

INFLUENCIA DEL TIPO DE CARBÓN Y DEL CONTENIDO DE ACEITE EN
AGLOMERADOS OBTENIDOS EN DISCO PELETIZADOR, SOBRE LA
RECUPERACIÓN DE ORO MEDIANTE EL PROCESO CGA

LUIS CARLOS LARROTTA HERRERA

PABLO ALEXIS MARTÍNEZ TAPIAS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA

2018

INFLUENCIA DEL TIPO DE CARBÓN Y DEL CONTENIDO DE ACEITE EN
AGLOMERADOS OBTENIDOS EN DISCO PELETIZADOR, SOBRE LA
RECUPERACIÓN DE ORO MEDIANTE EL PROCESO CGA

LUIS CARLOS LARROTTA HERRERA

PABLO ALEXIS MARTÍNEZ TAPIAS

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

Directores

ELCY MARÍA CÓRDOBA TUTA

Ingeniera Metalúrgica, Ph.D

Codirector

PEDRO LUÍS DELVASTO ANGARITA

Ingeniero de Materiales, Ph.D

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA

2018

DEDICATORIA

A Dios, por guiarme en cada instante de mi vida y brindarme todo su cariño, la gloria es toda tuya.

A mis padres Pablo Martínez G. y Olga L. Tapias B. gracias por todo el esfuerzo que han hecho para hacer de mi vida mejor, por todo su amor y cariño, todo lo que soy y lo que he logrado es gracias a ustedes, los amo con todo mi corazón.

A mis hermanos Mario A Martínez T quien me ha acompañado toda mi vida y me ha brindado su apoyo en todo sentido siendo más que un hermano mi mejor amigo y Brandon F. Martínez T. el mejor niño del mundo, con un corazón muy grande y puro que te va llevar muy lejos.

A mi querido sobrino Mario A. Martínez S. que con su sonrisa siempre me alegra los días.

A Luis C. Larrotta H. mi parcerero y compañero de proyecto por acompañarme en esta etapa final.

A mis amigos Luis Deluquez, Edgar Nieto, Leyner Useda, John Neira, Sebastian Perez, Juan Mendez, Sergio Sanabria y Armando Solorzano por brindarme su amistad durante todos estos años en los que luchamos por cumplir el mismo objetivo.

A mis familiares por creer en mí y darnos siempre su apoyo.

Pablo Alexis Martínez Tapias

A Dios, por la vida, salud, bienestar y compañía a lo largo de mi vida. Todo se lo debo a Él.

A mi Madre Emilcen, mi mayor motivación e inspiración. Mujer luchadora e incasable llena de amor por sus hijos. Gracias a ella soy lo que soy y que con su apoyo, esfuerzo, amor y comprensión han hecho de mí una mejor persona.

A mi hermano Arley, la mejor persona que puso Dios a mi lado para ser mi amigo, consejero, ejemplo y motivación a lo largo de mi vida.

A mi Padre Luis, por ser una de las columnas de mi vida. Gracias por guiarme y enseñarme el valor de las cosas.

A mis Nonitos Alicia, Lilia y Rufino, son mi mayor motivación e inspiración. Gracias por su apoyo, cuidado y enseñanzas. Gracias por llenarme de amor todos los días.

A Tatiana, por su apoyo e incondicionalidad en mis últimos semestres. Gran ser humano lleno de valores que admiro mucho.

A mis amigos, Guillermo, Jhon, Christopher y Pedro, los voy a llevar siempre conmigo porque siempre estuvieron a mi lado dándome motivación y llenadome de sonrisas.

A mi amigo Pablo, por su incondicionalidad, apoyo, empeño y responsabilidad durante este proyecto. Gracias por su amistad y enseñanzas.

A mi familia, gracias por las enseñanzas, amor, apoyo en todo momento, esto es para ustedes.

Luis Carlos Larrotta Herrera

AGRADECIMIENTOS

A la profesora Elcy María Córdoba Tuta por el apoyo y la oportunidad de desarrollar este proyecto.

Al profesor Pedro Luis Delvasto Angarita por su apoyo, enseñanza y atención a lo largo del desarrollo de este proyecto, siempre estuvo para nosotros.

Al técnico Javier, y en especial al técnico Ambrosio Carrillo por su apoyo, enseñanzas, risas y aprendizajes dejados.

Al taller Ramón Tapias por prestarnos sus instalaciones y por toda su colaboración en la fabricación del reactor para la fabricación del carbón.

CONTENIDO

	Pág
INTRODUCCIÓN	13
1. ANTECEDENTES	14
2. OBJETIVOS	17
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	18
3.1. OBTENCIÓN CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS	18
3.1.1 ACEITE.	18
3.1.2 CARBÓN.	18
3.1.3 MINERAL.	18
3.2. FORMACIÓN DE AGLOMERADOS	19
3.3. COMPORTAMIENTO DE LOS AGLOMERADOS	20
3.4. APLICACIÓN DEL PROCESO CGA A LOS AGLOMERADOS CARBON- ACEITE	21
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS	22
4.1. OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS CARBONES	22
4.1.1 Análisis de la producción de los carbones vegetales.	22
4.1.2 Análisis de los carbones vegetales y minerales.	23
4.1.3 Análisis de tamaño de partículas de los 4 carbones	24

4.2.	ANALISÍS DE LA FORMACION DE AGLOMERADOS	26
4.2.1	Análisis de los aglomerados bajo condiciones de fabricación	26
4.2.2	Análisis microscópico de los aglomerados.	28
4.2.3	Resultados de las pruebas de resistencia a la caída de los aglomerados.	32
4.2.4	Resultados de las pruebas de tamaño de los aglomerados.	33
4.2.5	Resultados de las pruebas de redondez de los aglomerados.	34
4.2.6	Resultados de variación de los aglomerados.	35
4.3.	APLICACIÓN DEL PROCESO CGA	36
5.	CONCLUSIONES	38
6.	RECOMENDACIONES	39
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	40
	ANEXOS	42

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tiempo y rendimiento de producción del carbón vegetal a partir de madera seca de Oití y Eucalipto.	22
Tabla 2. Análisis fisicoquímico de los carbones vegetales y minerales.....	24
Tabla 3. Condiciones requeridas para la obtención de los aglomerados en disco peletizador.	27
Tabla 4. Relación carbón-aceite en la fabricación de aglomerados.	28
Tabla 5. Tamaño y resistencia a la caída de los aglomerados de los cuatro tipos de carbón.	32
Tabla 6. Porcentaje de pérdida de redondez de los aglomerados antes y después del proceso de contactación.....	34
Tabla 7. Supervivencia de los aglomerados en relación con su masa.....	35

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del proceso CGA. (a) Método tradicional, (b) Modificación propuesta	14
Figura 2. Gráfica Temperatura vs Tiempo del contenedor dentro del Horno de Crisol	23
Figura 3. Resultados tamaños de partículas de los carbones	25
Figura 4. Distribucion de tramaños de particulas de los carbones.....	25
Figura 5. Micrografías a 35 X de la superficie de los cuatro tipos de aglomerados.....	29
Figura 6. Micrografías a 35 X de la superficie de los cuatro tipos de aglomerados.....	30
Figura 7. Micrografías a 140 X de los cortes transversales de los aglomerados.....	30
Figura 8. Mapa 3D corte transversal de los carbones	31
Figura 9. Rugosidad de los carbones.	31
Figura 10. Porcentaje de pérdida de tamaño de los aglomerados por su agitación en una pulpa mineral.....	33
Figura 11. Valores de recuperación de oro y plata por el proceso CGA implementando los aglomerados obtenidos es disco peletizador	37

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Tablas de caracterización química y mineralógicamente en mediante las técnicas de Fluorescencia (FRX) y Difracción de rayos X (DRX).....	42
ANEXO B. Imagen del disco peletizador AGMD DG631171 y los aglomerados formados.	43
ANEXO C. Gráfico de la producción del carbón vegetal.	44
ANEXO D. Colector AEROFLOAT 208 PROMOTER	45
ANEXO E. Procedimiento matemático para el análisis de los carbones.	45
ANEXO F. Analizador de partículas MASTERSIZER 3000 HYDRO.	47
ANEXO G. Microscopio Digital Kh-7700.....	48
ANEXO H. Cálculos de las pruebas mecánicas hechas a los aglomerados.	48
ANEXO I. Gráficas de porcentaje de recuperación de oro vs propiedades de los carbones	49
ANEXO J. Imagen de la redondez de los aglomerados analizados por Digimizer.....	52
ANEXO K. Tablas desviaciones estándar de los resultados.....	52

INTRODUCCIÓN

La problemática causada por los incrementos de contaminación del medio ambiente y daño a la salud humana, debido a los procesos tradicionales de extracción de oro, en los cuales se usa cianuro y mercurio para obtener dicho metal, ha creado la necesidad de desarrollar procesos alternativos para la extracción del oro que sean ambiental y económicamente sostenibles. En este sentido, a principios de los años ochenta surgió como alternativa el proceso de aglomeración de oro con carbón y aceite, conocido como CGA, por sus siglas en inglés (Coal Gold Agglomeration) [10].

El proceso CGA es un método de recuperación de oro, en el cual se aprovechan las propiedades hidrofóbicas del oro para separarlo del resto del mineral, siempre y cuando las partículas del metal procesado estén libres o puedan ser liberadas [10]. Este proceso consta de tres etapas principales las cuales son: aglomeración, recuperación y calcinación. En la aglomeración se pone en contacto carbón pulverizado con aceite en un medio acuoso y mediante agitación mecánica se forman los aglomerados. En la etapa de recuperación también se usa la agitación mecánica, en este caso para mantener en suspensión acuosa el mineral aurífero y facilitar el contacto y la adhesión de las partículas de oro a los aglomerados previamente formados. Finalmente, los aglomerados cargados con oro se calcinan y funden para obtener el botón de oro [5].

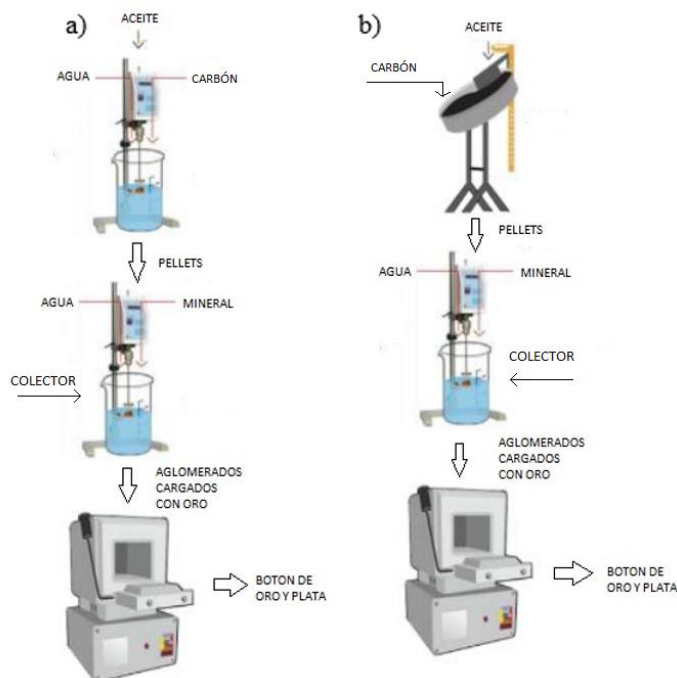
El presente trabajo de grado se enmarca dentro de la temática antes descrita (proceso CGA), proponiéndose la modificación de la etapa de producción de los aglomerados carbón-aceite, pasando de la aglomeración esférica en medio acuoso al uso de una máquina peletizadora, eliminando así el uso de agua en este paso del proceso y minimizando la huella hídrica. También se propone el uso de carbones vegetales, producidos a partir de madera seca, para la obtención de los aglomerados, como alternativa a los carbones minerales, los cuales constituyen un recurso no renovable. Por lo tanto, el alcance principal del trabajo es determinar si las modificaciones planteadas permiten mantener la eficiencia del proceso CGA para la extracción de oro, haciéndolo más amigable con el medio ambiente y sostenible con el tiempo.

