

EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LAS CARACTERÍSTICAS DE VARIOS  
MATERIALES CARBONOSOS Y DEL ACEITE DE SOYA CRUDO, REFINADO Y DE  
SUS ÁCIDOS GRASOS EN LA FORMACIÓN DE AGLOMERADOS CARBÓN-  
ACEITE PARA LA RECUPERACIÓN DE ORO

JOEL DAVID SIERRA MENDOZA  
VICTOR ALEXANDER RUIZ RUIZ

GRUPO DE INVESTIGACIONES EN MINERALES, BIOHIDROMETALURGIA Y  
AMBIENTE - GIMBA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA

2017

EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LAS CARACTERÍSTICAS DE VARIOS  
MATERIALES CARBONOSOS Y DEL ACEITE DE SOYA CRUDO, REFINADO Y DE  
SUS ÁCIDOS GRASOS EN LA FORMACIÓN DE AGLOMERADOS CARBÓN-  
ACEITE PARA LA RECUPERACIÓN DE ORO

JOEL DAVID SIERRA MENDOZA  
VICTOR ALEXANDER RUIZ RUIZ

Trabajo de grado (modalidad proyecto de investigación) para optar al título de  
Ingeniero Químico

Directores

PhD ELCY MARÍA CÓRDOBA TUTA

PhD PEDRO LUIS DELVASTO ANGARITA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA

2017

## DEDICATORIA

*A DIOS por convertir lo que alguna vez fue sueño en una meta y además hacer que esta meta se volviera realidad.*

*A mi madre, a quien amo profundamente, por enseñarme que todo es posible si uno se lo propone y por su constante apoyo ante cualquier locura que se me ocurra, gracias por ser mi ejemplo de vida. Te amo mamá.*

*A la persona que incentivó este gran logro y que siempre está a mi lado en las buenas y en las malas, que no me deja desfallecer, con la que he vivido casi la mitad de mi vida y con la que viviré el resto de mis días. Gracias mi Yese, mi gran amor  
TE AMO y te amaré por siempre.*

*Y por último y no pueden faltar todas las personas que me decían y me dicen que el estudio no sirve para nada y que eso ¿para qué? Porque gracias a que ellos me decían esas palabras constantemente me alentaban a seguir adelante y a demostrarle que con estudio podemos lograr un futuro mejor y hacer que mi querida Colombia salga adelante.*

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE) de la Universidad Industrial de Santander, por la financiación del presente trabajo de grado, a través del proyecto de investigación titulado “Implementación del proceso CGA como una alternativa a los métodos tradicionales de amalgamación y cianuración para la recuperación de oro de minerales colombianos”, código 1884.

## CONTENIDO

|   |    |
|---|----|
| INTRODUCCIÓN .....  | 14 |
| 1. MARCO TEÓRICO.....   | 15 |
| 2. OBJETIVOS .....  | 20 |
| 2.1. OBJETIVO GENERAL .....                                       | 20 |
| 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....                                  | 20 |
| 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....                                 | 21 |
| 3.1. CARACTERIZACIÓN MATERIAS PRIMAS.....                         | 21 |
| 3.2. FORMACIÓN DE AGLOMERADOS .....                               | 22 |
| 3.3. APLICACIÓN DEL PROCESO CGA CON LOS AGLOMERADOS FORMADOS..... | 24 |
| 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....                                   | 26 |
| 4.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS ACEITES.....                          | 26 |
| 4.2. CARACTERIZACIÓN MATERIALES CARBONOSOS .....                  | 28 |
| 4.3. FORMACION DE LOS AGLOMERADOS .....                           | 31 |
| 4.4. RECUPERACION DE ORO POR LA APLICACIÓN PROCESO CGA .....      | 33 |
| 5. CONCLUSIONES .....   | 38 |
| 6. RECOMENDACIONES.....   | 39 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....                                   | 40 |
| BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA .....                                 | 43 |
| ANEXOS .....  | 44 |

## LISTA DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. Variables y variaciones para la formación de aglomerados.....                   | 24 |
| Tabla 2. Caracterización de los aceites. ....  | 26 |
| Tabla 3. Análisis próximo y último de materiales carbonosos. ....                        | 29 |
| Tabla 4. Ángulos de contacto para los sistemas material carbonoso-aceite. ....           | 30 |
| Tabla 5. Tamaño y resistencia de los diferentes aglomerados material carbonoso-aceite... | 31 |

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Esquema de una gota de líquido L, reposando en equilibrio sobre una superficie solida S. (Rodríguez, G. A, 2010).....   | 19 |
| Figura 2. Análisis granulométrico sintético del material carbonoso.....   | 23 |
| Figura 3. Espectro FTIR de aceites utilizados. ....   | 27 |
| Figura 4. Muestra de los Aceites utilizados, a. aceite refinado de soya, b. aceite crudo de soya, c. ácido graso de soya .....  | 28 |
| Figura 5 Resultados de aglomeración de las diferentes combinaciones material carbonoso-aceite a) carbón mineral-aceite crudo, b) carbón mineral-aceite refinado, c) Grafito-aceite crudo, d) Grafito-aceite refinado, e) coque-aceite crudo, f) coque-aceite refinado, g) carbón vegetal-aceite crudo, h) carbón vegetal-aceite refinado, i) negro de humo-aceite crudo y j) negro de humo-aceite refinado..... | 32 |
| Figura 6. Comparación de los índices metalúrgicos obtenidos con los diferentes materiales carbonosos en el proceso CGA. a. Recuperación, b. Eficiencia. ....  | 34 |
| Figura 7. Micrografías de los aglomerados cargados a 50X. Izquierda aglomerados completos, derecha aglomerados corte por el centro. a. Carbón mineral-aceite crudo de soya, b. Carbón mineral-aceite refinado de soya, c. Grafito-aceite crudo de soya, e. Grafito-aceite refinado de soya, f. Coque-aceite crudo de soya, g. Coque-aceite refinado de soya.  | 36 |

## LISTAS DE ANEXOS

|   |      |
|---|------|
| ANEXO A. Evaluación del espectro FTIR.....  | 44   |
| ANEXO B. Ángulos de contacto. ....  | 45   |
| ANEXO C. Morfología de la superficie de los aglomerados, micrografías tomadas a 500X<br>a) Grafito b) carbón mineral y c) coque. .... | 4646 |

## RESUMEN

**TÍTULO:** EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LAS CARACTERÍSTICAS DE VARIOS MATERIALES CARBONOSOS Y DEL ACEITE DE SOYA CRUDO, REFINADO Y DE SUS ÁCIDOS GRASOS EN LA FORMACIÓN DE AGLOMERADOS CARBÓN-ACEITE PARA LA RECUPERACIÓN DE ORO. \*

**AUTORES:** Víctor Alexander Ruiz Ruiz y Joel David Sierra Mendoza. \*\*

**PALABRAS CLAVES:** Proceso CGA, aglomeración, contactación, material carbonoso, ASTM.

**DESCRIPCIÓN:** El objetivo del trabajo fue estimar los efectos producidos en el proceso de aglomeración carbón-aceite (CGA por sus siglas en inglés) a la hora de modificar el material carbonoso y el tipo de aceite empleado en dicho proceso. Los materiales carbonosos se caracterizaron por medio del análisis próximo y último siguiendo las normas American Society for Testing and Materials (ASTM por sus siglas en inglés) y a los aceites se les determinó la densidad, viscosidad y algunos grupos funcionales, estas caracterizaciones se hicieron con el fin de conocer como afectaron el proceso CGA.

La investigación constó de diferentes etapas: la primera de ellas consistió en el proceso de emulsificación, en el cual se da la mezcla de agua y aceite. La segunda etapa radica en la aglomeración carbón-aceite, posteriormente, se realizó una etapa de acondicionamiento del mineral y finalmente la etapa de contactación la cual consistió en agregar los aglomerados carbón-aceite al mineral acondicionado para así obtener aglomerados carbón-aceite cargados con mineral o también llamados, aglomerados cargados.

El esquema del proceso propuesto se evaluó a escala laboratorio, haciendo el proceso en continuo. En la etapa de aglomeración se obtuvieron aglomerados de tamaños y resistencia a la caída considerables. En la etapa final del proceso se obtuvo un rendimiento entre el 51 a 75 % aproximadamente.

Finalmente, los resultados presentados llevaron a realizar un respectivo análisis del proceso para las materias primas empleadas, planteando algunas recomendaciones con el fin de mejorar las condiciones del proceso.

---

\*Proyecto de grado (modalidad proyecto de investigación)

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química.

Director: PhD. Elcy María Córdoba Tuta, Codirector: PhD Pedro Delvasto Angarita.

## ABSTRACT

**TITLE:** EVALUATION OF THE EFFECT OF THE CHARACTERISTICS OF SEVERAL CARBONOUS MATERIALS AND CRUDE, REFINED SOYBEAN OIL AND THEIR FATTY ACIDS IN THE FORMATION OF COAL-OIL AGGLOMERATES FOR GOLD RECOVERY.

**AUTHORS:** Víctor Alexander Ruiz Ruiz y Joel David Sierra Mendoza. \*\*

**KEY WORDS:** CGA process, agglomeration, contacting, carbonaceous material, ASTM.

**DESCRIPTION:** The purpose of the work was to estimate the effects produced in the process of coal-oil agglomeration (CGA) when modifying the carbonaceous material and the type of oil used in the process. The carbonaceous materials were characterized by the near and last analysis following the American Society for Testing and Materials Standards (ASTM). The oils were determined with density, viscosity and some functional groups; these characterizations were made in order to know how they affected the CGA process.

