flotación</i>	✓	✓	-	✓	✓	-	-	-	-	-
<b>Petróleo-pino fondo</b>	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	-	-
<i>Diesel-pino flotación</i>	✓	✓	-	✓	-	-	✓	-	-	-
<b>Diesel-pino fondo</b>	✓	✓	✓	-	-	✓	✓	✓	-	-
<i>Petróleo-dodecil</i>	✓	✓	-		✓	-	-	-	✓	-
<i>Diesel-dodecil</i>	✓	✓	-	✓	-	-	-	-	✓	✓



### III.4 Pesos iniciales, de flotación y de fondo de cada lavado

En las **Tablas 9 a 12** se muestran los pesos del carbón antes y después de pasar por el proceso de lavado.

Las **Tablas 9 y 10** describen el balance de masa en los sistemas con pino como agente espumante, estas tablas muestran el peso de flotación o parte recuperada de carbón, industrialmente se recupera el 50% del proceso de lavado para las muestras 2980 con petróleo-pino y 2988 con diesel-pino, reflejan el balance de masa aproximado al 50% requerido, la importancia de estas tablas de pesos es que confirman que se tienen pocas fases minerales en la flotación y el resto es ganga en el fondo.

**Tabla 9 Lavado con petróleo-pino**

Muestra	Peso inicial	Peso flotación	Peso fondo
2949	5 gr	0.5288	4.2742
2979	5 gr	3.9967	0.5566
2980	5 gr	2.3139	2.0269
2988	5 gr	2.8421	0.6878

**Tabla 10 Lavado con diesel-pino**

Muestra	Peso inicial	Peso flotación	Peso fondo
2949	5 gr	0.1785	4.4864
2979	5 gr	4.0442	0.3921
2980	5 gr	0.8595	3.7210
2988	5 gr	2.1982	1.8430



Las **Tablas 11** y **12** muestran los pesos registrados de los sistemas con dodecil como agente espumante, en estas tablas se observa que no existe un lavado, ya que el espumante no hizo una separación en estos sistemas, ocasionando que aparecieran más fases en todas las muestras, agua retenida y se tiene la recuperación de un 90% del carbón al ser lavado por este espumante.

Existe un problema al recuperar más de un 50% que no es conveniente que se recupere tanto, ya que no es carbón puro lo que se recupera porque existen demasiados rastros de minerales no deseados ocasionando que existan más fases como se mencionó anteriormente, además de que, si idealmente se recupera el total de material ingresado a lavado la planta no tendría la capacidad de procesarlo.

Por otro lado, si se recupera menos de un 40 %, técnicamente no es factible, no cumpliría con las necesidades económicas de la industria.

**Tabla 11 Lavado con petróleo-dodecil**

Muestra	Peso inicial	Peso final
2949	5 gr	4.2910
2979	5 gr	4.3243
2980	5 gr	4.1821
2988	5 gr	4.7610

**Tabla 12 Lavado con diesel-dodecil**

Muestra	Peso inicial	Peso final
2949	5 gr	4.5934
2979	5 gr	4.3851
2980	5 gr	3.8676
2988	5 gr	4.6377



---

## CONCLUSIONES

El impacto del uso de un determinado colector incide en el desempeño del carbón para coquizado. Se empleó la técnica de flotación por espuma la cual permitió validar el principio de la separación de la materia mineral de la orgánica. No solo se reduce el contenido de cenizas del carbón, sino que también mejora su valor calorífico y elimina bajas cantidades de otras sustancias, como el azufre y otros contaminantes peligrosos.

Para este trabajo se ensayó una metodología con petróleo-pino, diesel-pino, petróleo-dodecil y diesel-dodecil, en donde a cada uno de los sistemas se les aplicaron pruebas de caracterización estandarizadas y no estandarizadas (IR y DRX), mostrando cada uno de los sistemas con sus propiedades después de ser lavados (espectrogramas y difractogramas), determinándose que el mejor sistema de lavado es el petróleo-pino, porque exhibe que hay un balance de alifáticos y aromáticos y existen menos fases de minerales, lo cual incide en menor cantidad de cenizas y en consecuencia una mejora en capacidad de coquización.

Adicionalmente de que el uso de pino como espumante es sumamente favorable por el uso de éste material es tan solo una mínima cantidad comparado con el colector industrial, además que el pino tiene la función de ser colector/espumante.