1. ANTECEDENTES

El proceso CGA es un método de recuperación de oro, en el cual se aprovechan las propiedades hidrofóbicas del oro para separarlo del resto del mineral, siempre y cuando las partículas del metal procesado estén libres o puedan ser liberadas. Gracias a sus propiedades hidrofóbicas, el oro puede aglomerarse con carbón y aceite en un medio acuoso, o simplemente adherirse sobre la superficie de los aglomerados de carbón y aceite previamente formados. Luego se separan los aglomerados de la pulpa, se queman y las cenizas resultantes se funden con el objetivo de obtener el bullón de oro [5], tal como se esquematiza en la Figura 1(a).

A pesar de que el proceso CGA es una alternativa amigable con el ambiente, al eliminarse el uso de sustancias altamente tóxicas como cianuro y mercurio, su reconocimiento como tecnología verde puede fortalecerse, si se minimiza el uso de agua en tal proceso.

Figura 1. Esquema del proceso CGA. (a) Método tradicional, (b) Modificación propuesta



Fuente: Autores

A lo largo de los años, la recuperación de oro por el método tradicional ha utilizado sustancias como el cianuro y el mercurio, trayendo con su uso muchos problemas ambientales; debido a esto la BRITISH OIL en 1988 creó el proceso CGA y realizó la primera prueba piloto en Australia la cual tuvo éxito e incentivo el no uso de dichas sustancias [10].

Marciano y Costa [3] en 1994 estudiaron las variables más importantes que se deben tener en cuenta en la primera etapa del proceso CGA, las cuales son: la naturaleza y la proporción tanto de aceite como de carbón en la formación de aglomerados, empleándose diferentes tipos de agentes aglomerantes, tales como aceite diésel, queroseno, aceites vegetales de soya y maíz, además del grado y el tiempo de agitación. Para estos parámetros se han definido rangos de aplicación, con los cuáles se obtienen respuestas favorables, se utilizaron tres materiales que contenían oro: una mezcla artificial de partículas de arena y oro, un concentrado de oro por gravedad y un relave de gravedad. Otros autores concluyeron que, de acuerdo a sus propiedades, los carbones con alto contenido de carbono fijo tendrán mejores propiedades aglomerantes. Este porcentaje de carbono deberá ser mayor o igual a 90% [3].

Los Investigadores Calvez, Kim y Tran [8] en 1998 realizaron estudios fundamentales para evaluar los principios subyacentes mediante los cuales el oro se recupera sobre aglomerados de aceite y carbón. Se evaluaron los efectos de varios parámetros, tales como las proporciones carbón-aceite, las relaciones aglomerado-mineral, el pH y el tamaño de partícula de carbón en la recuperación de oro, utilizando muestras auríferas sintéticas, carbón bituminoso y queroseno, encontrando como condiciones más adecuadas para llevar a cabo el proceso CGA, las siguientes: el grado de colisiones entre partículas, resistencia y estabilidad del aglomerado, mineralogía de oro y otros minerales asociados a su aparición. Otro factor que también ha sido investigado es la presencia de sulfuros en el mineral aurífero y su efecto sobre la recuperación de oro, donde la recuperación de oro no se ve afectada por la presencia de pequeñas cantidades de sulfuros comúnmente asociados [8]. Y concluyeron que esto podría atribuirse al hecho de que el oro es más hidrófobo que los sulfuros y la cantidad de sulfuros en la alimentación (hasta un 5% en el caso de calcopirita y piritita) no pudieron interferir significativamente en la unión de oro a los aglomerados

Han sido probados diferentes materiales carbonosos para originar aglomerados carbón-aceite a escala laboratorio, tales como: grafito sintético, carbón mineral de diferentes procedencias y rangos, negro de humo, coque y carbón vegetal, encontrándose las mayores eficiencias del proceso para la combinación de coque- aceite refinado, mientras que el carbón vegetal presenta dificultades para su aglomeración con aceite en medio acuoso, posiblemente debido a su menor hidrofobicidad u oleofilicidad [4], situación que limita su aplicación al proceso CGA tradicional.

El carbón vegetal es un material altamente poroso y quebradizo obtenido a partir de la quema de maderas que han cumplido su ciclo de vida y se encuentran disponibles en forma de leña, las propiedades de este tipo de carbón están determinadas por la condición del proceso de carbonización y el tipo de madera utilizada. La característica más básica del carbón de leña es su tamaño de partícula, esto tiene gran influencia en sus propiedades de adsorción. Por lo tanto, la capacidad del carbón para retener partículas se atribuye ampliamente a su porosidad [9].

Teniendo en cuenta lo anterior, con el desarrollo del presente proyecto se pretendió modificar la etapa de formación de los aglomerados carbón-aceite, remplazando la aglomeración esférica, la cual requiere un medio acuoso y altos esfuerzos de corte en dicho medio para que se formen los aglomerados [2]. Entonces, se planteó la formación de los aglomerados a través de una metodología sencilla en disco peletizador (Ver Figura 1(b)), evaluándose el efecto de dos variables, tipo de carbón [mineral (Norte de Santander y Boyacá) y vegetal (Eucalipto y Oití)] y cantidad de aceite necesaria para formar los aglomerados, en las características físicas de los aglomerados y en su capacidad para adherir sobre su superficie las partículas de oro.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

- Determinar la influencia que tiene el tipo de carbón y el contenido de aceite vegetal empleado en la fabricación de aglomerados carbón-aceite en disco peletizador sobre la recuperación de oro mediante el proceso CGA.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener aglomerados carbón-aceite en disco peletizador, empleando distintos tipos de carbón y variando el contenido de aceite vegetal en los aglomerados.
- Evaluar la recuperación de oro mediante el proceso CGA con los aglomerados producidos.

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

A continuación, se detallan las actividades experimentales llevadas a cabo para el cumplimiento de los objetivos del proyecto.

3.1. OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS

3.1.1 Mineral. Para las pruebas de extracción del oro por el proceso CGA, fue empleado un mineral aurífero proveniente de la mina El Bagre, de Antioquia, el cual se molió en molino de bolas y se clasificó 100% pasante malla Tyler No. 200, granulometría adecuada para el proceso [9]. La caracterización química y mineralógica fue obtenida previamente en otro trabajo de grado [12], mediante las técnicas de Fluorescencia (FRX) y Difracción de rayos X (DRX); tales resultados se muestran en el Anexo A, los cuales señalan la presencia de cuarzo y diversos minerales aluminio-silicatos, así como la ausencia de especies sulfuradas. Las leyes de oro y plata en el mineral se determinaron por ensayo al fuego, obteniéndose valores de 115 gr Au/Tn y 54.2 gr Ag/Tn.

3.1.2 Aceite. Fue empleado como aglomerante para la fabricación de los aglomerados el aceite comercial refinado de soya; se escoge este aceite ya que se recomienda por sus buenos resultados en las pruebas de aglomeración desarrolladas en trabajos anteriores [6]. Tal aceite se caracteriza por tener valores de densidad y viscosidad de 0,933 g/cm³ y 48 cP, respectivamente.

3.1.3 Carbones. Para garantizar la procedencia de los carbones vegetales, se decidió incluir en el presente trabajo de grado su producción a partir de leña seca procedente de árboles de Oití y Eucalipto. Para esto se fabricó un reactor con un diseño sencillo (ver Anexo C), cuyo contenedor consistió de un tubo de acero AISI SAE 1020 de 23 cm de diámetro exterior, 28 cm de altura y espesor de la pared de 1/4 de pulg. La tapa del contenedor (fabricado en el mismo material) posee un agujero por el cual se evacua los humos causados por la quema de la madera, tal tapa está ajustada al contenedor mediante 4 tornillos. El procedimiento de fabricación de los carbones inicia con la introducción de la madera seca en el contenedor,

posteriormente se realiza el cierre y ajuste de la tapa del contenedor. Seguidamente se coloca el contenedor dentro del Horno de Crisol, para el encendido del horno la tapa de éste debe estar abierta, después de que el horno empieza a tomar temperatura, la tapa el horno se cierra, seguidamente se introduce en la parte superior del horno un tubo de acero para que salgan los humos producidos por la humedad y los volátiles que posee la madera. De esta forma inicia el proceso de quema de madera para obtención del carbón. El horno llega a una temperatura de aproximadamente 1200°C y el tiempo necesario para la producción del carbón depende del tipo de carga y madera. Pasado tal tiempo se deja enfriar el contenedor dentro del horno durante 16 horas. Ver Anexo C.

Los carbones minerales empleados en este estudio provinieron de Norte de Santander y Boyacá. Estos carbones, junto con los dos vegetales, fueron sometidos a procesos de trituración, molienda y tamizaje a fin de lograr el tamaño de partícula adecuado, 100% pasante malla Tyler No. 50, según resultados de pruebas de aglomeración realizadas en trabajos de grado previos [4,11]. Los carbones se analizaron con base en las siguientes normas: ASTM D3173 para la determinación de humedad, ASTM D3174 para la cantidad de cenizas luego de la calcinación, ASTM D3175 para materia volátil y ASTM D3302 para determinar el carbono fijo presente, ASTM D5865 para determinación del poder calorífico y ASTM D3177 para el contenido de azufre. Posteriormente el análisis de Nitrógeno, Hidrógeno y Carbono se realizó en el analizador elemental CHN marca Sundry modelo SDCHN435. Finalmente, se realizó análisis de distribución de tamaño de partículas de los carbones por la técnica Difracción de rayo láser, para lo cual se empleó el equipo MASTERSIZER 3000, Malvern Panalytical. Ver Anexo F

3.2. FORMACIÓN DE AGLOMERADOS CARBÓN-ACEITE

La fabricación de los aglomerados carbón-aceite se realizó en el disco peletizador (ver Anexo B), manteniendo constantes los niveles de algunos parámetros operacionales, los cuales fueron determinados en un trabajo de grado previo [7], específicamente: ángulo de giro: 45°, velocidad de giro del disco peletizador: 18,32 y cantidad de carbón alimentado al disco

peletizador: 70 g. Para estos ensayos, la variable de estudio fue el tipo de carbón (dos minerales y dos vegetales), mientras que las variables respuesta fueron: cantidad de aceite consumido por el carbón, tiempo de formación y tamaño de los aglomerados.

El proceso inició descargando sobre el disco en movimiento 50 gramos de carbón, al mismo tiempo se adicionaron gotas de aceite por medio de un gotero, siguiente a esto, y una vez se hubiesen formado los núcleos de carbón y aceite, se adicionó aceite con un atomizador para dejar caer gotas muy finas sobre el carbón mientras el disco giraba, para así tener como resultado un aglomerado compacto y homogéneo, es decir, con buena redondez y libre de poros y grietas.

3.3. CARACTERIZACIÓN FÍSICO-MECÁNICA DE LOS AGLOMERADOS

En primer lugar, se analizaron algunas características morfológicas de los aglomerados frescos mediante microscopía óptica confocal, para lo cual se utilizó el microscopio digital KH-7700, Hirox. Dicho análisis se realizó tanto a las superficies de los aglomerados como a sus cortes transversales, pudiéndose evaluar la presencia de defectos tales como poros y grietas. Adicionalmente, se hicieron reconstrucciones 3D sobre los cortes transversales, con el fin de determinar la rugosidad de tales superficies, parámetro relacionado con la cohesión entre las partículas de carbón y con su tamaño.

Luego se hizo el ensayo de resistencia a la caída en el cual consiste en dejar caer el pellet desde una altura de 48 cm y determinar cuántas repeticiones soporta sin quebrarse, siendo 100 el valor de una muy buena resistencia.

Se realizó el ensayo de variación del número de aglomerados en el cual se sometieron los pellets a las mismas condiciones con las cuales se hace el proceso CGA pero en lugar de mineral se utilizó arena sílice con su misma granulometría y se observó cuántos pellets entraban y cuántos salían del proceso.