The research was carried out in different stages: the first one consisted in the emulsification process, in which the mixture of water and oil is given. The second stage was in the coal-oil agglomeration; subsequently, a stage of conditioning of the mineral was carried out and finally the stage of contacting, which consisted in adding the coal-oil agglomerates to the conditioned mineral to obtain coal-oil agglomerates loaded with mineral.

The scheme of the proposed process was evaluated in laboratory scale, making the process continuous. Agglomerates of considerable size and fall resistance were obtained in agglomeration stage. In the final stage of the process, yield was obtained between 51 to 75 % approximately.

Finally, the results presented led to a respective analysis of the process for raw materials used, proposing some recommendations in order to improve the conditions of the process.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Physico-Chemical Engineering. School Chemical Engineering.

Director: PhD. Elcy María Córdoba Tuta, Codirector: PhD Pedro Delvasto Angarita.

## INTRODUCCIÓN

La creciente preocupación actual en conservar los recursos naturales existentes ha llevado a los diferentes sectores industriales a buscar alternativas que contribuyan al desarrollo sostenible. Un ejemplo de esto lo constituye el Convenio de Minamata, suscrito en Japón en el año 2013, en el que más de 50 países se comprometieron a reducir el uso industrial de mercurio, sustancia que es particularmente nociva y que aún se utiliza en la extracción artesanal de oro [1].

Entre las alternativas al uso del mercurio para la obtención de oro se tiene el proceso de aglomeración carbón-aceite (CGA por sus siglas en inglés), el cual, en comparación con los métodos extractivos convencionales, es un proceso amigable con el medio ambiente [1]. En el proceso CGA se aprovechan las propiedades hidrofóbicas y oleofílicas del oro para realizar su recuperación por medio de aglomerados de carbón y aceite, los cuales son puestos en contacto con el mineral aurífero en una solución acuosa y agitada por un tiempo determinado para su posterior separación. En este caso, el carbón actúa como un portador de las partículas de oro, mientras que el aceite permite la interacción de las partículas de carbón y oro [2].

La eficiencia en la recuperación de oro en el proceso CGA es dependiente de la producción de buenos aglomerados, los cuales pueden ser obtenidos con diferentes tipos de aceites y carbones [3]. Estudios han afirmado que la recuperación de oro puede aumentar optimizando un factor importante en el proceso como es la interacción entre los diferentes tipos de aceite y carbón para la formación de aglomerados [4]. Por esta razón, en el presente trabajo se realizó un estudio con diferentes materiales carbonosos y aceites de soya, para evaluar cómo afectan y/o favorecen estos factores la formación de los aglomerados carbón-aceite, que serán usados posteriormente para la extracción de oro de sus minerales.

## 1. MARCO TEÓRICO

Actualmente, los métodos más utilizados para la extracción de oro son la amalgamación y cianuración; desde su invención, en la época del Imperio Romano, el proceso de amalgamación no ha tenido grandes cambios. El proceso se basa en la aleación selectiva del oro por el mercurio, en presencia de agua y aire [1]. El proceso es simple, económico y cuando es usado correctamente, las emisiones de mercurio son relativamente bajas. La mojabilidad preferencial del oro por el mercurio, permite la mezcla de los dos metales que conforman un conjunto de compuestos metálicos, denominado amalgama [1], esta se calienta para la recuperación del oro produciendo la evaporación del mercurio y contaminación ambiental por las pérdidas de mercurio en el agua, suelo y aire [2].

Por otro lado, el proceso de cianuración, un método de bajo costo y alta eficiencia en la lixiviación de minerales oxidados, se emplea para la disolución del oro desde sus minerales. En el proceso de cianuración, generalmente el mineral molido es agitado con una solución cianurada alcalina diluida (generalmente se emplea cal) por diversos periodos de tiempo, esto es necesario para neutralizar cualquier ácido del material y ajustar las condiciones experimentales para mantener estables termodinámicamente los complejos de oro formados durante el proceso. La cianuración es altamente eficaz cuando el oro se encuentra en forma limpia y como partículas metálicas finas, pero presenta problemas cuando está encapsulado y diseminado en minerales sulfurados, constituyendo un serio problema por el elevado consumo de cianuro, recuperaciones limitadas y el impacto ambiental generado [3].

Debido a los inconvenientes que se pueden presentar en los procesos convencionales, la industria minera aurífera está en búsqueda de procesos alternativos de recuperación de oro que presenten un menor impacto ambiental y que a su vez presenten un alto porcentaje de recuperación a bajo costo. Entre las diferentes alternativas que satisfacen estos requerimientos se encuentra el proceso CGA, una alternativa que se dio a conocer en la década de 1980 por Cadzow y colaboradores [3].

El proceso CGA está basado en la hidrofobicidad y/o lipofilidad natural del oro, una propiedad que es producida por la facilidad con la que la superficie de oro puede recubrirse con sustancias aceitosas [3]. Aunque es posible recuperar oro por aglomeración directa con solo aceite, la cantidad de oro en el mineral es generalmente tan pequeña que hay insuficientes partículas de oro para formar aglomerados. Por lo tanto, resulta necesario el empleo de otros materiales hidrófobos como el carbón, para formar aglomerados junto con el oro [3]. En síntesis, mediante este proceso, las partículas de oro son recuperadas de la pulpa mineral dentro de aglomerados esféricos formados por carbón y aceite. Estos aglomerados se reciclan para aumentar la carga de oro, luego, se separan de la pulpa, se queman y las cenizas resultantes se funden para producir el botón de oro metálico [2].

En comparación con los procesos tradicionales de recuperación de oro, el proceso CGA presenta:

- ✓ Alta recuperación de oro independientemente del tamaño de la partícula de oro (ha mostrado ser altamente eficiente para tamaños de partícula finos y gruesos).
- ✓ Menor tiempo de residencia.
- ✓ Bajo consumo de reactivos.
- ✓ Impacto ambiental relativamente menor, debido al no uso de mercurio ni cianuro.
- ✓ Recuperación de plata y platino adicional al oro.

Si bien el proceso CGA presenta buenas características para ser tomado en cuenta, en la actualidad no ha logrado tener gran aceptación a escala industrial, sin embargo, con base en las investigaciones y estudios realizados a escala laboratorio, promete ser un proceso alternativo eficiente. Esto motiva a investigadores a seguir realizando mejoras en el proceso e intentar convertirlo en uno de los procesos utilizados en la industria del oro [4].

La aglomeración es el paso más importante en el proceso CGA, debido a la cantidad de variables que involucra [2]. Durante el proceso de aglomeración esférica se produce una unión entre las partículas en suspensión en fase líquida [3]. El proceso se basa en la mojabilidad selectiva de las superficies de sólidos finamente divididos, en presencia de dos líquidos inmiscibles, agua y aceite. Uno de estos líquidos, presente en mayor cantidad,

formará un medio continuo dentro de la suspensión y el otro, denominado puente líquido, mojará las superficies de las partículas sólidas suspendidas [2]. Para este proceso deben controlarse el grado de agitación y la cantidad de puente líquido. Luego de dispersarse, el puente líquido se adsorbe sobre el sólido. Para mejores resultados, es importante que los sólidos estén completamente mojados. A medida que se incrementa la cantidad de puente líquido, el líquido adsorbido forma una capa continua alrededor de cada partícula mojada, de esta forma, los aglomerados formados se vuelven más compactos y esféricos. Al agregar más puente líquido, llegará un punto en que los poros de los aglomerados se saturan alcanzando la máxima fuerza y densidad [2].

Como se mencionó anteriormente, en la formación de aglomerados carbón-aceite hay diferentes variables a tener en cuenta, entre las que se encuentra el tipo de material carbonoso, el tipo de aceite y la interacción entre ellos [3].

Desde la creación de la primera patente del proceso CGA hasta la actualidad, se han hecho estudios dirigidos a la formación de aglomerados, en donde la intervención principalmente está dada por el tipo de material hidrofóbico y el tipo de aceite utilizado [4] [5]. Los diferentes tipos de materiales hidrofóbicos como el grafito, el carbón vegetal, el carbón mineral, el coque, entre otros y las diferentes características de los mismos, hacen que esta variable se convierta en una de las principales causas de investigación en el proceso CGA.

Las características principales de un carbón están dadas por la cantidad de cenizas, carbono fijo, humedad y material volátil, las cuales permiten hacer una clasificación de cada carbón y de esta manera diferenciarlos [6]. Estas características podrían ser de gran importancia a la hora de formar los aglomerados carbón-aceite, pero estos aspectos necesitan de más investigación. En la actualidad surge la necesidad de saber los efectos de los diferentes tipos de materiales carbonosos y es por esto que se hizo un estudio con carbón mineral proveniente del Cerrito Santander, coque, carbón vegetal, grafito y negro de humo.