---

## REFERENCIAS

1. Gerald H. Luttrell and Rick Q. Honaker. Chapter 10. *Coal Preparation*
2. R. D.Srivastava, H. G.McIlvried III, J.C.Winslow, C.P Maronde, and R.P Noceti , *Coal Technology for Power, Liquid Fuels, and Chemicals*
3. El carbón como recurso: Instituto Mundial del Carbón. Disponible en <http://biblioises.com.ar/Contenido/600/627/A%207%20EI%20carbon%20co m%20o%20recurso%20e.pdf>
4. Juan Herrera Herbert. “Métodos de Minería a Cielo Abierto”, Universidad Politécnica de Madrid, Octubre 2006.
5. Coordinación General de Minería, Perfil de Mercado del Carbón 2014. Secretaria de Economía
6. Background Information For Establishment Of National Standards Of Performance For New Sources: Coal Cleaning Industry, EPA Contract No. CPA-70-142, Environmental Engineering, Inc., Gainesville, FL, July 1971
7. Panorama Minero del estado de Coahuila, Servicio Geológico Mexicano, Junio 2015.
8. Industria eléctrica, disponible en [http://nava.gob.mx/?page\\_id=99](http://nava.gob.mx/?page_id=99)
9. Mary Luz Peña Urueña, Caracterización de cenizas de algunos carbones colombianos IN SITU por retro-dispersión gamma-gamma, Universidad Nacional de Colombia.
10. Gabriela Zavala Dávila, Técnicas y normas de análisis químicos para la determinación de la calidad del carbón. Instituto Nacional de Geoquímica (INAGEQ).
11. S.K. Kawatra, “Froth Floatation, Fundamental Principle” in SME Mining Engineering Handbook (2009) Ed. Hartman.
12. Hafiz Muhammad Anwaar Asghar, Muhammad Sheharyar Mirza, Khalid Mehmood, Hamed Sattar and Syed Nadir Hussain; Institute of Chemical Engg. & Tech., University of the Punjab, Lahore, Beneficiation of Chamalang Coal by Froth Floatation.
13. Tatiana Janeth Arengas Rojas, Eddy Ruidiaz Muñoz; Estudio del comportamiento de las espumas generadas en el lavado de carbones por Flotación mediante el uso de mezclas densas tipo CCTA; Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Química.



14. G. P. AHEARN; Surfactants for Oil Recovery, Esso Production Research Company P.O. Box 2189, Houston, Texas 77001.
15. Anel Margarita Olmos Montoya, Ángel Carbajal Loredó; MODELO FÍSICO DE LA REDUCCIÓN DE ACEITE REMANENTE POR DESPLAZAMIENTO CON SURFACTANTES, Universidad Nacional Autónoma de México.
16. Etapas en el beneficio de minerales: trituración, molienda, decantación y flotación; <http://slideplayer.es/slide/1612350/> consultado en...
17. Barbara Stuart, Infrared Spectroscopy: fundamentals and applications.
18. José Luis Serrano Martínez, Curso: Instrumentación y métodos de análisis químico, Espectroscopia infrarroja 2-equipos y preparación de muestras.
19. Principles of Instrumental Analysis Douglas A. Skoog; F. James Holler; Stanley R. Crouch Published by Brooks Cole, 2006
20. Painter et al. (1981), Machnikowska et al. (2002) y Fuller et al. (1982)
21. José Luis Muñoz García; XXI CONGRESO NACIONAL DE GEOQUÍMICA **INAGEQ 2011** CURSO TALLER 1, PRÁCTICAS ESTÁNDARES Y PROCEDIMIENTOS DE MUESTREO Y PREPARACIÓN DEL CARBÓN.
22. Fundamentos de flotación, disponible en: [https://www.codelcoeduca.cl/procesos\\_productivos/tecnicos\\_flotacion.asp](https://www.codelcoeduca.cl/procesos_productivos/tecnicos_flotacion.asp)
23. Esquema estructural de flotación por espuma disponible en: <https://www.linkedin.com/pulse/esquema-estructural-de-flotaci%C3%B3n-por-espuma-petrovskaya-ph-d->
24. Tarjeta DRX disponible en: <http://www.icdd.com/resources/webpdf/sample.gif>
25. Consumo de carbón. Disponible en: <https://actualidad.rt.com/economia/view/130419-mapa-petroleo-gas-carbon-energia>
26. Ingeniero Ramiro Alarcón, Subjefe de Planta Minera Nueva Rosita, Coahuila
27. Ingeniero Javier Rodríguez Labastida, Jefe de Planta Lavadora Signum Nueva Rosita, Coahuila