En el ensayo de porcentaje de pérdida de redondez y pérdida de tamaño se tomaron fotos con una medida de guía (regla) antes y después de ser sometidos al proceso de agitación y

mediante el programa Digimizer se obtuvieron los datos necesarios para aplicarlos en las fórmulas. (Ver Anexo E).

3.4. APLICACIÓN DEL PROCESO CGA A LOS PELETS DE CARBON-ACEITE

La última etapa del proyecto consistió en la implementación de los aglomerados carbón-aceite en el proceso CGA para la extracción de oro. Las condiciones experimentales utilizadas fueron las establecidas en una investigación previa [2]. En primer lugar, se llevó a cabo el acondicionamiento del mineral con el fin de acentuar su carácter hidrofóbico, para lo cual se preparó una pulpa mineral con 50 g de mineral y 250 ml de agua y se adicionaron 100µL del colector AEROFLOAT 208 PROMOTER, tal pulpa se mantuvo bajo agitación mecánica a 650 rpm durante 5 min. Pasado dicho tiempo se agregaron los aglomerados, con una relación másica mineral: aglomerados 1:1, esta etapa de contacto entre el mineral y los aglomerados duró 45 min, manteniendo la pulpa bajo agitación. Luego de dicho tiempo se procedió a separar los aglomerados cargados con las partículas de oro del resto del mineral con ayuda de un tamiz, seguidamente los aglomerados y las colas se secaron a una temperatura de 100 °C para luego ser llevados al ensayo al fuego, previa calcinación de los aglomerados. Cabe resaltar que los aglomerados deben cumplir con rango de tamaño de 0.5 mm a 1.5 mm para que sean tenidos en cuenta en la investigación [1].

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1. OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS CARBONES

4.1.1 Producción de los carbones vegetales. Como se mencionó en el apartado anterior, para la producción de carbón se empleó madera seca de los Arboles Oití y Eucalipto y se llevó a cabo el proceso de carbonización en el contenedor diseñado. En la Tabla 1 se relacionan los tiempos requeridos para la carbonización de los dos tipos de madera, bajo dos condiciones de carga de leña alimentada al horno, así como su rendimiento. El horno se debe encender estando abierto donde se deja 10 minutos para que tome la suficiente temperatura con la ayuda del aire, después se cierra el horno y se mantiene cerrado hasta que expulse todos los gases y en el momento que deje de salir humo se abre de nuevo el honor donde se deja 5 minutos para su posterior apagado, vuelve a cerrarse y se deja enfriar lentamente.

Tabla 1. Tiempo y rendimiento de producción del carbón vegetal a partir de madera seca de Oití y Eucalipto.

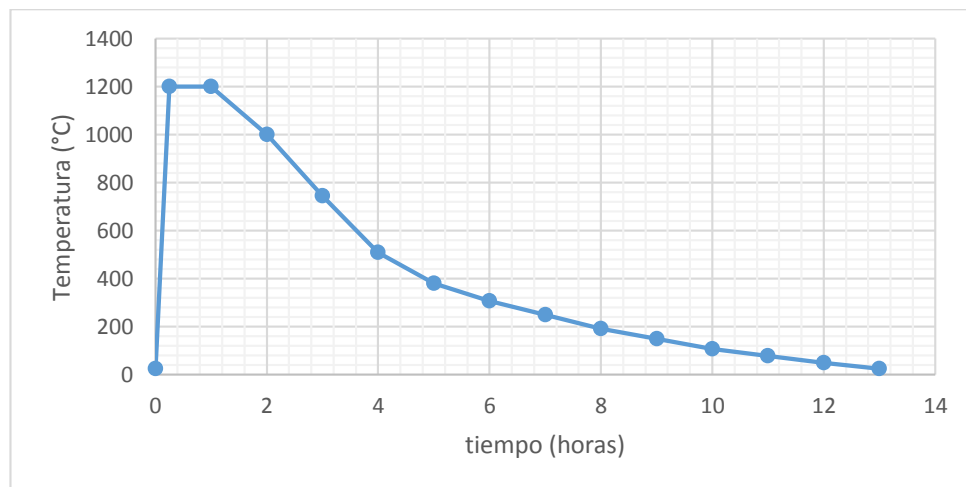
Parámetros de la carbonización	Oití		Eucalipto	
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 1	Prueba 2
Cantidad de leña alimentada [g]	2291	5900	4000	4000
Tiempo horno abierto encendido [min]	10	10	10	10
Tiempo horno cerrado [min]	35	50	30	28
Tiempo gases [min]	39	52	31	30
Tiempo horno abierto para apagado [min]	5	5	5	5
Tiempo total [min]	50	65	45	43
Rendimiento de producción de carbón (%)	16,84	16,16	16,2	15,925

En esta tabla se muestra el proceso que tuvo el horno para la formación del carbón y se puede observar que el tiempo de producción depende de la cantidad de madera que se introdujo dentro del horno puesto que entre más cantidad de madera se introdujo dentro del horno, más tiempo necesita para evaporar todas las sustancias que posee la madera para así obtener el carbón.

Los rendimientos alcanzados con ambos tipos de madera fueron similares (~ 16%) e independientes de las cargas de leña en el horno; aunque tal rendimiento del proceso es bajo, está dentro de los valores típicos en la fabricación de carbón vegetal [13].

En la Figura 2 se muestra la variación de la temperatura dentro del horno, durante el proceso de obtención del carbón. El horno alcanza en media hora una temperatura máxima de aproximadamente 1200° C, manteniéndose a dicha temperatura durante media hora más y a partir de tal momento inicia el enfriamiento, etapa que dura 12 horas más

Figura 2. Gráfica Temperatura vs Tiempo del contenedor dentro del Horno de Crisol



4.1.2 Análisis de los carbones vegetales y minerales. En la Tabla 2 se presentan los resultados obtenidos para la caracterización fisicoquímica de los carbones de estudio.

Tabla 2. Análisis fisicoquímico de los carbones vegetales y minerales.

Porcentajes	C. vegetal Oití	C. vegetal Eucalipto	C. mineral Boyacá	C. mineral N. de Santander
<i>C total</i>	80.67	86.17	70.08	66.94
<i>H total</i>	0.49	0.77	4.77	4.46
<i>N total</i>	0.52	0.47	1.54	1.42
<i>C fijo</i>	74.96	87.56	53.27	47.75
<i>Volátiles</i>	9.41	4.14	34.38	35.33
<i>Humedad</i>	2.93	5.58	3.42	3.52
<i>Cenizas</i>	12.7	2.72	8.93	13.4
<i>Azufre</i>	0.28	1.17	1.16	1.07
<i>Poder calorífico (Btu/Lb)</i>	12662.35	13457.167	13517.22	12300.43
<i>C base Seca</i>	83.11	91.27	72.57	69.38
<i>H Base Seca</i>	0.50	0.82	4.94	4.62
<i>N Base Seca</i>	0.54	0.50	1.59	1.48

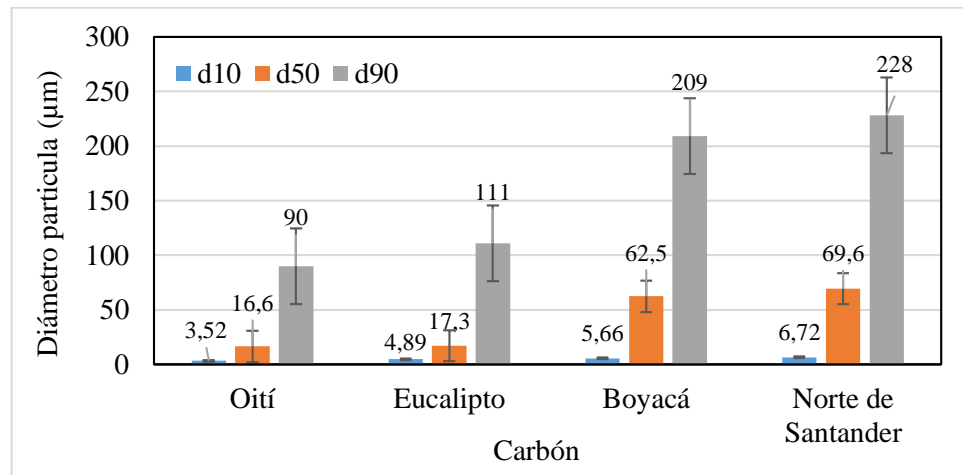
*Valores desarrollados por formulas y procedimientos matemáticos. Ver Anexo E

Al comparar los anteriores resultados, se observa que el porcentaje de carbono total es mayor en los carbones vegetales que en los minerales, lo cual se relaciona con sus bajos contenidos de especies volátiles, Hidrógeno total y Nitrógeno total, debido al proceso de producción del carbón ya que en éste se minimizan los volátiles debido a la alta temperatura a la cual es quemada la madera. Cabe mencionar que en tesis anteriores se evidencio la importancia de las propiedades de % de carbono fijo y % de materia volátil, ya que al tener mayor porcentaje de estas propiedades aumentaba la recuperación. [4][7].

4.1.3 Distribución granulométrica de los carbones En la Figura 3 se comparan los parámetros característicos (d10, d50 y d90) de las distribuciones de tamaños de partículas en los carbones. Es evidente que las partículas de los carbones vegetales son más finas que las de los carbones minerales, dado que en los primeros el 90% de las partículas tiene un tamaño de partícula menor a 100 µm aproximadamente, mientras que para los carbones minerales, tal valor es superior a 200 µm. Así mismo, el tamaño medio de las partículas en los carbones vegetales es de 17 µm y de 63 µm y 70 µm para los carbones minerales. Tal diferencia puede

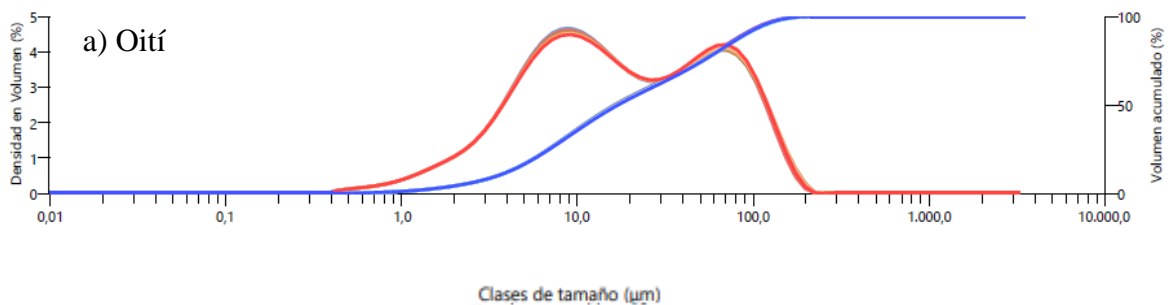
relacionarse con la baja densidad y la alta fragilidad de los carbones vegetales, lo que facilitó su conminución.