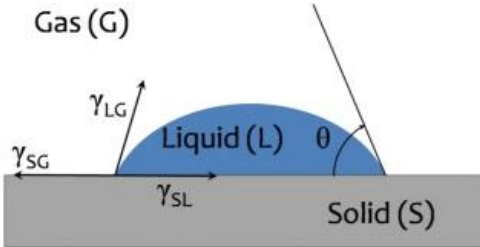
La composición química de los aceites vegetales corresponde primordialmente a una mezcla de triglicéridos y ácidos grasos libres, esteroides, ceras y otros compuestos menores. Los triglicéridos se forman por la reacción entre tres moléculas de ácidos grasos y una de glicerol generándose de esta reacción tres moléculas de agua y una de triglicérido [7]. Por otra parte, los ácidos grasos se clasifican en saturados e insaturados y están formados por cadenas de carbono que poseen un grupo carboxilo como grupo funcional. Los ácidos grasos saturados se caracterizan, principalmente, por tener enlaces simples entre los carbonos, además pueden ser de cadena corta, media o larga [2]. Los ácidos grasos insaturados presentan dobles o triples enlaces entre carbonos y suelen encontrarse en estado líquido a temperatura ambiente, son de cadena larga y se clasifican en monoinsaturados (cuando tienen un solo enlace doble) y en poliinsaturados (cuando presentan más de un enlace doble) [7].

Con las notables características que pueden contar los diferentes aceites, se realizó el estudio con aceite de soya pues ha presentado buenas características en la formación de aglomerados en diferentes estudios [2] [8].

El proceso CGA se lleva a cabo, principalmente, en la interfase de los aglomerados formados, por lo que resultó importante estudiar ciertos fenómenos físicos que ocurren en esta y analizar cómo interactúan los diferentes materiales carbonosos y aceites entre sí, para ello es necesario conocer la mojabilidad del carbón con el aceite [2].

La mojabilidad de un determinado sólido por un líquido, viene determinada por el ángulo de contacto  $\theta$ , que se forma al medir el ángulo entre un líquido cuando entra en contacto con un sólido. El valor del ángulo de contacto depende principalmente de la relación que existe entre las fuerzas adhesivas del líquido y el sólido y las fuerzas cohesivas del líquido. Cuando  $\theta < 90^\circ$ , se dice que el líquido moja al sólido, si  $\theta > 90^\circ$  el líquido no moja al sólido y existe un caso extremo que ocurre cuando  $\theta$  se aproxima a cero, entonces el líquido se expande sobre el sólido y se dice que el mojado es perfecto [9]. Una representación de lo anterior se muestra en la Fig. 1. [9]

**Figura 1.** Esquema de una gota de líquido L, reposando en equilibrio sobre una superficie solida S. (Rodríguez, G. A, 2010)



## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL**

- ✓ Evaluar las características de varios materiales carbonosos (carbón mineral, coque, carbón vegetal, grafito y negro de humo) y aceite de soya en tres condiciones (crudo, refinado y sus ácidos grasos) para establecer sus efectos sobre la formación de aglomerados carbón-aceite para su aplicación en el proceso CGA.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- ✓ Caracterizar el aceite de soya en sus tres estados y los materiales carbonosos con el propósito de establecer sus propiedades fisicoquímicas.
- ✓ Evaluar la capacidad aglomerante de las sustancias oleosas de soya y los materiales carbonosos, determinando el tamaño y la resistencia de los aglomerados obtenidos bajo diferentes combinaciones de las materias primas.
- ✓ Aplicar el proceso CGA con los aglomerados formados a un mineral aurífero de características conocidas con el fin de determinar la capacidad de los mismos para extraer el oro.

### 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El estudio de la presente investigación consistió en la recuperación de oro particulado de un mineral aurífero mediante el empleo de suspensiones acuosas con aglomerados de diferentes combinaciones material carbonoso-aceite. Como una forma veraz de evaluación de este proceso se eligió la comparación de conjuntos de resultados obtenidos de diferentes series de ensayos experimentales, cada procedimiento se realizó por triplicado, tomando como resultado final un promedio de los datos recolectados, de estos, se analizó el efecto de una variable sobre una respuesta, manteniendo el resto de parámetros fijos hasta finalmente seleccionar las mejores condiciones para recuperar el oro de la combinación material carbonoso-aceite en estudio.

#### 3.1. CARACTERIZACIÓN MATERIAS PRIMAS

**3.1.1 Caracterización de aceites.** El aceite crudo de soya y el ácido graso de soya se consiguieron por medio de una empresa regional, productora de aceites ubicada en el departamento de Santander, por otro lado, el aceite refinado de soya se obtuvo de la compra en un supermercado local.

Los aceites vegetales tienen características físicas diferentes de acuerdo a su composición. Estas características se determinaron mediante la medición de la densidad, viscosidad y algunos grupos funcionales [10]. La densidad de los aceites se determinó con un densímetro, la viscosidad se determinó por medio del viscosímetro rotacional Brookfield modelo RV-III+RHEOMETER y los grupos funcionales presentes se hallaron usando la técnica de espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier en el equipo FTIR-8400S.

**3.1.2 Caracterización de los materiales carbonosos.** Tras la obtención de los materiales carbonosos necesarios para la realización de este trabajo, grafito, coque, carbón vegetal, negro de humo y carbón mineral, proveniente del municipio El Cerrito, Santander, se procedió a realizar procesos de trituración, molienda y tamizado, de estos materiales con el

fin de obtener tamaños de partícula de aproximadamente 170 micras, tamaño con el cual, se realizaron pruebas de análisis próximo de cada material carbonoso, para establecer la composición de humedad, cenizas y material volátil y así estimar la cantidad de carbono fijo presente [8], esto último teniendo en cuenta las normas americanas, ASTM D3173, ASTM D3174, ASTM D3175 y ASTM D3302 respectivamente [6] [11]; Posteriormente, las muestras se analizaron siguiendo los lineamientos de la norma americana ASTM D5865 y ASTM D3177, con el fin de obtener el poder calorífico, y el contenido de azufre en cada muestra y así comparar con la clasificación, el carbón mineral de acuerdo a la norma ASTM D388 [6] [11]. El análisis último de los carbones se realizó por medio de analizador Sundry CHN 435 el cual se rige por la norma ASTM D5373-02

La importancia de conocer la capacidad de adhesión entre el carbón y el aceite es importante en la formación de aglomerados [2]. La evaluación de la capacidad de mojado de los materiales carbonosos se realizó mediante el sistema de medición de ángulo de contacto OCA 15EC del laboratorio de electroquímica ubicado en el Parque Tecnológico Guatiguará. Inicialmente se colocó una gota de fluido (aceite y/o agua) sobre la superficie sólida (material carbonoso), entre las dos fases se formó un ángulo, el cual permitió conocer la afinidad del fluido con la superficie sólida.

**3.1.3 Muestra de mineral aurífero.** Para la realización del proyecto, se utilizó un mineral auro-argentífero proveniente de El Bagre, Antioquia. La caracterización de dicho mineral fue obtenida del estudio realizado por la tesis de investigación de Daniel Montoya y colaboradores. El mineral cuenta con un tenor de oro de 87 g/ton, además presenta pirita, cuarzo, moscovita, calcita y argentita en fase cristalina y es catalogado como un mineral oxidado [12].

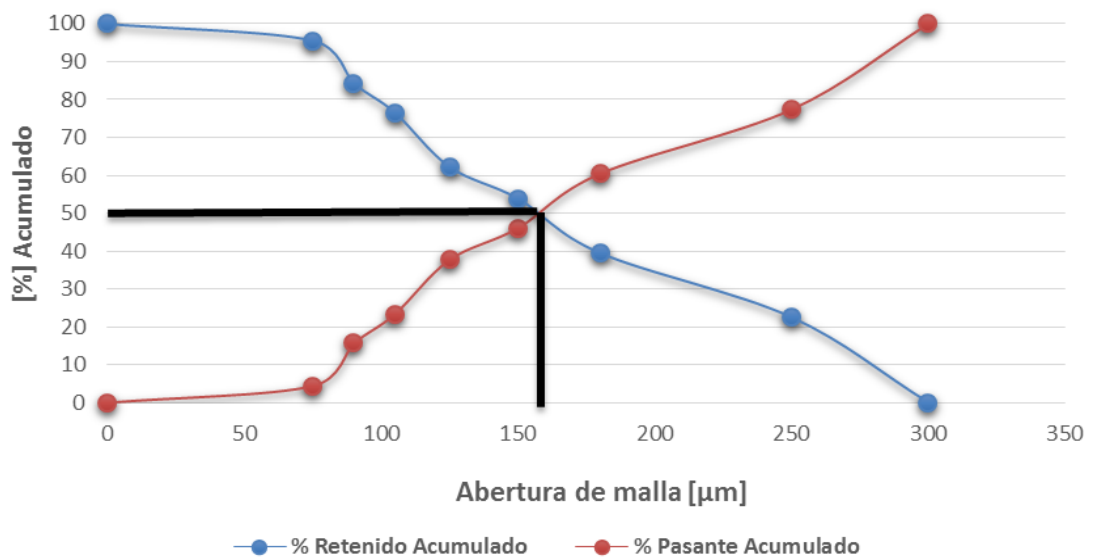
## **3.2. FORMACIÓN DE AGLOMERADOS**

En esta etapa del proceso se usaron las siguientes condiciones de operación recomendadas por E. M. Córdoba en sus estudios [2]:

- Recipiente plástico con paredes lisas de 20 cm de diámetro.
- Altura hélice: 10 mm.
- Volumen de agua: 500 mL.
- Relación en peso aceite/material carbonoso: 0.3
- Tiempo de emulsificación: 5 min.
- % solidos: 10%.
- Tiempo aglomeración: 10 min.
- Temperatura: 24 °C.
- Velocidad de agitación: 1600 r.p.m.