## ANEXOS

En las siguientes tablas se muestran los sistemas de lavado restantes, en donde se observan las fases iniciales antes de pasar por el proceso, y las fases por cada uno de los sistemas. Mostrando que todos los sistemas con petróleo-pino muestran menos fases y mejoras en el lavado.

Fases del carbón 2979

2979 CTU Tajo conquista
Cuarzo
Caolinita
Neotocita
Calcita
Bixbita
Richterita
Calcio y magnesio de cloruro de silicato de aluminio

Petróleo-pino flotación	Petróleo-pino fondo
Cuarzo	Cuarzo
Caolinita	Caolinita
Chaoita	Neotocita
	Calcio y magnesio de cloruro de silicato de aluminio
Diesel-pino flotación	Diesel-pino fondo
Cuarzo	Cuarzo
Caolinita	Caolinita
Chaoita	Calcita
Calcio y magnesio de cloruro de silicato de aluminio	Chaoita
Petróleo-dodecil	Diesel-dodecil
Cuarzo	Cuarzo
Caolinita	Caolinita
Calcio y magnesio de cloruro de silicato de aluminio	Calcio y magnesio de cloruro de silicato de aluminio
	Chaoita
	Pirita
	Galaxita



Fases del carbón 2980

2980 CTU Tajo conquista
Cuarzo
Caolinita
Neotocita
Calcita
Brianita
silicato de magnesio y aluminio hidratado
calcio y magnesio de cloruro de silicato de aluminio

Petróleo-pino flotación	Petróleo-pino fondo
Cuarzo	Cuarzo
Caolinita	Caolinita
Chaoita	Calcita
Calcio y magnesio de cloruro de silicato de aluminio	Calcio y magnesio de cloruro de silicato de aluminio
	Silicato de magnesio y aluminio hidratado
	Brianita
Diesel-pino flotación	Diesel-pino fondo
Cuarzo	Cuarzo
Caolinita	Caolinita
Chaoita	Neotocita
Calcita	Calcita
	calcio y magnesio de cloruro de silicato de aluminio
Petróleo-dodecil	Diesel-dodecil
Cuarzo	Cuarzo
Caolinita	Caolinita
Fosfato de manganeso	Chaoita
Calcio y magnesio de cloruro de silicato de aluminio	Calcio y magnesio de cloruro de silicato de aluminio
Silicato de hidrogeno	



## Fases del carbón 2988

2988 CTU Tajo conquista
Cuarzo
Caolinita
Calcita
Neotocita
Bavenita
calcio y magnesio de cloruro de silicato de aluminio

Petróleo-pino flotación	Petróleo-pino fondo
Cuarzo	Cuarzo
Caolinita	Caolinita
calcio y magnesio de cloruro de silicato de aluminio	calcio y magnesio de cloruro de silicato de aluminio
	Bavenita
Diesel-pino flotación	Diesel-pino fondo
Cuarzo	Cuarzo
Caolinita	Caolinita
Grafito	Calcita
calcio y magnesio de cloruro de silicato de aluminio	calcio y magnesio de cloruro de silicato de aluminio
	Bavenita
Petróleo-dodecil	Diesel-dodecil
Cuarzo	Cuarzo
Caolinita	Caolinita
Calcita	Calcita
Silicato de hidrogeno	Sulfato de magnesio
Calcita de magnesio	

**Tabla 2979 Tajo Conquista IR**

Muestra	Pirita (420)	Curvatura de Aromático (700-900)	Cuarzo, caolinita y muscovita (440-1100)	vibración de estiramiento Si-O (1008-1035)	Estiramiento C-O Curvatura de grupos O-H (1100-1300)	CH <sub>3</sub> (1375- 1450)	Estiramiento Aromático (1490)	Minerales con: Ca, Si (2200- 1900)
2979 CTU	-	✓	✓	✓	-	✓	-	✓
PETROLEO- PINO	✓	✓	✓	✓	-	✓	-	✓
DIESEL- PINO	✓	✓	✓	✓	-	✓	-	✓
PETROLEO- DODECIL	A.I ✓	✓	A.I ✓	✓	-	✓	-	✓
DIESEL- DODECIL	A.I ✓	✓	A.I ✓	✓	-	✓	-	✓