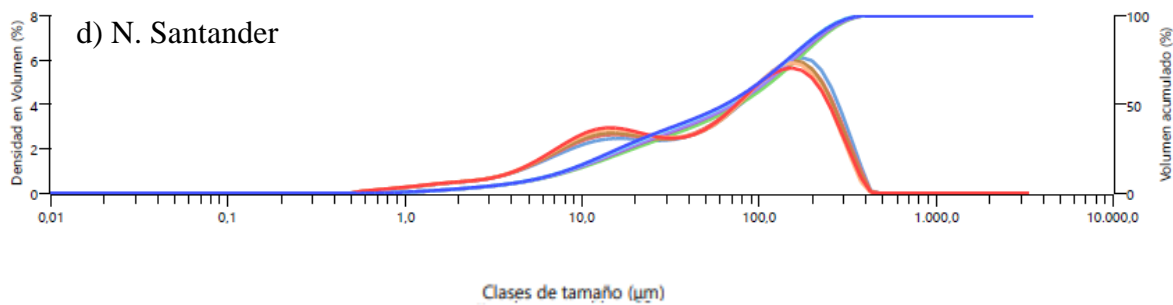
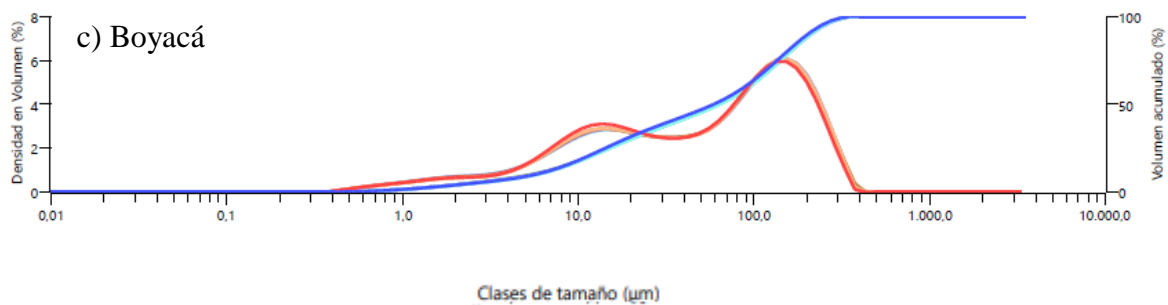
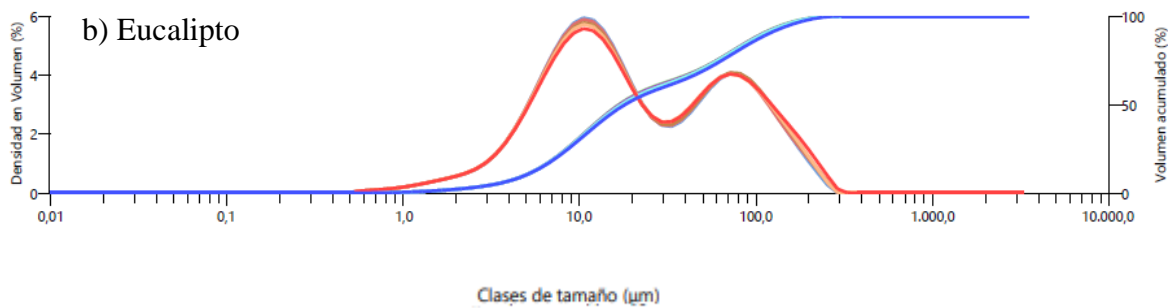
Figura 3. Parámetros característicos (d_{10} , d_{50} y d_{90}) de las distribuciones de tamaños de partículas en los carbones



En la Figura 4 se comparan las curvas de distribución de tamaño de partículas de los carbones. Se observa que para todos los casos los histogramas son bimodales, es decir que la mayor parte de las partículas se encuentran en dos rangos de tamaños de partículas, centrados aproximadamente en valores de 10 µm y 80 µm para los carbones vegetales y en valores de 15 µm y 170 µm para los carbones minerales. No obstante, en los carbones minerales prevalecen las partículas gruesas a las finas, caso contrario ocurre en los carbones vegetales.

Figura 4. Distribuciones de tamaños de partículas en los carbones.





4.2. OBTENCIÓN DE AGLOMERADOS EN DISCO PELETIZADOR

4.2.1 Análisis de los aglomerados bajo condiciones de fabricación. En la Tabla 3 se comparan las condiciones de tiempo de aglomeración y cantidad de aceite requerido para la formación de los aglomerados en el disco peletizador.

Tabla 3. Condiciones requeridas para la obtención de los aglomerados en disco peletizador.

Tipo de carbón	Tiempo de aglomeración (min)	Cantidad de aceite agregado (ml)	Masa de carbón agregada (gr)
Oití	19	54.5	70
Eucalipto	20	53	70
Boyacá	15	47	70
Norte de Santander	15	44	70

Estos resultados indican que para la aglomeración de los carbones minerales se requiere menor tiempo y menor cantidad de aceite que para los carbones vegetales, lo cual se puede explicar por las diferencias en las distribuciones granulométricas discutidas anteriormente. Es así que la naturaleza frágil y la baja densidad de los carbones vegetales conlleva a la obtención de un material particulado mucho más fino que con los carbones minerales, y para una misma cantidad de carbón alimentado al disco peletizador, se tiene un número de partículas y un área superficial de estas mucho mayor en los carbones vegetales con respecto a los carbones minerales; por tanto, es lógico que para los primeros se requiera mayor cantidad de aceite para humedecer y aglomerar las partículas, así mismo se requiere mayor tiempo para tal proceso. Los resultados también pueden relacionarse con la presencia de material bituminoso en los carbones minerales y su ausencia en los carbones vegetales [4], dado que el bitumen le aporta untuosidad al carbón.

En la Tabla 4 se presentan algunos parámetros que relacionan las cantidades de carbón y aceite presentes en los aglomerados formados. Se debe aclarar que no todos los aglomerados formados con cada carbón cumplieron con los requisitos de tamaño 0.5 mm a 1.5 mm necesarios para la recuperación de oro mencionados en el apartado, motivo por el cual en la tabla la masa de aglomerados no corresponde a la suma de las masas de carbón y aceite.

En la siguiente tabla se muestran las relaciones carbón-aceite empleados en la fabricación de los aglomerados:

Tabla 4. Relación carbón-aceite en la fabricación de aglomerados.

Parámetros	Oití	Eucalipto	Boyacá	Norte de Santander
Masa carbón (gr)	70	70	70	70
Masa aceite (gr)	54,58	53,18	46,9	44,17
Masa aglomerados (gr)*	64,2	85,8	66,4	59,6
N° de pellets	136	163	100	134
% Carbón en pellets	56,19	56,82	60,98	61,233
% Aceite en pellets	43,81	43,18	39,02	38,767
Masa carbón en pellets (gr)	36,074	48,75	40,5	36,5
Masa aceite en pellets (gr)	28,126	37,05	25,9	23,1

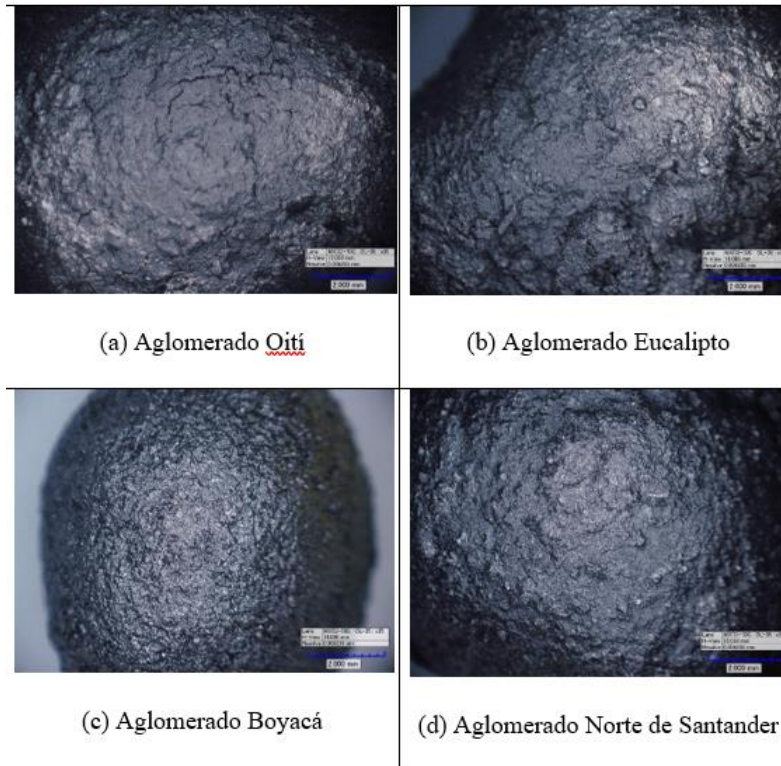
*Masa de aglomerados que cumple con el requisito de tamaño (0.5mm -1.5mm)

Tales resultados no señalan que con alguno de los dos tipos de carbones se obtiene un mayor rendimiento con relación a la formación de los aglomerados con el tamaño requerido para el proceso CGA, dado que para el carbón vegetal Oití y el mineral Norte de Santander, el rendimiento tanto del carbón como del aceite es cercano al 50%, mientras que para el carbón vegetal Eucalipto los rendimientos de carbón y aceite son de aproximadamente 70%. Por su parte, la aglomeración del carbón mineral Boyacá implicó rendimientos del 58% y 55% para el carbón y el aceite respectivamente.

4.2.2 Análisis microscópico de los aglomerados. En la Figura 5 se presentan las micrografías tomadas a 35x sobre la superficie de los aglomerados. Las principales diferencias observadas entre los aglomerados corresponden a una mayor presencia de grietas superficiales en los aglomerados obtenidos con los carbones vegetales, así como una

superficie más rugosa en los aglomerados obtenidos con los carbones minerales, esto último debido a la presencia de mayor cantidad de partículas gruesas en tales carbones.

Figura 5. Micrografías a 35 X de la superficie de los cuatro tipos de aglomerados.



Las micrografías del interior de los aglomerados (cortes transversales) se presentan en las figuras 6 y 7, las cuales fueron tomadas a 35x y 140x, respectivamente. Las micrografías de la Figura 6 evidencian que los aglomerados obtenidos con los carbones minerales son más densos que aquellos obtenidos con los carbones vegetales, dada la mayor prevalencia de grietas en estos últimos. Con un mayor acercamiento de las superficies (Figura 7) se pone de manifiesto que las grietas presentes en los aglomerados están ocupadas por el puente líquido (aceite), lo que le podría aportar cohesión a las partículas y resistencia a los aglomerados a pesar del gran agrietamiento.

Durante la etapa de extracción del oro, las grietas presentes en los aglomerados pueden tener un efecto favorable en la retención de las partículas del metal precioso, dado que estas pueden migrar desde la superficie hasta el interior del aglomerado a través de dichos defectos.

Figura 6. Micrografías a 35 X de los cortes transversales de los aglomerados.

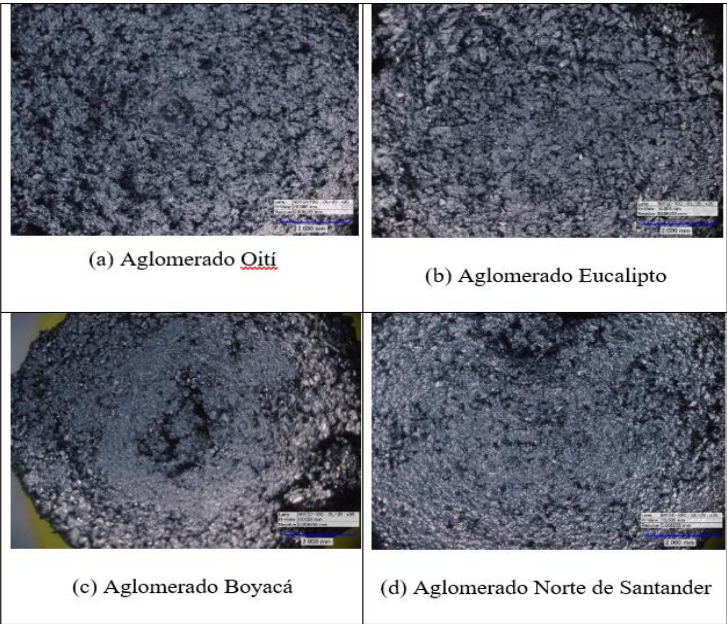
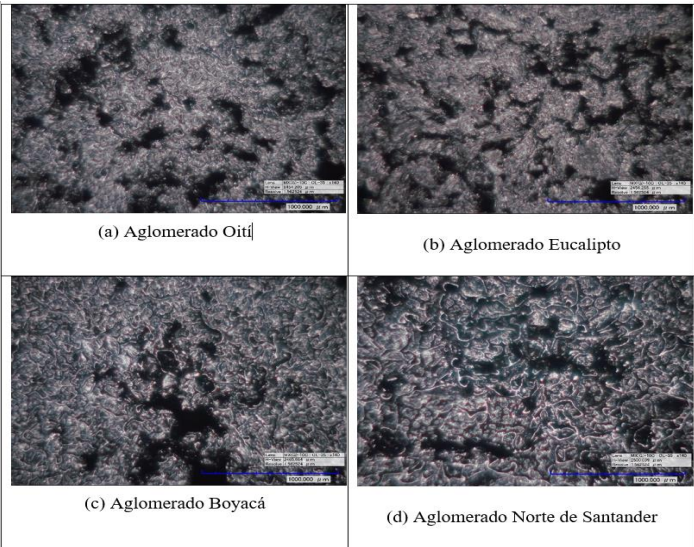


Figura 7. Micrografías a 140 X de los cortes transversales de los aglomerados.