La formación de aglomerados se llevó a cabo mediante los siguientes pasos: primero, se redujo el tamaño de partícula de los materiales carbonosos en un molino de mortero, pasó seguido, se tamizó y se fijó una distribución granulométrica sintética de estos con el fin de mantener fijo el tamaño de partícula. Esta se presenta en la figura 2, en ella se observa un tamaño medio de partícula aproximado de 158 micrómetros.

**Figura 2.** Análisis granulométrico sintético del material carbonoso.



El negro de humo no se llevó a esta distribución granulométrica porque su estado inicial ya tenía una granulometría muy fina.

Posteriormente se creó una emulsión agua-aceite y luego, se adicionó material carbonoso, formándose los aglomerados material carbonoso-aceite, los cuales se separaron mediante el empleo de un tamiz [2]. En esta etapa del proceso se realizó un análisis experimental de los aceites y los tipos de materiales carbonosos en cuanto a los tipos de combinación de estos. Las variables de respuesta en esta etapa del proceso fueron el tamaño y resistencia de los aglomerados. La resistencia se determinó arrojando los aglomerados desde una altura de 50 cm hasta que se destruyeran.

En la siguiente tabla se muestran las variables de estudio en la formación de aglomerados material carbonoso-aceite con las respectivas variaciones a realizar.

**Tabla 1.** Variables y variaciones para la formación de aglomerados.

| Variable                   | Variaciones   |
|----------------------------|---|
| Tipo de material carbonoso | Carbón mineral, grafito, coque, carbón vegetal, negro de humo |
| Tipo de aceite             | Aceite crudo de soya, aceite refinado de soya                 |

### **3.3. APLICACIÓN DEL PROCESO CGA CON LOS AGLOMERADOS FORMADOS**

Los aglomerados formados fueron mezclados con el mineral aurífero teniendo en cuenta las siguientes condiciones:

- Recipiente plástico con paredes lisas de 20 cm de diámetro.
- Altura hélice: 10 mm.
- Volumen de agua: 250 mL.
- Relación en peso aglomerados/mineral: 1

- Tiempo de acondicionamiento: 5 min.
- Tiempo de contactación: 45 min.
- Cantidad de colector: 100  $\mu$ L.
- Temperatura: 24 °C.
- Velocidad de agitación: 600 rpm.

Estas condiciones fueron obtenidas por E.M Córdoba en sus estudios [2], además el mineral se redujo a un tamaño 100% pasante de 200  $\mu$ m.

Las pruebas de recuperación de oro se llevaron a cabo con las combinaciones material carbonoso-aceite que produjeron aglomerados. Tras la formación de los aglomerados, se procedió a realizar la fase de acondicionamiento, en la cual, a un volumen determinado de agua se adiciona mineral y una pequeña cantidad de colector AEROFLOAT 208 PROMOTER, la agregación de este último tuvo como fin aumentar la hidrofobicidad del oro [2]. Posteriormente se llevó a cabo la fase de contactación. En esta fase, la cantidad de oro contenida en el mineral se adhirió a los aglomerados, esta cantidad se determinó mediante la calcinación de los mismos y la fusión de las cenizas obtenidas, según el procedimiento conocido como ensayo al fuego. Además, se empleó la técnica de microscopia de barrido electrónica (SEM), con el fin de conocer qué otros materiales se unieron y evaluar la morfología en esta etapa.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS ACEITES.

La caracterización de los aceites consistió en determinar la densidad, viscosidad y algunos grupos funcionales presentes, esto con el fin de determinar su uso en el proceso de emulsificación. La densidad y viscosidad de los aceites, tomadas a temperatura ambiente (24 °C) se muestra en la tabla 2.

**Tabla 2.** Caracterización de los aceites.

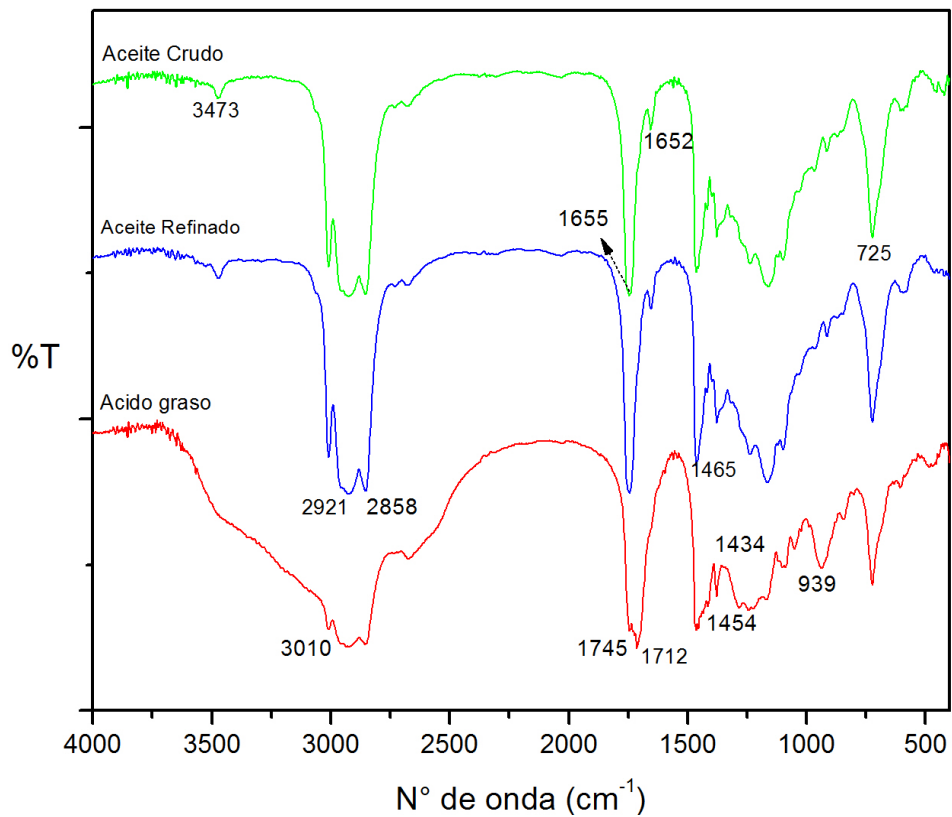
| Propiedad       | Aceites              |                         |                     |
|-----------------|----------------------|-------------------------|---------------------|
|                 | Aceite crudo de soya | Aceite refinado de soya | Ácido graso de soya |
| Densidad [g/mL] | 0,913 ± 0,001        | 0,915 ± 0,001           | 0,910 ± 0,002       |
| Viscosidad [cP] | 50 ± 2,8             | 48 ± 0,1                | 31 ± 0,7            |

Al hacer una comparación con la literatura se evidencia que los valores de la tabla 2 se encuentran entre los rangos establecidos [2]. Adicionalmente, el ácido graso de soya se solidificó transcurridos 15 días, debido a la presencia de triglicéridos [13] ver Fig. 3 y anexo 1, por esta razón, al momento de realizar las pruebas de aglomeración no formó la emulsión necesaria para la formación de aglomerados y por lo tanto no fue tenido en cuenta en los análisis siguientes de la investigación.

La presencia de triglicéridos en el aceite crudo de soya se confirman con el pico 1454 cm<sup>-1</sup> de la Fig.3. estos son normalmente conocidos como ácidos grasos libres, los cuales combinados con pigmentos, fosfolípidos, alcoholes alifáticos y carotenos, conforman un 1.1 % de los aceites crudos vegetales y son eliminados en el proceso de refinación [13][14]. De los resultados obtenidos de los aceites, se esperaría que los aceites crudo y

refinado de soya presenten aglomerados con pequeñas variaciones en cuanto al tamaño y resistencia, pues ambos tienen mucha similitud.

**Figura 3.** Espectro FTIR de aceites utilizados.



En la Fig. 4 se observan las diferencias entre los diferentes aceites utilizados, el ácido graso de soya como se mencionó anteriormente, se encuentra en forma sólida, esto, debido a su alto contenido de ácidos grasos libres [espectro (3000-3500) Fig.3]. Por otro lado, diferencias en el color entre el aceite refinado y el aceite crudo de soya pueden ser el resultado de la eliminación de algunos componentes en el proceso de refinación.

**Figura 4.** Muestra de los Aceites utilizados, a. aceite refinado de soya, b. aceite crudo de soya, c. ácido graso de soya



## **4.2. CARACTERIZACIÓN MATERIALES CARBONOSOS**

**4.1.1 Análisis próximo y último de carbones.** En esta etapa, los materiales carbonosos seleccionados para el presente estudio fueron caracterizados mediante análisis próximo y último. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3.

Una vez caracterizados, y siguiendo la norma ASTM D-388, se clasificó al carbón mineral como bituminoso [6].