Muestra	C=C 1500- 1600	Estiramiento C=O (1650-1730)	Estiramiento Alifático CH (2800-3000)	Estiramiento Aromático CH (3000-3100)	Grupos OH (3100- 3700)	Agua (+4000)
2979 CTU	✓	-	✓	-	✓	✓
PETROLEO- PINO	✓	-	A.I ✓	-	✓	-
DIESEL-PINO	✓	-	A.I ✓	-	✓	-
PETROLEO- DODECIL	✓	-	✓	-	✓	-
DIESEL- DODECIL	✓	-	✓	-	✓	-

A.I = Alta intensidad del pico

B.I= Baja intensidad del pico



**Tabla 2980 Tajo Conquista IR**

Muestra	Pirita (420)	Curvatura de Aromático (700-900)	Cuarzo, caolinita y muscovita (440-1100)	vibración de estiramiento Si-O (1008-1035)	Estiramiento C-O Curvatura de grupos O- H (1100-1300)	CH <sub>3</sub> (1375- 1450)
2980 CTU	-	✓	✓	✓	-	✓
PETROLEO- PINO	A.I ✓	✓	A.I ✓	✓	-	✓
DIESEL-PINO	A.I ✓	✓	A.I ✓	✓	-	✓
PETROLEO- DODECIL	✓	✓	✓	✓	-	✓
DIESEL- DODECIL	A.I ✓	✓	A.I ✓	✓	-	✓

Muestra	Estiramiento Aromático (1490)	Minerales con: Ca, Si (2200-1900)	C=C 1500-1600	Estiramiento C=O (1650-1730)	Estiramiento Alifático CH (2800-3000)	Estiramiento Aromático CH (3000-3100)	Grupos OH (3100- 3700)	Agua (+4000)
2980 CTU	-	✓	✓	-	✓	-	✓	✓
PETROLEO- PINO	-	✓	✓	-	A.I ✓	-	✓	-
DIESEL-PINO	-	✓	✓	-	A.I ✓	-	✓	-
PETROLEO- DODECIL	-	✓	✓	-	B.I ✓	-	✓	-
DIESEL- DODECIL	-	✓	✓	1698.63	✓	-	✓	✓

A.I = Alta intensidad del pico

B.I= Baja intensidad del pico

**Tabla 2988 Tajo Conquista IR**

Muestra	Pirita (420)	Curvatura de Aromático (700-900)	Cuarzo, caolinita y muscovita  (440-1100)	vibración de estiramiento Si-O (1008-1035)	Estiramiento C-O Curvatura de grupos O- H (1100-1300)	CH <sub>3</sub> (1375- 1450)
2988 CTU	-	✓	✓	✓	-	✓
PETROLEO-PINO	A.I ✓	✓	A.I X	✓	-	✓
DIESEL-PINO	A.I ✓	✓	A.I ✓	✓	-	✓
PETROLEO-DODECIL	A.I ✓	✓	A.I ✓	✓	-	✓
DIESEL-DODECIL	A.I ✓	✓	A.I ✓	✓	-	✓

Muestra	Estiramiento Aromático (1490)	Minerales con: Ca, Si (2200- 1900)	C=C 1500- 1600	Estiramiento C=O (1650-1730)	Estiramiento Alifático CH (2800-3000)	Estiramiento Aromático CH (3000-3100)	Grupos OH (3100- 3700)	Agua (+4000)
2988 CTU	-	✓	✓	-	✓	-	✓	✓
PETROLEO-PINO	-	✓	✓	-	A.I ✓	-	✓	-
DIESEL-PINO	-	✓	✓	-	B.I ✓	-	✓	✓
PETROLEO-DODECIL	-	✓	✓	-	✓	-	✓	✓
DIESEL-DODECIL	-	✓	✓	1734.102 1701.225	B.I ✓	-	✓	✓

A.I = Alta intensidad del pico

B.I= Baja intensidad del pico