Las anteriores micrografías permiten concluir que los aglomerados obtenidos con el carbón Norte de Santander son los más compactos o densos, seguido por los aglomerados obtenidos con el carbón Boyacá, mientras que los carbones vegetales, en especial Oití, generaron los aglomerados con mayor agrietamiento.

Figura 8. Mapa 3D corte transversal de los carbones

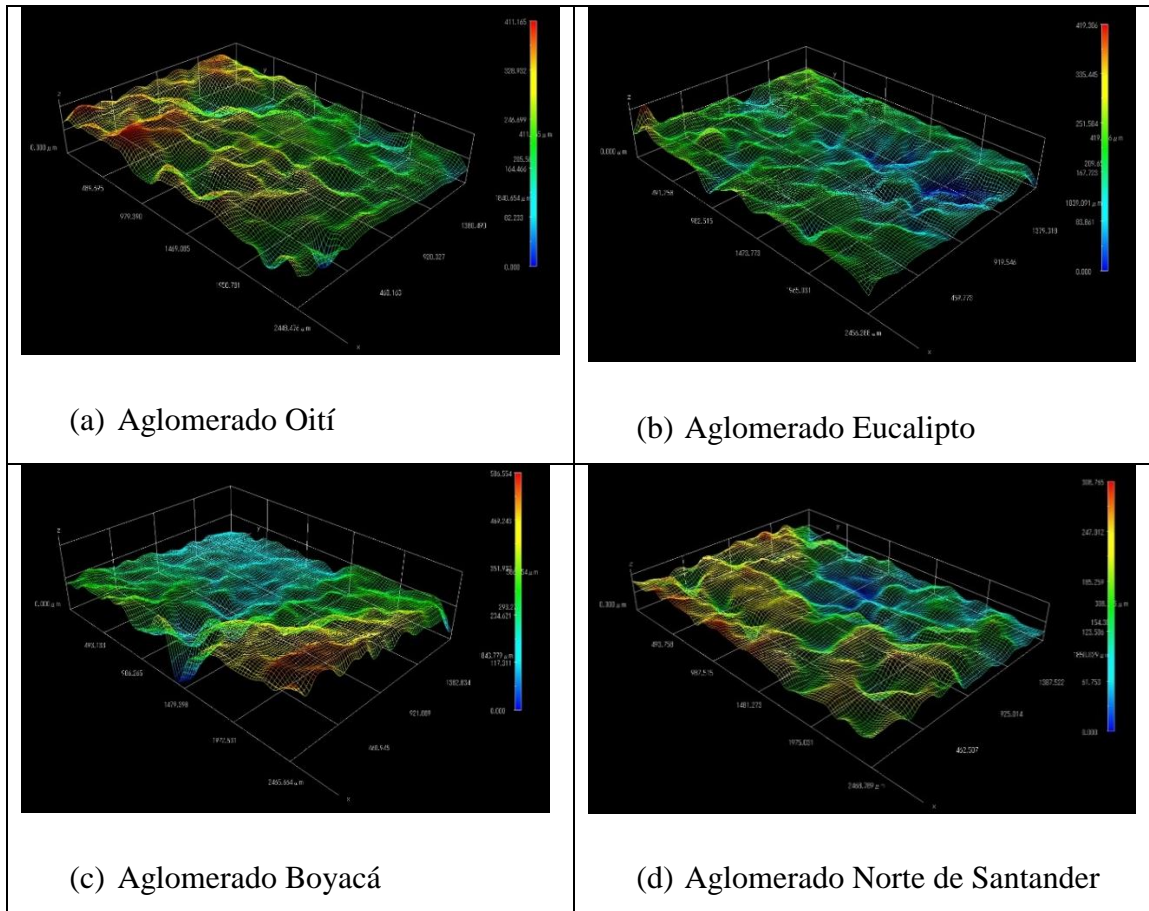
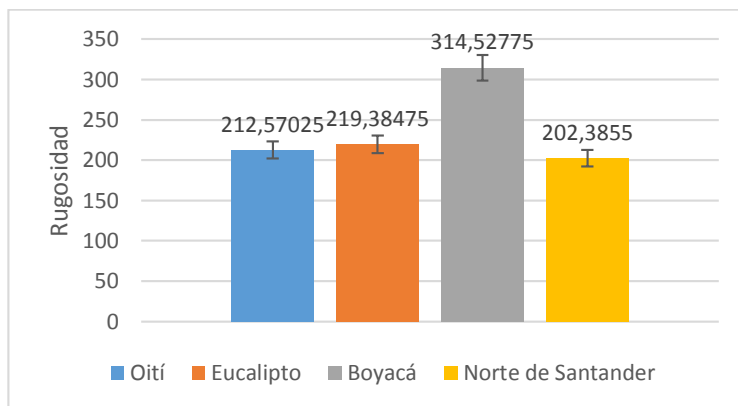


Figura 9. Rugosidad de los carbones.



En la Fig 8. Podemos ver que en la micrografía hay una escala de colores de guía donde se indica que el color rojo significa un pico de máximo de altura, el color azul significa un mínimo de altura y el verde un punto medio. Se determinó que el carbón de Norte de Santander fue el menos rugoso puesto que en la Fig (d) se observa mayor cantidad de color verde, amarillo y celeste que en los demás, seguido por el eucalipto que tiene una vasta zona verde pero un mínimo muy pronunciado en azul oscuro, muy parecido al Oití pero este posee dos picos máximos de color rojo muy pronunciados y por último el carbón de Boyacá que posee máximos y mínimos muy pronunciados siendo este el más rugoso.

4.2.3 Resistencia a la caída de los aglomerados. La resistencia mecánica de los aglomerados se evaluó mediante pruebas de resistencia a la caída a una altura de 48 cm, los resultados obtenidos se aprecian en la Tabla 5. Dada la variabilidad en el tamaño de los aglomerados, se realizaron mediciones a los aglomerados más pequeños, más grandes y con tamaño medio.

Tabla 5. Tamaño y resistencia a la caída de los aglomerados de los cuatro tipos de carbón.

Tipo de Carbón	Tamaño del Aglomerado (cm)	Número de caídas
Oití	0.6	> 100
	0.9	> 100
	1.4	> 100

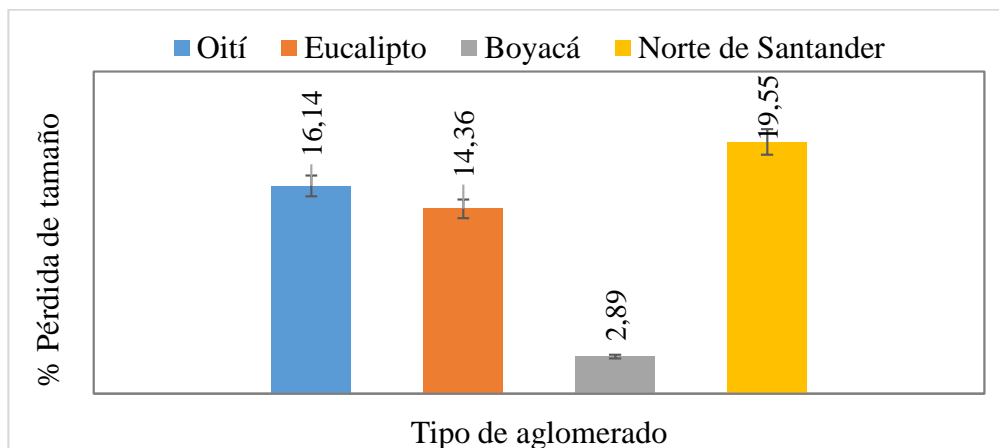
Eucalipto	0.5	> 100
	0.7	> 100
	1.3	> 100
Boyacá	0.6	> 100
	1.2	> 100
	1.5	> 100
Norte de Santander	0.7	> 100
	0.9	> 100
	1.5	> 100

Los aglomerados de los cuatro tipos de carbón soportaron más de 100 caídas, lo que sugiere que todos tienen la resistencia suficiente para su aplicación en el proceso CGA para la recuperación de oro [7]

4.2.4 Resultados de las pruebas de pérdida de tamaño de los aglomerados. El objetivo de estos ensayos fue corroborar que los aglomerados tienen la resistencia adecuada para soportar los esfuerzos cortantes y golpes que se producen durante su puesta en contacto con la pulpa mineral para la extracción del oro, bajo condiciones de agitación mecánica.

➤ **Pérdida de tamaño de los aglomerados.** Los resultados se muestran en la Figura 8. Se observa que los aglomerados de los carbones minerales presentan la mínima y máxima variación de tamaño, alcanzándose valores de 3% y 20% para los aglomerados de los carbones de Boyacá y Norte de Santander. Por su parte, las variaciones de tamaño alcanzadas para los aglomerados de los carbones Oití y Eucalipto fueron 16% y 14%.

Figura 10. Porcentaje de pérdida de tamaño de los aglomerados por su agitación en una pulpa mineral



➤ **Pérdida de redondez de los aglomerados.** En el Anexo J se presentan algunas de las imágenes de los aglomerados analizados con el software Digimizer y que permitieron la determinación de su redondez. Por su parte, en la Tabla 6 se presentan los valores de pérdida de redondez de los aglomerados por efecto de los choques dentro del tanque de agitación de la pulpa mineral. Se observa que los aglomerados de los carbones minerales tienen una morfología un poco más esférica que los obtenidos con los carbones vegetales, sin embargo, luego de su agitación en la pulpa, los aglomerados de los carbones vegetales son los que pierden en menor grado su redondez, tales pérdidas fueron sólo de 0.7% y 0.4% para los aglomerados Oití y Eucalipto, respectivamente. Tales resultados indicarían que estos aglomerados son más estables o resistentes que los obtenidos con los carbones minerales, lo cual parece que contradecir los resultados microscópicos que evidenciaron una mayor presencia de separaciones o grietas en los aglomerados de los carbones vegetales.

Tabla 6. Porcentaje de pérdida de redondez de los aglomerados antes y después del proceso de contactación.

CARBÓN	%Redondez antes	% Redondez después	% Pérdida de redondez
Oití	80,636	80,035	0,745
Eucalipto	80,283	79,965	0,397
Boyacá	83,806	82,253	1,853
Norte de Santander	83,477	81,403	2,486

En esta prueba se determina una característica física de los diferentes carbones después de salir del disco peletizador para luego ser aplicado en el proceso de contactación. Se puede apreciar en la tabla 6, la cual muestra que los carbones minerales (Boyacá y Norte de Santander) poseen mejor porcentaje de redondez con un 83,806% y 83,477% para el carbón de Boyacá y Norte de Santander respectivamente, mientras que los carbones vegetales con un 80,636% y 80,283% para los carbones vegetales Oití y Eucalipto respectivamente. Aplicado el proceso de agitación mecánica los carbones que mejor tuvieron comportamiento fueron los vegetales al tener menores pérdidas de redondez.

En el Anexo J se observa la forma y redondez de los aglomerados de los 4 tipos de carbones; los que presentaron mejor redondez y esfericidad fueron los aglomerados de carbón mineral de Boyacá, esto está relacionado con las pruebas realizadas previamente de comportamiento de los aglomerados y según las pruebas de recuperación al ser el más efectivo, se puede afirmar que está relacionado con la recuperación de oro.