La presencia de un alto porcentaje de cenizas favorece el proceso de aglomeración [3] [14]. Por lo tanto, se espera que el carbón mineral, grafito y el coque presenten una respuesta positiva al proceso. Adicional al contenido de cenizas presente, los resultados muestran que debe existir un valor relativamente alto de carbono fijo que beneficie el proceso. Investigaciones realizadas junto con la presente, muestran que el porcentaje de materia volátil tiene muy poca influencia en el proceso, valores como el obtenido en el coque (inferior al 3 %) y en otros estudios con porcentajes de hasta el 30 % así lo muestran [15].

**Tabla 3.** Análisis próximo y último de materiales carbonosos.

| Parámetros                     | Carbón Mineral | Grafito        | Coque          | Carbón Vegetal | Negro de Humo  |
|--------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>Análisis Próximo</b>        |                |                |                |                |                |
| <b>Humedad [%]</b>             | 4,6275         | 0,1300         | 0,9433         | 5,2566         | 0,7623         |
| <b>Materia Volátil [%]</b>     | 13,1823        | 2,7563         | 2,8417         | 24,3481        | 6,8261         |
| <b>Cenizas [%]</b>             | 10,5144        | 4,7381         | 10,1601        | 3,9643         | 0,5283         |
| <b>Carbono Fijo [%]</b>        | <b>71,6758</b> | <b>92,3756</b> | <b>86,0549</b> | <b>66,4310</b> | <b>91,8833</b> |
| <b>Análisis Último</b>         |                |                |                |                |                |
| <b>Carbono Total [%]</b>       | 74,58          | 97,64          | 89,68          | 71,25          | 83,78          |
| <b>Hidrogeno [%]</b>           | 2,21           | 0,00           | 0,00           | 2,01           | 2,13           |
| <b>Nitrógeno [%]</b>           | 0,95           | 0,00           | 1,54           | 0,55           | 0,48           |
| <b>Azufre [%]</b>              | 0,5598         | 0,0074         | 0,2645         | 0,1559         | 0,5952         |
| <b>Otras Propiedades</b>       |                |                |                |                |                |
| <b>Poder Calórico [BTU/lb]</b> | 11.233         | 14.148*        | 11.630         | 14.110         | 14.127**       |

(\*) Dato teórico [17]

(\*\*) Dato teórico [18]

En la tabla 3 se muestra la obtención de un porcentaje mayor en el carbono en el análisis último respecto al análisis próximo, esto se debe a que en la materia volátil hay pequeñas cantidades de carbono que son tomadas en cuenta en el análisis último, presentándose una excepción en el negro de humo en el cual su valor fue relativamente inferior. Los porcentajes obtenidos de hidrogeno, nitrógeno y azufre fueron muy bajos y no muestran una diferencia considerable que haya podido perturbar al proceso.

#### 4.1.2 Medición de ángulo de contacto.

En la tabla 4 se exponen los resultados obtenidos de la medición de los ángulos de contacto de cada uno de los materiales carbonosos con agua y con los diferentes aceites empleados en esta investigación.

**Tabla 4.** Ángulos de contacto para los sistemas material carbonoso-aceite.

| Material carbonoso | Ángulo de contacto $\theta$ [°] |                       |       |
|--------------------|---------------------------------|-----------------------|-------|
|                    | Aceite crudo                    | Aceite refinado       | Agua  |
| Carbón Mineral     | 23,0                            | 10,4                  | 101,1 |
| Grafito            | 23,8                            | 8,3                   | 87,9  |
| Coque              | 17,1                            | 3,4                   | 112,8 |
| Carbón Vegetal     | No se pudo determinar           | No se pudo determinar | 77,1  |
| Negro de humo      | No se pudo determinar           | No se pudo determinar | 50,4  |

Los resultados obtenidos muestran que los materiales carbonosos con comportamiento hidrofóbico son el carbón mineral y grafito, a diferencia del carbón vegetal y el negro de humo. Es posible decir que el coque tiene un comportamiento hidrofóbico puesto que el ángulo de contacto es cercano a  $90^\circ$  [2] [3].

El carbón mineral, el grafito y el coque tuvieron afinidad con los aceites, resaltado que el aceite refinado de soya tuvo mejor interacción con los carbones. En el carbón vegetal y negro de humo no fue posible determinar el ángulo de contacto ya que estos absorbían los aceites.

Con base a lo anterior, se espera que el carbón mineral, el grafito y el coque sean los materiales carbonosos que aglomeren, debido a su comportamiento hidrofóbico permite que el agua les sirva como puente líquido y las partículas sólidas entren en contacto con el aceite [2] [3].

### 4.3. FORMACION DE LOS AGLOMERADOS

Con las condiciones de operación descritas en la metodología se procedió a evaluar las posibles combinaciones material carbonoso-aceite. Teniendo en cuenta que no se realizó experimentación con el ácido crudo de soya debido a su solidificación, se encontró que el carbón mineral, grafito y coque presentaron propiedades de aglomeración bajo la interacción de los aceites usados (aceite crudo y aceite refinado), mientras que el carbón vegetal y el negro de formaron una pasta sin consistencia alguna como se observa en la figura 4.

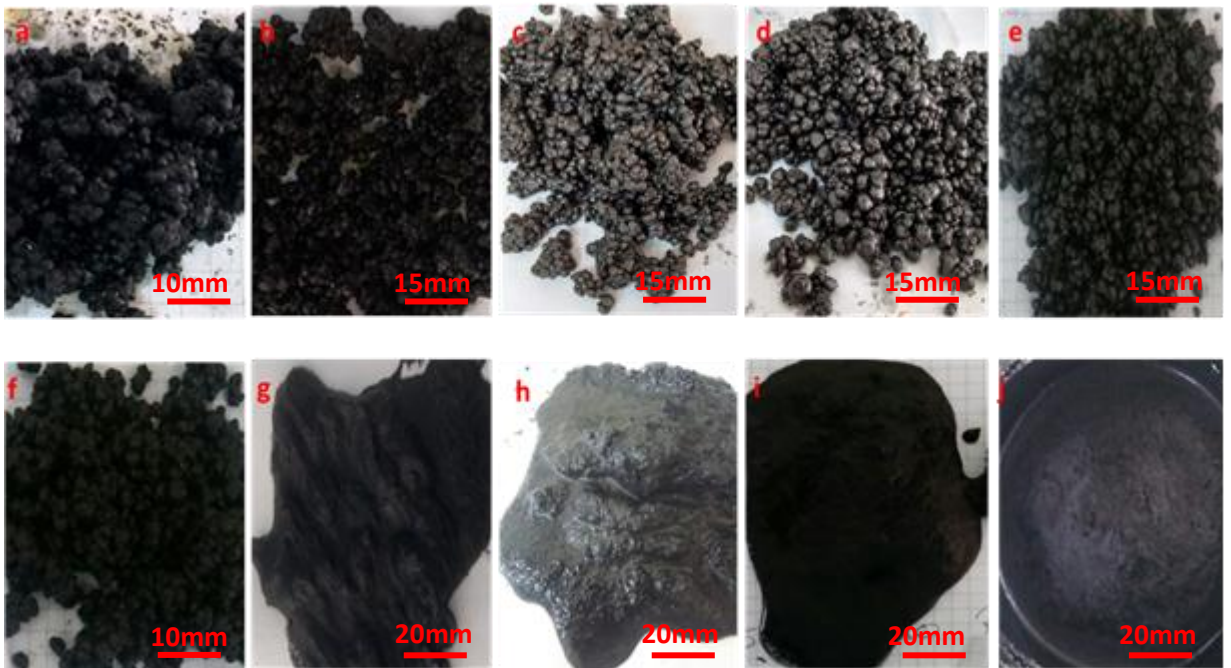
**Tabla 5.** Tamaño y resistencia de los diferentes aglomerados material carbonoso-aceite.

| Tipo de material carbonoso | Tipo de aceite          | Tamaño de los aglomerados [mm] | Resistencia a la caída [No. de caídas] |
|----------------------------|-------------------------|--------------------------------|--|
| Carbón mineral             | Aceite crudo de soya    | 4,09 ± 0,09                    | Más de 100                             |
| Carbón mineral             | Aceite refinado de soya | 3,48 ± 0,15                    | Más de 100                             |
| Grafito                    | Aceite crudo de soya    | 4,78 ± 0,56                    | 22 ± 2,9                               |
| Grafito                    | Aceite refinado de soya | 4,11 ± 0,37                    | 34 ± 1,7                               |
| Coque                      | Aceite crudo de soya    | 3,97 ± 0,51                    | 44 ± 5,2                               |
| Coque                      | Aceite refinado de soya | 3,25 ± 0,43                    | 55 ± 3,6                               |
| Carbón vegetal             | Aceite crudo de soya    | Se formó una pasta             | Se formó una pasta                     |
| Carbón vegetal             | Aceite refinado de soya | Se formó una pasta             | Se formó una pasta                     |
| Negro de humo              | Aceite crudo de soya    | Se formó una pasta             | Se formó una pasta                     |
| Negro de humo              | Aceite refinado de soya | Se formó una pasta             | Se formó una pasta                     |

Los resultados obtenidos resaltan el papel importante que desempeña el contenido de cenizas en los materiales carbonosos en el proceso de aglomeración, ya que los materiales carbonosos con un mayor contenido de cenizas aglomeraron, a diferencia del carbón vegetal y el negro de humo que por tener bajo porcentaje de cenizas no aglomeraron.

Los estudios de A. Akcil, X. et al [3], resaltan la importancia de las propiedades superficiales de los materiales carbonosos en el proceso de aglomeración material carbonoso-aceite; la fuerte dependencia del contenido de material inorgánico en el material carbonoso favorece este proceso, es decir, los materiales carbonosos con un relativo alto contenido de material inorgánico, presentara mayor probabilidad de poseer características de aglomeración, por lo tanto el negro de humo y el carbon vegetal no aglomeraron por su bajo contenido de cenizas en comparación con el carbon mineral, el grafito y el coque que poseen un mayor contenido.

**Figura 5** Resultados de aglomeración de las diferentes combinaciones material carbonoso-aceite a) carbón mineral-aceite crudo, b) carbón mineral-aceite refinado, c) Grafito-aceite crudo, d) Grafito-aceite refinado, e) coque-aceite crudo, f) coque-aceite refinado, g) carbón vegetal-aceite crudo, h) carbón vegetal-aceite refinado, i) negro de humo-aceite crudo y j) negro de humo-aceite refinado.



Se puede afirmar, establecidos los resultados, que las propiedades del aceite juegan un papel importante en el tamaño de los aglomerados formados. De acuerdo con los datos de la

tabla 5 los aglomerados formados con aceite refinado presentaron menor tamaño en comparación con los formados con aceite crudo, esto pudo deberse a la menor viscosidad que presenta el aceite refinado [13]. Adicionalmente, estos aglomerados de menor tamaño presentaron mayor resistencia a la caída, debido a que por ser más pequeños, las fuerzas de enlace son más fuertes en el centro de los aglomerados, lo cual hace más estable la estructura de los mismos.

#### **4.4. RECUPERACION DE ORO POR LA APLICACIÓN PROCESO CGA**

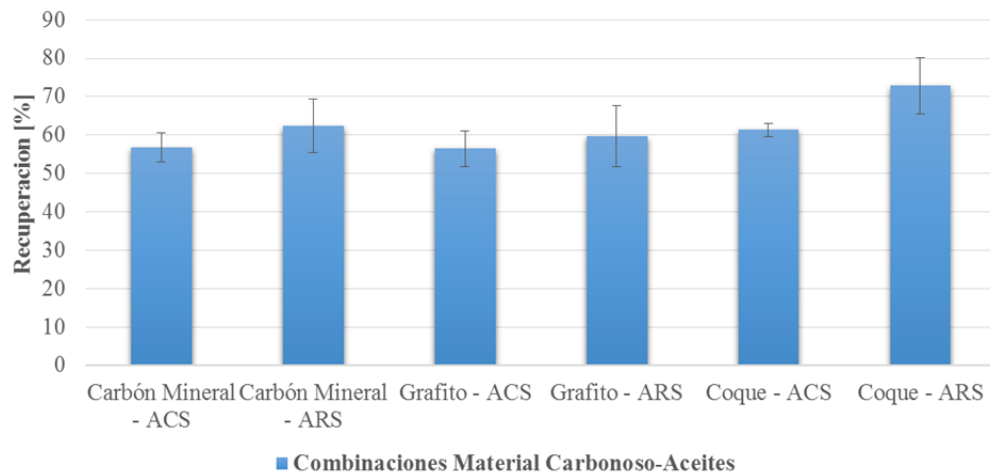
En la figura 6.a y 6.b se presentan los valores de los índices metalúrgicos [17] Recuperación (R) y Eficiencia (E) del proceso CGA para la extracción del oro. Se observa que los mayores porcentajes de recuperación de oro se obtuvieron con los aglomerados de menor tamaño y que a su vez estaban entre los más resistentes, es decir los aglomerados formados con aceite refinado de soya (ARS), alcanzándose unas recuperaciones máximas apremiadamente de 72% de oro con la combinación coque-ARS. El mejor comportamiento de los aglomerados de aceite refinado puede explicarse por el hecho de que los aglomerados más pequeños presentan mayor área superficial, es decir mayor cantidad de sitios para la adhesión de las partículas de oro. En el caso particular de la combinación coque –ARS se debe destacar que los aglomerados obtenidos presentaron alta porosidad, lo que permitió que el oro difundiera hacia interior de los aglomerados.

En la figura 6.b se presentan los valores de eficiencia del proceso CGA, calculados teniendo en cuenta tanto la recuperación como la separación del material de interés (oro) [17]. En tal sentido es evidente que el coque es el material carbonoso más eficiente para la recuperación del oro, alcanzándose con él, eficiencias de 66,8% y 69,8% en los aglomerados obtenidos con aceite refinado de soya y aceite crudo de soya respectivamente, estos resultados podrían indicar que el coque tiene mayor afinidad con el oro que con otros compuestos como la pirita, cuarzo o calcita presentes en el mineral aurífero.

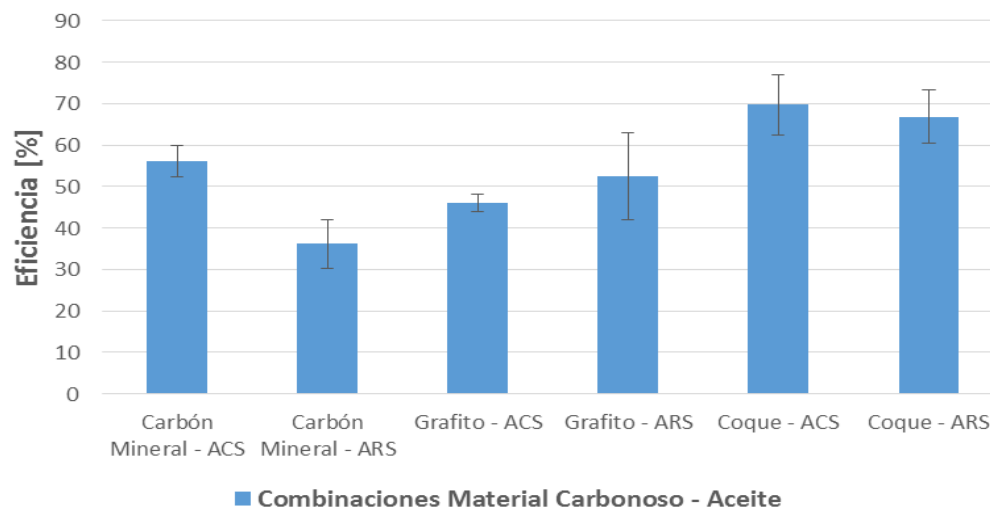
Los datos en la figura 6 demuestran que el proceso CGA es más eficiente que el proceso de amalgamación, puesto que el segundo aparte de ocasionar daños a la salud y al medio ambiente, tiene eficiencias entre el 40% y 50% y recupera solo el oro libre en el mineral [18]. Esta observación es concordante con las medidas de ángulo de contacto (ver tabla 4) ya que este fue el material carbonoso con mayor carácter hidrofóbico y mayor oleofílico.

**Figura 6.** Comparación de los índices metalúrgicos obtenidos con los diferentes materiales carbonosos en el proceso CGA. a. Recuperación, b. Eficiencia.

a.



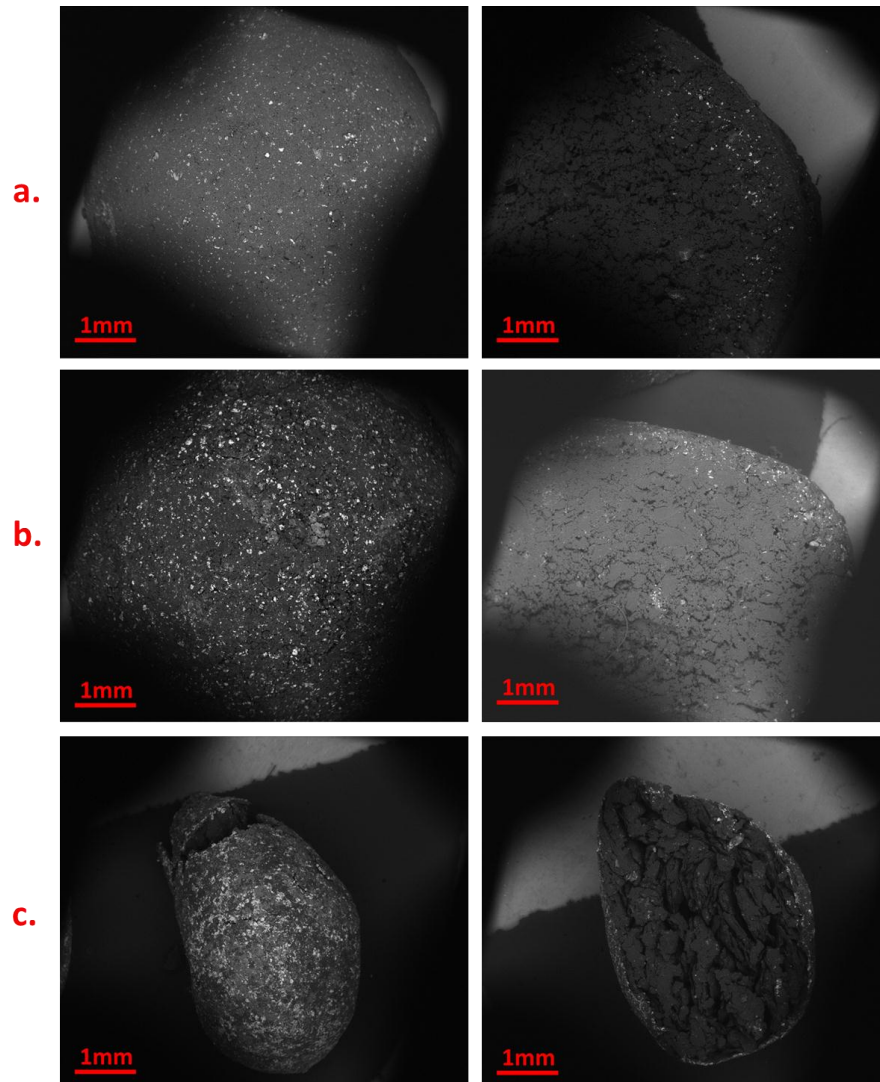
b.