➤ **Supervivencia de los aglomerados.** Los aglomerados tienen que poseer buena resistencia mecánica y supervivencia (no destrucción) durante su contacto con la pulpa mineral para garantizar efectividad en el proceso extractivo, ya que sobre su superficie se adhieren las partículas de oro. En la Tabla 7 se recogen los datos relacionados con la supervivencia de los aglomerados luego de su puesta en contacto con la pulpa mineral.

Tabla 7. Supervivencia de los aglomerados en relación con su masa.

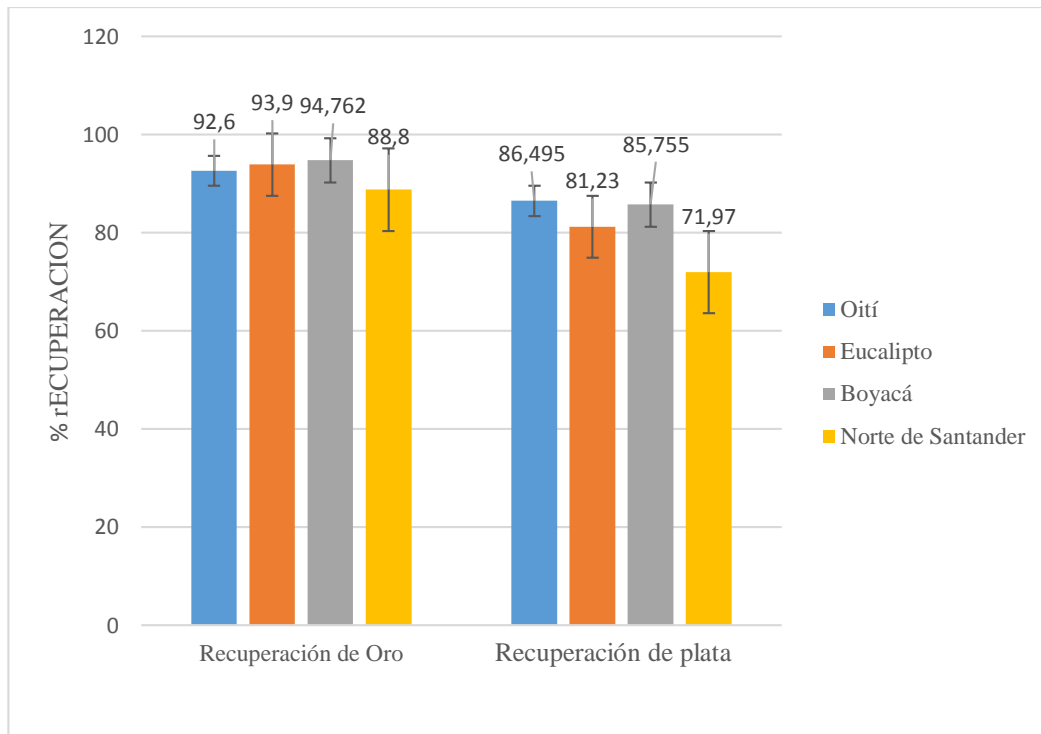
	Oití	Eucalipto	Boyacá	Norte de Santander
No. Pellets iniciales	108	109	82	116
Masa pellets iniciales (g)	50,26	50,06	50,01	49,98
No. Pellets finales	114	117	82	116
Masa de pellets finales (g)	48,77	49,03	48,07	48,53
% supervivencia	105,5	107,34	100	100

De acuerdo con los resultados presentados en la anterior tabla, se puede concluir que todos los aglomerados tuvieron un grado de supervivencia satisfactorio, es decir que tienen la resistencia mecánica adecuada para soportar los esfuerzos actuantes en el interior del tanque de agitación de pulpa mineral. No obstante, lo anterior, los resultados también señalan que los aglomerados de los carbones minerales tienen un grado de supervivencia del 100%, sin variación en el número de pellets. Por su parte, para los aglomerados de carbones vegetales se encontró que su supervivencia fue superior al 100%, lo que en realidad indica que algunos de los aglomerados se dividieron aumentando así el número de pellets durante su agitación con la pulpa mineral. Estos resultados se pueden relacionar con el mayor contenido de grietas y aceite en los aglomerados de carbón vegetal, lo que les confiere un carácter dúctil o plástico, de tal forma que, aunque las fuerzas al interior del tanque de agitación logren la división de tales aglomerados, no ocurre su desintegración. Tal ductilidad de estos aglomerados también explica los resultados de redondez anteriormente mencionados, ya que durante la agitación en medio acuoso se favorece la aglomeración esférica de los pellets de carbón vegetal y no así su desintegración.

4.3. APLICACIÓN DEL PROCESO CGA

Para finalizar la experimentación, se procedió a evaluar la efectividad de los aglomerados para la recuperación de oro desde un mineral aurífero. Los resultados presentados en la Figura 9 indican que la recuperación de oro no es significativamente influenciada por el tipo de carbón a partir del cual se fabricaron los aglomerados, tal es así que las recuperaciones de oro fueron 93%, 94%, 95% y 89% para los aglomerados de los carbones Oití, Eucalipto, Boyacá y Norte de Santander, respectivamente. Así mismo las recuperaciones de plata fueron 86%, 81%, 86% y 72% para tales aglomerados. Adicionalmente al comparar tales recuperaciones con las alcanzadas en un trabajo de grado previo en el que se utilizaron aglomerados obtenidos en medio acuoso, se podría concluir que los aglomerados desarrollados con la modificación planteada en este trabajo de grado son más efectivos para la recuperación de los metales preciosos desde el mismo mineral, ya que las recuperaciones obtenidas en dicho trabajo fueron 73% Au y 71% Ag [12]

Figura 11. Valores de recuperación de oro y plata por el proceso CGA implementando los aglomerados obtenidos es disco peletizador



A partir de estos resultados se concluye que la modificación propuesta en esta investigación relacionada con la formación de los aglomerados carbón-aceite en disco peletizador, sin uso de agua, es efectiva para generar pellets aptos para la recuperación de metales preciosos de sus minerales a través del proceso CGA, fortaleciéndose así el reconocimiento de esta tecnología como “verde” o “amigable con el medio ambiente”.

5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el presente proyecto permiten concluir lo siguiente:

- A diferencia de la aglomeración en medio acuoso, la aglomeración de carbón con aceite en disco peletizador y en ausencia de agua es posible independientemente del origen (mineral o vegetal) y de las características fisicoquímicas (% carbono, % volátiles, % cenizas, etc.) de la materia prima carbonosa.
- Los requerimientos de adición de aceite al carbón para su aglomeración en disco peletizador son dependientes del tipo de carbón y/o de sus características fisicoquímicas, de tal forma que los carbones vegetales necesitan mayor cantidad de aglomerante que los carbones minerales, debido a factores tales como ausencia de material bituminoso, mayor finura y área superficial de las partículas que requiere lubricación.
- A pesar de que los aglomerados obtenidos con los carbones vegetales presentaron un alto grado de grietas o separaciones en su interior, su resistencia mecánica es suficiente para soportar los esfuerzos a los que son expuestos durante la etapa de contacto con la pulpa mineral para la extracción del oro. El mayor contenido de aceite en tales aglomerados les aporta ductilidad, evitando así que estos se desintegren.
- La recuperación de oro a través del proceso CGA con los aglomerados desarrollados en disco peletizador no depende del tipo de carbón a partir del cual se hayan obtenido los aglomerados, alcanzándose recuperaciones de oro de 93% y 95% con los carbones vegetales y de 95% y 89% con los carbones minerales. Recuperaciones comparables e incluso superiores a las alcanzadas con aglomerados desarrollados por el método tradicional en medio acuoso.
- Finalmente, se concluye que la modificación propuesta en esta investigación relacionada con la formación de los aglomerados carbón-aceite en disco peletizador, sin uso de agua, es efectiva para generar pellets aptos para la recuperación de metales preciosos de sus minerales a través del proceso CGA, con lo cual se fortalece el carácter “verde” de dicho proceso.

6. RECOMENDACIONES

- Se recomienda continuar la investigación aplicando otros carbones vegetales, obtenidos a partir de maderas como arce, castaño de indias o Paulownia que poseen un rápido crecimiento, favoreciendo la sostenibilidad del proceso.
- Profundizar en el efecto que tiene la granulometría de los materiales carbonosos en las propiedades de los aglomerados y en su eficiencia en la recuperación del oro.
- Hacer del proceso un sistema secuencial de tal manera que en el segundo ciclo se pueda recuperar el 100% de los metales preciosos.
- Implementar mineral de mina pero implementando un análisis gravimétrico previo al proceso CGA.

7. REFERENCIAS

BELTRAN O, Cinda; ESTRADA, Napoleón J. y RACHOR, Frank E. Recuperación de oro por flotación de aglomerados carbón vegetal - diesel oil. Tesis de pregrado. Universidad Técnica de Oruro. La paz, 2001.

CALVEZ, J. P. S.; KIM, M. J., WONG, P. L. M., & TRAN, T. Use of coal-oil agglomerates for particulate gold recovery. *Minerals Engineering*, 1998. 11(9), 803-812.

CILINGIR, Y., & SEN, S. An investigation on the effects of ore grade and particle-liberation size in gold recovery by coal-oil-gold agglomerate flotation. In *Developments in Mineral Processing*. Elsevier. 2000. (Vol. 13, pp. C8a-6).

CÓRDOBA, Elcy Maria. Recuperación de oro particulado con aglomerados carbón-aceite: una tecnología limpia en la extracción de oro, tesis de maestría. Universidad Industrial de Santander, 1998.

HINOJOSA, Carlos; MONTOYA, Daniel y PINZÓN, David. Aplicación del proceso cga a minerales auríferos oxidados: establecimiento de los parámetros metalúrgicos de interés. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2017.

HOUSE, C.; TOWNSEND, I., VEAL, C. Flotation as a separation technique in the coal gold agglomeration process (GCA) process, *International Mining*, 1988.

MARCIANO ACOSTA, L.S. y LINS, F.F. Utilisation of coal oil agglomerates to recover gold particles. *Miner Eng.* 1994. 7(11): 401-409.

NIÑO P., Yuri V. & PEÑA, S. Linda K. Estudio de las principales variables de formación de aglomerados de carbón y aceite para la recuperación de oro por el proceso CGA a partir de un mineral aurífero colombiano. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2015.

OLARTE P. Yesid. & PEÑALOZA T. Lizeth. Implementación de técnicas alternativas a la tostación de los aglomerados carbón-aceite para la recuperación de oro mediante el proceso CGA. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2015.

ORTÍZ F, Laura Milena. Estudio de algunos parámetros geometalúrgicos de minerales auríferos de aluvión y su efecto sobre el proceso de aglomeración de oro con carbón y aceite (CGA). Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2018.

QUINTERO C, Richard y CADENA G, Álvaro. Obtención de esferoides de materiales carbonosos mezclados con aceite vegetal en disco peletizador, para ser utilizado en un proceso de recuperación de oro (proceso CGA). Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2018.

SIERRA, Joel D. & RUIZ, Víctor A. 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. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2017.

VOGEL, E y WOLF F. Manual para la producción de carbón vegetal con métodos simples. México, 1985

ANEXOS

ANEXO A. Tablas de caracterización química y mineralógicamente en mediante las técnicas de Fluorescencia (FRX) y Difracción de rayos X (DRX)

- **Resultados obtenidos por FRX**

Elemento	Mineral Bagre
Fe	3.55%
S	0.12%
Si	36.09%
Al	2.33%
K	1.40%
As	33mg/Kg
Mg	0.05%
Ti	0.43%
P	0.19%
Zn	59 mg/Kg
Ca	5.00%
Mn	-
Cu	0.02%
Zr	6 mg/Kg
Cr	0.02%
Ni	37 mg/Kg
Ag	0.06%
Co	-
Sr	8 mg/Kg
V	-
Na	0.05%
Ba	-
Nb	-

- Fases cristalinas presentes en los minerales identificados por DRX.