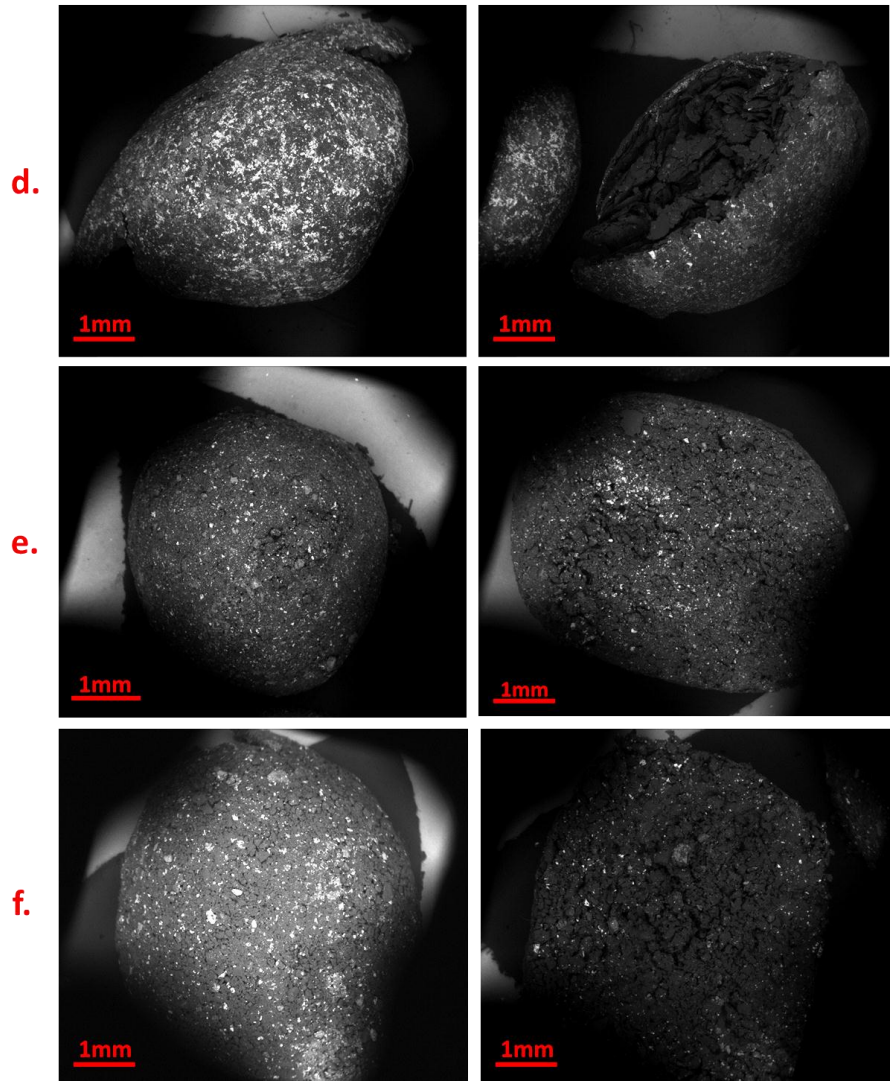


En la Fig. 7. Se pueden observar las micrografías SEM obtenidas para los aglomerados con diferentes combinaciones material carbonoso- aceite. En las figuras 7.c y d se evidencia una de las causas que los aglomerados de grafito no tuvieran recuperaciones y eficiencias más altas, la afinidad que estos aglomerados tuvieron con otros compuestos presentes en el mineral aurífero, quitaban espacio y no permitían que el oro se adhiriera a ellos. Además de no ser porosos, el tamaño de estos aglomerados era mayor disminuyendo el área de contacto con el mineral.

Por otra parte, es posible decir que los aglomerados con carbón mineral tienen buena recuperación, estos poseen características porosas que permiten el ingreso de algunas partículas de oro hacia el interior de los aglomerados, pero también tiene afinidad hacia otros compuestos que no permite que su eficiencia sea mayor (ver Fig. 6 a y b).

**Figura 7.** Micrografías de los aglomerados cargados a 50X. Izquierda aglomerados completos, derecha aglomerados corte por el centro. a. Carbón mineral-aceite crudo de soya, b. Carbón mineral-aceite refinado de soya, c. Grafito-aceite crudo de soya, e. Grafito-aceite refinado de soya, f. Coque-aceite crudo de soya, g. Coque-aceite refinado de soya.





## 5. CONCLUSIONES

- Se evaluaron las características de los materiales carbonosos y aceites y se estableció que para la formación de aglomerados material carbonoso-aceite es necesaria la presencia de cenizas y un alto contenido de carbono fijo, y que los porcentajes sean superiores al 4% y 70% respectivamente. Además, los aceites deben estar en fase líquida para la realización de la etapa de emulsificación y su utilización en la formación de aglomerados.
- Los aglomerados formados con aceite refinado de soya presentaron menor tamaño, lo que los hace más resistentes que los formados con aceite crudo de soya. Además, las combinaciones realizadas con carbón vegetal, negro de humo y aceite crudo y aceite refinado dieron como resultado la formación de una masilla sin consistencia haciéndolos inservibles en la formación de aglomerados.
- Con los seis tipos de aglomerados formados con diferentes combinaciones material carbonoso- aceite, se obtuvieron recuperaciones de oro entre 56 y 73 % aproximadamente, alcanzándose la mayor recuperación con la combinación coque - aceite refinado, cuyos aglomerados presentaron el menor tamaño y mayor porosidad, lo que favoreció la extracción de oro. El coque se destacó por sus propiedades hidrofóbicas y oleofílicas que permitieron mayor separación del oro del resto del mineral, lo que conllevó a alcanzar la mayor eficiencia en la extracción de oro a través del proceso CGA (70% aproximadamente).

## **6. RECOMENDACIONES**

Se recomienda realizar un estudio de recuperación de oro por medio del proceso CGA con minerales con un tenor de oro y plata menor al utilizado en este proyecto y analizar si se alcanza mayores porcentajes de recuperación.

Para hacer que el proceso CGA sea una alternativa más amigable al medio ambiente, se recomienda buscar nuevas alternativas a la calcinación para separar el oro de los aglomerados cargado. Como posibles alternativas se recomienda la implementación de métodos de concentración gravimétrica y así permitir la reutilización del material carbonoso.

Para futuras investigaciones se propone analizar la distribución granulométrica de mineral aurífero, llevándolo a un tamaño menor o igual al que posean los poros de los aglomerados sin cargar y así posiblemente aumentar el porcentaje de recuperación en los aglomerados.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] VALDERRAMA, J. CHAMORRO, D. OLGUIN y OYARCE J., «Amalgamación de concentrado de oro obtenido en concentrador knelson,» *revista de la facultad de ingenieria, Universidad de Atacama*, 2012.vol.27 pp. 33-38, 2012.
- [2] CORDÓBA, E. M. Recuperacion de oro particulado con aglomerados carbon-aceite: una tecnologia limpia en la extracion de oro, tesis doctoral. Universidad Industrial de Santander, 1998.
- [3] AKCIL, X. . Q. WU y KILINC A, «Coal-Gold Agglomeration: An Alternative Separation,» *Separation & Purification Reviews*, 2009.vol 38. 173-201pp.
- [4] ATEHORTUA E., A. C. GAVIRIA C y J. D. PEREZ S., «recuperación de oro libre mediante su aglomración con un agregado carbón-aceite,» *Boletin de ciencias de la tierra*, 2006. nro 18, 39-44 p.
- [5] SEN, S., AKAR, G., CILINGIR., Y., MALAYOGLU, U., TANRIVERDI M., & IPEKOGLU, U. The Effects of Various Flotation Parameters on Gold. *Separation Science and Technology*. 2013, vol. 48, 1585-1590 p.
- [6] RILEY, J. T. *Routine Coal and Coke Analysis: Collection, Interpretation, and Use of Analytical Data*. 2 Ed. Baltimore: ASTM International, 2007. 3-71 p. ISBN: 978-1-62870-238-5
- [7] AVELLANEDA, F. Produccion y caracterizacion de biodisel de palma y aceite resicaldo mediante un proceso batch y un proceso continuo con un reactor. Tesis doctoral. Universidad Rovira i Virgili, Tarragona, 2010.
- [8] GELVES, G. A., GARCIA, I. A., PEDRAZA, J.E., MALDONADO, A., PEÑA, D. Y., RODRIGEZ, M, E., CORDOBA, E. M. Algunas alternativas de solución a la problemática

ambiental del mercurio en la minería del oro. Tesis de pregrado Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2002

[9] RODRIGEZ , G. A. estudio del angulo de contacto y de la mojabilidad a alta temperatura de fases liquidas en la sinterizacion de metales. Tesis de pregrado. Universidad Carlos III de Madrid, Leganes, 2010.