Fase Cristalina	Fórmula Química
Cuarzo alfa	SiO ₂
Zircón	ZrSiO ₄

Ilmenita	$\text{Fe}^{2+}\text{Ti}^{4+}\text{O}_3$
Ilmenita alfa	$\text{Fe}^{2+}\text{Ti}^{4+}\text{O}_3$
Hematita alfa	Fe_2O_3
Magnetita	$\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4$
Moscovita-2MI	$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$
Microclina	KAlSi_3O_8
Clinicloro - I MIIB	$(\text{Mg},\text{Fe}^{2+})_5\text{Al}((\text{OH})_8/\text{AlSi}_3\text{O}_{10})$
Magnesiohornblenda	$(\text{Ca}_2 [\text{Mg}_4(\text{Al},\text{Fe}^{3+})$
Cristobalita	SiO_2

Fuente: ORTÍZ FONSECA, LAURA MILENA. Estudio de algunos parámetros geometalúrgicos de minerales auríferos de aluvión y su efecto sobre el proceso de aglomeración de oro con carbón y aceite (CGA). [12]

ANEXO B. Imagen del disco peletizador AGMD DG631171 y los aglomerados formados.



ANEXO C. Gráfico de la producción del carbón vegetal.



ANEXO D. Colector AEROFLOAT 208 PROMOTER



ANEXO E. Procedimiento matemático para el análisis de los carbones.

- **Porcentaje de humedad.**

Se pesa un gr de muestra de carbón, se mete en la estufa a una temperatura de 107 °C durante 60 minutos.

$$\%HUMEDAD = \frac{P2 - P3}{P2 - P1} \times 100\%$$

Donde:

P1: Peso del crisol [gr]

P2: Peso del crisol + peso de la muestra de carbón antes del secado [gr]

P3: Peso del crisol + peso de la muestra de carbón después del secado [gr]

- **Porcentaje de cenizas**

Se pesa 1 gr de muestra de carbón y se mete en la mufla a una temperatura de 850 °C durante 60 minutos

- $\%CENIZA = \frac{P2-P3}{P2-P1} \times 100\%$

Donde:

P1: Peso del crisol [gr]

P2: Peso del crisol + peso de la muestra de carbón [gr]

P3: Peso del crisol + peso de la ceniza [gr]

- **Porcentaje de materia volátil**

Se pesa 1 gr de muestra de carbón y se mete a la mufla a una temperatura de 910 °C durante 60 minutos.

$$\%MATERIA VOLATIL = \frac{(P2 - P3) - P2 \times \frac{\%H2O}{100}}{P2} \times 100\%$$

Donde:

P1: Peso del crisol [gr]

P2: Peso del crisol + peso de la muestra de carbón [gr]

P3: Peso del crisol + peso de la muestra de carbón sin materia volátil [gr]

- **Poder calorífico**

$$Q = \frac{\Delta T * C * (e1 + e2 + e3)}{m}$$

Donde:

ΔT : Incremento de la temperatura, $T_i - T_f$ [°C]

C: Capacidad térmica del calorímetro [5088,366 BTU/lb*gr/°C]

m: Peso de la muestra [gr]

e1: Calor de combustión de algodón 7524 * peso del algodón usado [gr], (BTU/lb)* gr

e2: Calor de combustión del alambre Ni-Cr, (0,41*alambre quemado [mm]), (BTU/lb)* gr

e3: calor de formación del ácido sulfúrico = 10* ml de Na₂CO₃ (0.394N) usados, (BTU/lb)* gr

- **Porcentaje de azufre**

Se pesa 1 gr de muestra de carbón y se aplica la siguiente relación después del procedimiento de la bomba calorimétrica

$$\%AZUFRE = \frac{(A - B) * 13,738}{m}$$

Donde:

A: BaSO₄ pesado en la determinación.

B: BaSO₄ pesado en el blanco [0,000624 gr]

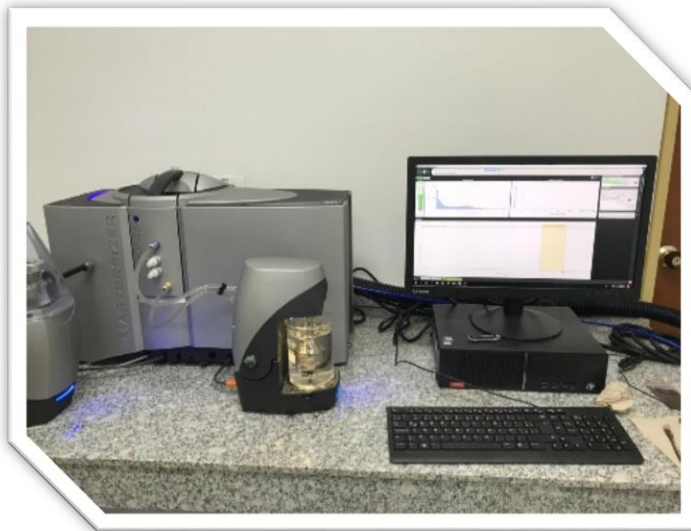
m: Peso de la muestra [gr]

- **Porcentaje de carbono fijo**

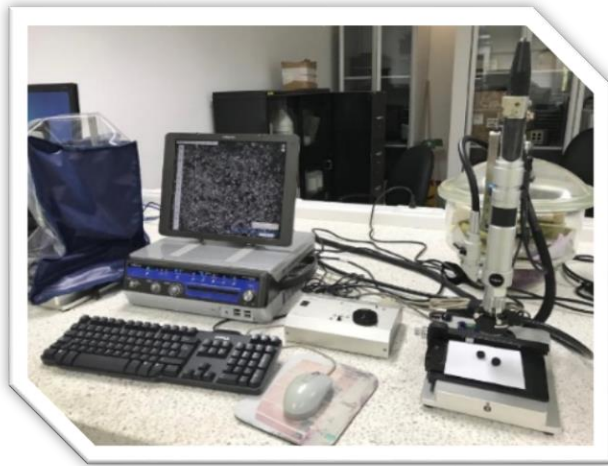
Utilizando la siguiente relación:

$$CF=100\% - (\% H + \% C + \% MV)$$

ANEXO F. Analizador de partículas MASTERSIZER 3000 HYDRO.



ANEXO G. Microscopio Digital Kh-7700.



ANEXO H. Cálculos de las pruebas mecánicas hechas a los aglomerados.

- Cálculo del porcentaje de pérdida de tamaño:

$$\% \text{ Pérd. tamaño} = \frac{d_{80} \text{ final}}{d_{80} \text{ inicial}} * 100$$

- Cálculo del porcentaje de disminución de la redondez par cada material carbonoso:

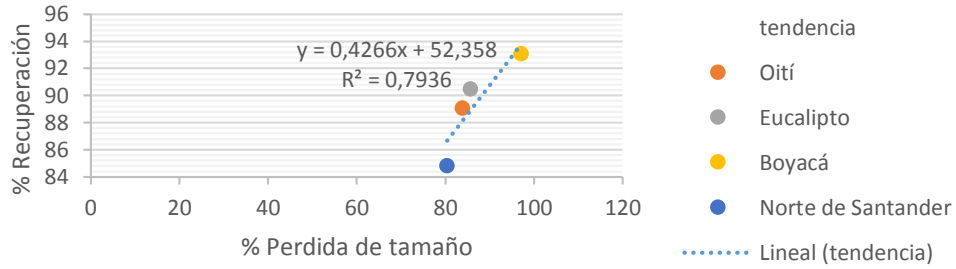
$$\% \text{ Dism. redondez} = \left(1 - \frac{\text{Redondez inicial} - \text{Redondez final}}{\text{Redondez inicial}} \right) * 100$$

- Cálculo del porcentaje de supervivencia:

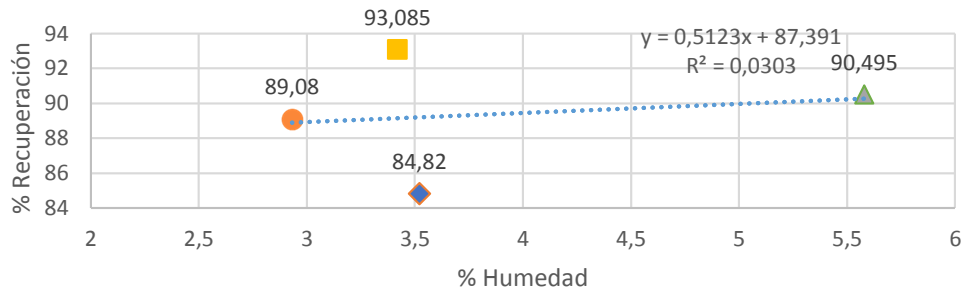
$$\% \text{ Supervivencia} = \left(\frac{N^{\circ} \text{ de pellets iniciales} - N^{\circ} \text{ de pellets destruido}}{N^{\circ} \text{ de pellets iniciales}} \right) * 100$$

ANEXO I. Gráficas de porcentaje de recuperación de oro vs propiedades de los carbones