[10] BARRERA, Z. R., PÉREZ, J. F., & SALAZAR, C. Carbones colombianos: clasificación y caracterización. Revista ION. 2014, vol. 27, 43-54 p.

[11] VALDEZ, C., & UNTIVEROS, G. Extracción y caracterización del aceite de las larvas del tenebrio molitor. Rev Soc Quím Perú. 2010, vol. 76, 410-414 p.

[12] HINOJOSA, C. A., & MONTOYA, D. F. Aplicación del proceso CGA a minerales auríferos oxidados: establecimiento de los parámetros metalúrgicos de interés. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2017.

[13] OOI, C. K., CHOO, Y. M., YAP, S. C., & MA A. N. Refinación del aceite rojo de palma. Palma. 1998, vol. 1, 61-67 P.

[14] CHARY, G.H.V.C., & DASTIDAR, M.G. Investigation of optimum conditions in coal–oil agglomeration using Taguchi experimental design, Fuel. 2012, vol. 98, 259–264 p.

[15] TAO LU, KE-ZHONG LI, RONG ZHANG, JI-CHENG BI, Addition of ash to prevent agglomeration during catalytic coal gasification in a pressurized fluidized bed, Fuel Processing Technologic, vol 134, 2015. 414-423 p.

[16] CHATTOPADHYAY, P. Boiler Operation Engineering: Questions and Answers. 3 Ed. Nueva Delhi: McGraw-Hill, 2013, 320 p, ISBN 978-1-25-900149-9.

[17] WAMANKAR, A., K., & MURUGAN, S. investigation of carbon black water–diesel emulsion in a stationary DI diesel engine, Fuel Processing Technology. 2014, Vol. 125, 258–266 p.

[18] ARANIBAR, A. M., VILLAS BOAS, R. C., CYTED (Organización). Pequeña minería y minería artesanal en Iberoamérica: conflictos, ordenamiento, soluciones. 1 ed. Rio de Janeiro: CYTED-CETEM, 2003. 144 p. ISBN 85-7227-185-6.

## BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

DAVIES, G. R. «A toxic free future-Is there a role for alternatives to mercury in small-scale gold mining?,» *ELSEVIER*, pp. 113-119, 2014.

FEDEPALMA, Anuario estadístico 2016: La agroindustria de la plama de aceite en Colombia y en el Mundo, Bogotá: FEDEPALMA, 2015.

NEIRA Arenas, G. y CAÑAS L. A. M. , «PROCEDIMIENTO PARA MEDIR ÁNGULOS DE CONTACTO EN SÓLIDOS PARTICULADOS FINOS,» *Scientia et Technica Año XIII*, n° 36, pp. 833-838, 2007.

OLARTE, B. Y. y PEÑALOZA, L. N. implementacion de tecnicas alternativas a la tostacion de los oglomerados carbon-aceite para la recuperacion de oro mediante el proceso CGA, Bucaramanga, 2015.

SYED, S. «Recovery of gold from secondary sources—A review,» *ELSILVER*, pp. 31-51, 2012.

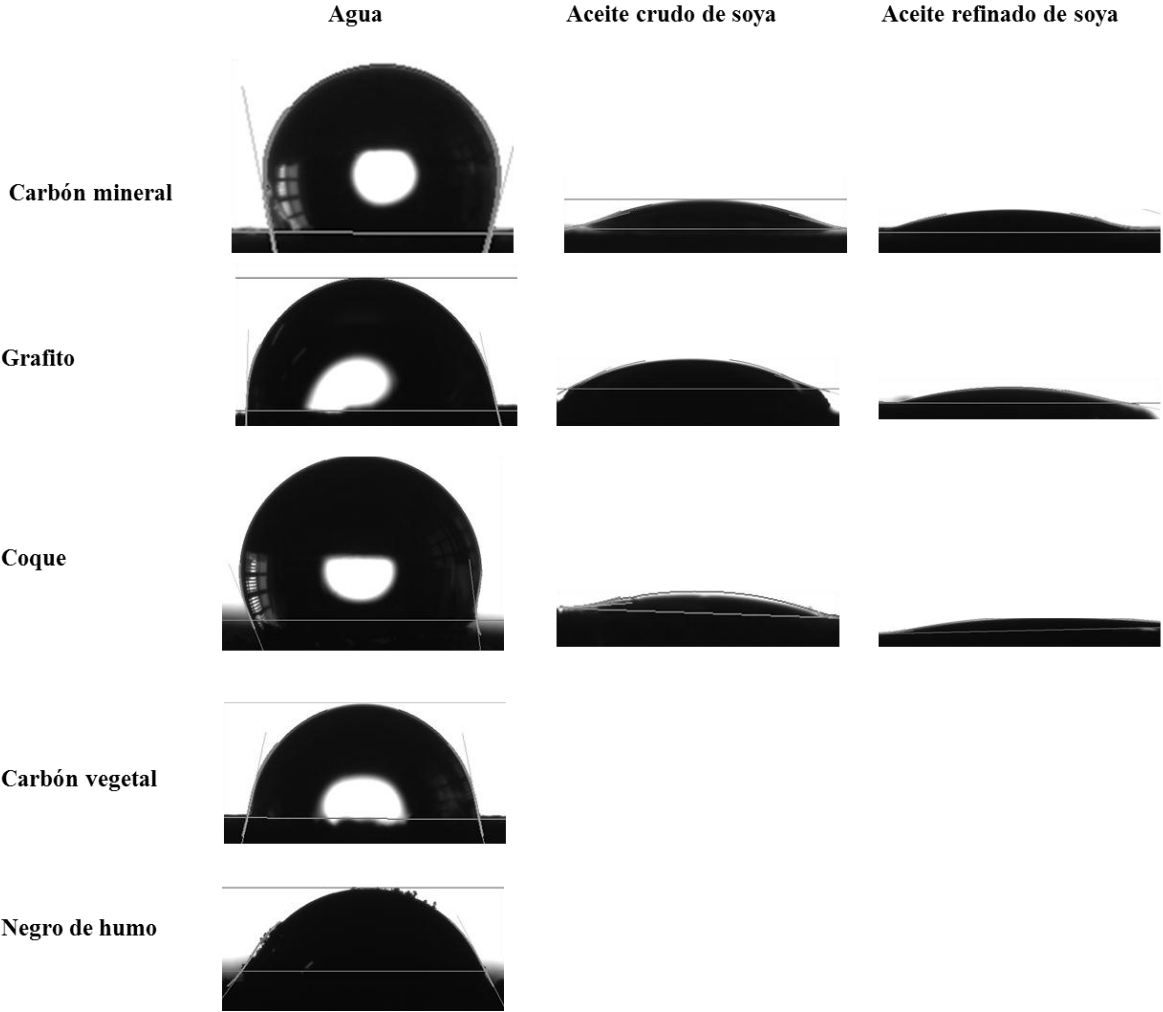
WOLOJ, D. J. Nuevas Aplicaciones de la glicerina: Un analisis preliminar, Buenos Aires, 2011.

## ANEXOS

### ANEXO A. Evaluación del espectro FTIR

| Número de onda (cm <sup>-1</sup> ) | Descripción  | Presente en                |
|------------------------------------|--|----------------------------|
| 3473                               | Estiramiento de los enlaces C=O  | Aceite crudo y refinado    |
| 3100-2800                          | Estiramiento de hidrógenos   | Todos                      |
| 3010                               | C-H Estiramiento de la vibración del doble enlace CIS (=CH)  | Todos                      |
| 2921, 2858                         | Vibración de estiramiento simétrica y asimétrica del grupo CH <sub>2</sub> alifático. Triglicéridos                                    | Todos                      |
| 1800-1600                          | Región de estiramiento de los dobles enlaces   | Todos                      |
| 1745                               | Enlace C=O de los grupos ésteres en la molécula de fosfolípidos. Éster de los triglicéridos. Alto contenido en ácidos grasos saturados | Ácido graso                |
| 1652, 1655                         | Isómeros CIS. C=C  | Todos                      |
| 1650-1390                          | Región de deformación y flexión de otros enlaces   | Todos                      |
| 1465                               | Las vibraciones de flexión de los grupos alifáticos CH <sub>2</sub> y CH <sub>3</sub>  | Todos                      |
| 1465-1377                          | Región de otras deformaciones de enlaces y flexión   | Todos                      |
| 1434                               | Triglicéridos  | Ácido graso                |
| 1454                               | Triglicéridos  | Aceite crudo y ácido graso |
| 1240-700                           | Zona de identificación   | Todos                      |
| 939                                | Triglicéridos  | Ácido graso                |
| 725                                | La superposición de la vibración oscilante ch <sub>2</sub> y la vibración fuera del plano de las olefinas di-sustituidas CIS           | Todos                      |

**ANEXO B. Ángulos de contacto.**



**ANEXO C. Morfología de la superficie de los aglomerados, micrografías tomadas a 500X a) Grafito b) carbón mineral y c) coque.**