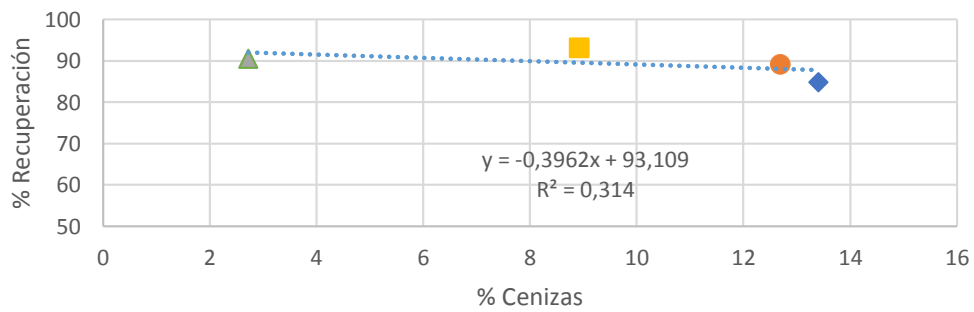
% Recuperación vs % Perdida de tamaño

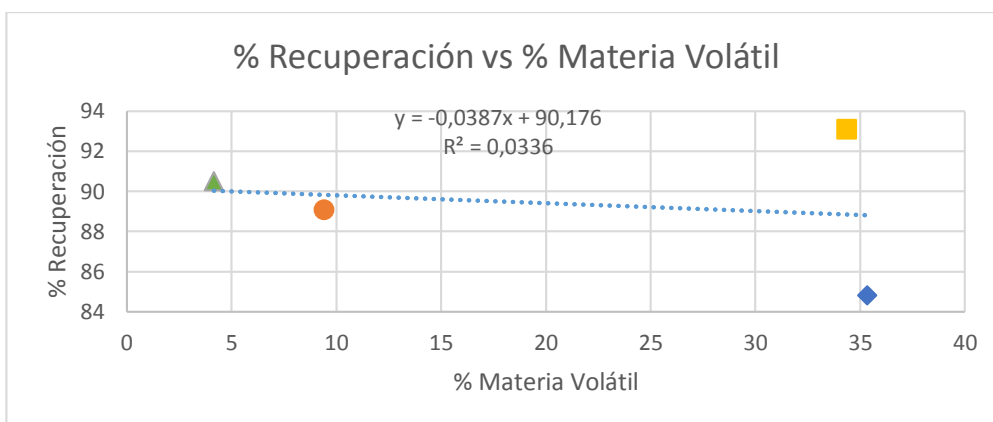
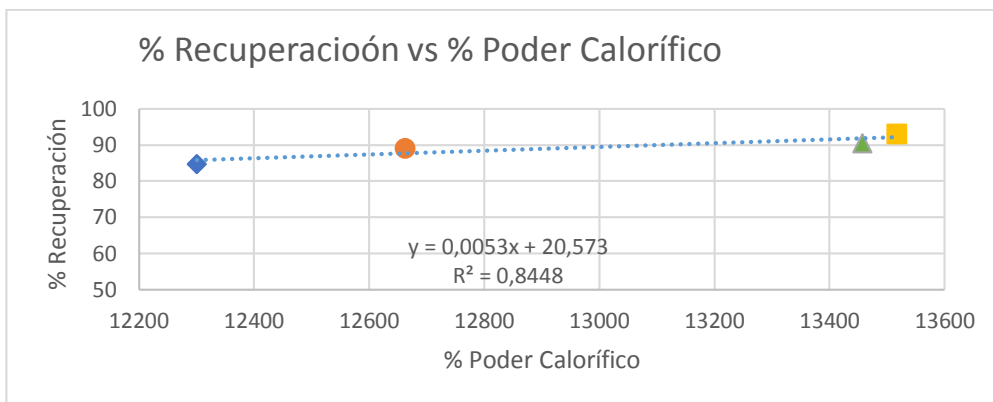
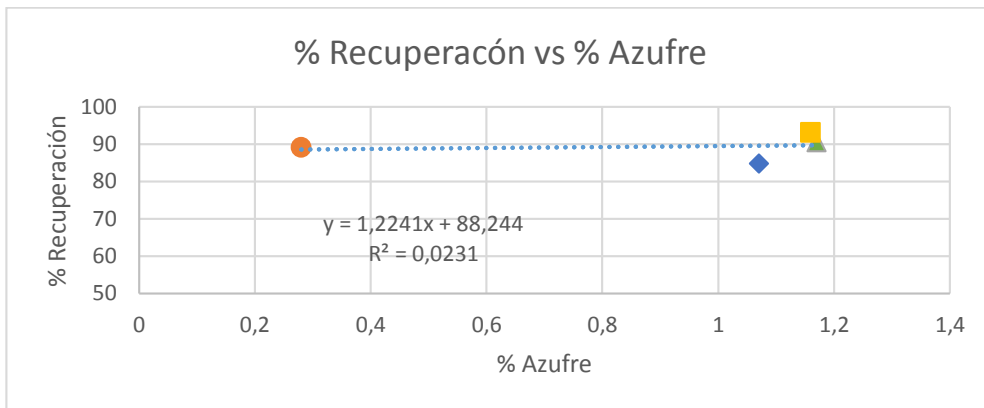


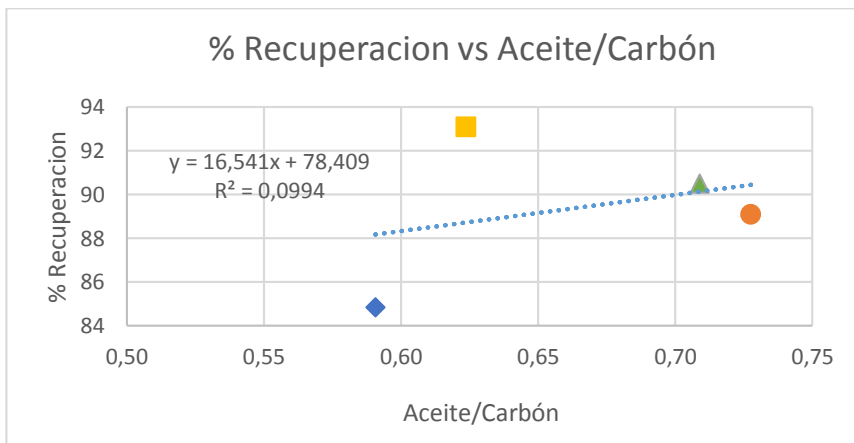
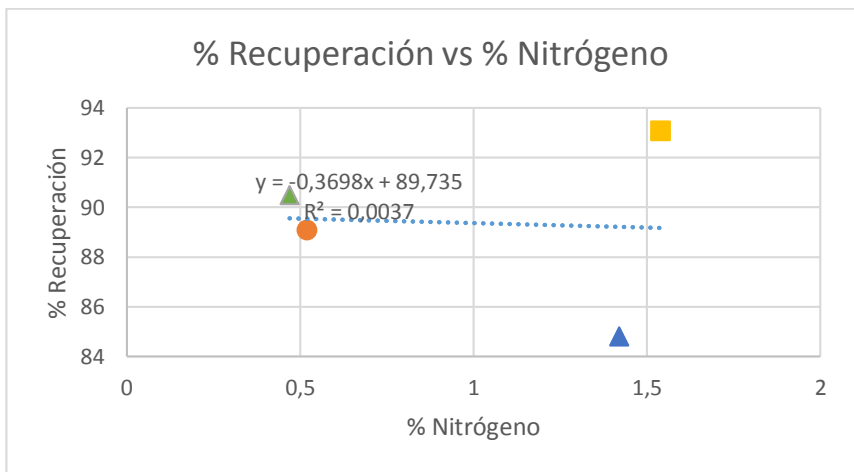
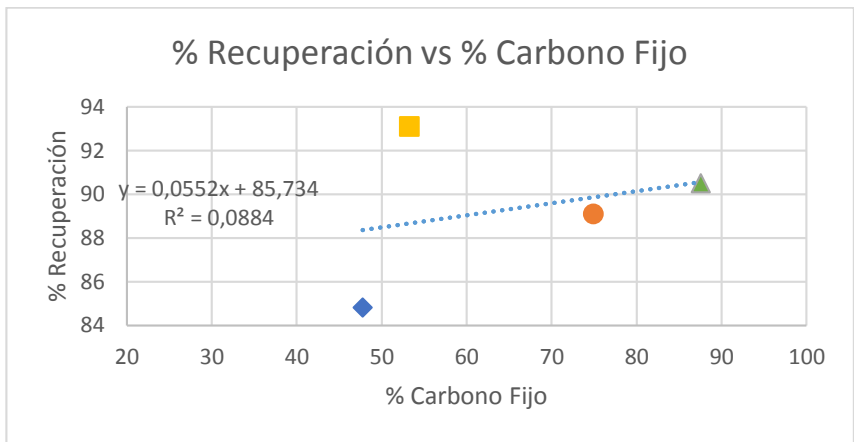
% Recuperación vs % Humedad



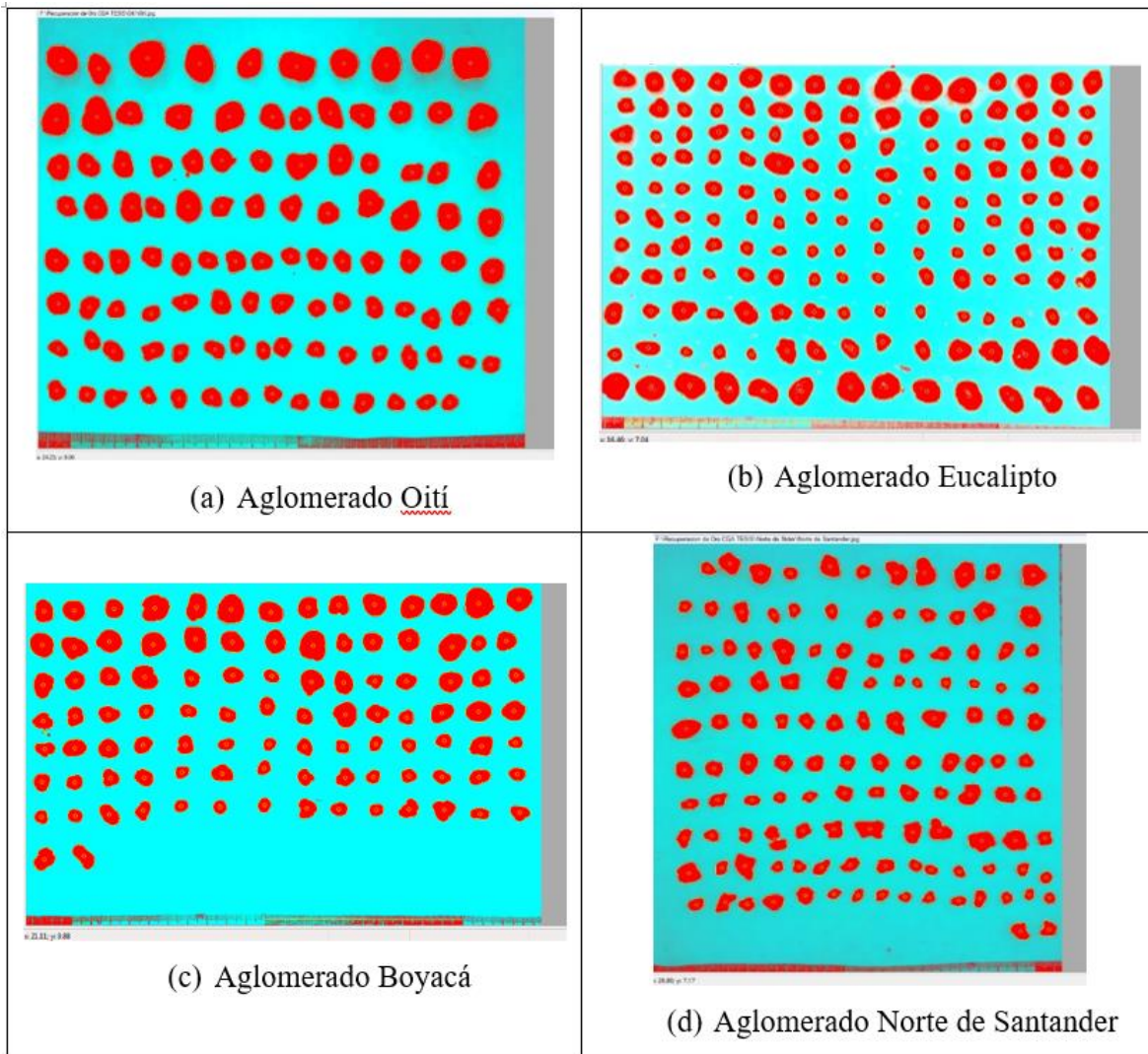
% Recuperación vs % Cenizas







ANEXO J. Imagen de la redondez de los aglomerados analizados por Digimizer.



ANEXO K. Tablas desviaciones estándar de los resultados.

%	Oití	Eucalipto	Boyacá	Norte de Santander
Volátiles	0,368	0,240	0,339	0,948
Humedad	0,071	0,085	0,078	0,339
Cenizas	0,374	0,382	0,014	0,042

Azufre	0,014	0,021	0,028	0,035
Poder Calorífico	0,156	0,212	0,127	0,665

Desviación estándar de caracterización de carbones.

Parámetros	Oití	Eucalipto	Boyacá	Norte de Santander
Masa de aceite	1,4142	0,0283	0,9617	0,2051
Tiempo de Aglomeración	0,7638	1,0408	0,7638	0,7638

Desviación estándar de fabricación de aglomerados

Distribución de Tamaño	Oití	Eucalipto	Boyacá	Norte de Santander
d10	0,0022839	0,0108127	0,1816785	0,0154127
d50	0,3524564	0,5041656	1,8925348	5,0285229
d90	1,4917628	3,6845291	3,2685293	9,0629512

Desviación estándar en distribución de tamaño de los carbones.

Parámetros	Oití	Eucalipto	Boyacá	Norte de Santander
Pérdida de Tamaño	1,0898474	2,1117283	1,5816273	0,9516374
Redondez	0,5767878	0,3688711	0,7895435	1,3757991

Desviación estándar de pérdida de tamaño y redondez de los aglomerados.

Aglomerados	Recuperación de oro (Au)	Recuperación de plata (Ag)	Recuperación de oro-plata (Au+Ag)
Oití	0,424264069	6,229610742	1,046518036
Eucalipto	0,848528137	7,990306627	1,916259377
Boyacá	1,892217746	5,409366876	0,502045815
Norte de Santander	0,282842712	5,232590181	1,668772004

Desviación estándar de recuperación de oro, plata y oro-plata