

Universidad del Valle de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Química, Química Industrial y  
Biotecnología Industrial



## **Pirólisis de residuos de café para obtención de carbón activado a nivel laboratorio**

Trabajo de graduación presentado por  
Pedro Miguel Estévez De León  
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Química  
Industrial

Guatemala,  
2024



Universidad del Valle de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Química, Química Industrial y  
Biotecnología Industrial




## **Pirólisis de residuos de café para obtención de carbón activado a nivel laboratorio**

Trabajo de graduación presentado por


**Pedro Miguel Estévez De León**  
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Química  
Industrial

Guatemala,  
2024

Vo Vo. Bo.

(f)   
Lic. Ana Luisa Mendizábal

Tema examinadora

(f)   
Lic. Ana Luisa Mendizábal

(f)   
Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano

(f)   
Ing. Carmen Ortiz

Fecha de aprobación: Guatemala, 5 de enero de 2024

## PREFACIO

Este trabajo de graduación es una propuesta para aprovechar el desecho de posos de café generados por distintas *coffee shops* en Guatemala, dejándolo como un desperdicio aumentando la contaminación por su alto consumo a nivel mundial. Dejando a un lado las grandes propiedades que este tiene pudiendo ser utilizado como biofertilizante, bioaceite, biocombustible y en este caso para obtener carbón activado. Un producto que ha tenido un gran auge en los últimos años por su uso para distintas industrias como farmacéuticas, atención médica, bebidas y especialmente en tratamiento de aguas.

Como Ingeniero Químico Industrial es primordial encontrar la forma de transformar cualquier materia prima en un producto, pero con mucho énfasis en esas materias primas que son desechadas y encontrarles una nueva utilidad proponiendo procesos ambientalmente sostenibles, siendo nosotros, agentes importantes que están en la labor de ayudar al medio ambiente para disminuir su contaminación. Debido a que es un estudio a escala laboratorio, será necesario realizar más estudios para que se realice a escala industrial, siendo una fuerte y nueva industria de carbón activado en Guatemala.

Agradezco a:

A mi padre y madre, por el apoyo incondicional que me han brindado durante esta nueva historia en mi vida. Sin ustedes este logro no se hubiera conseguido, ya que son el sostén que necesito para salir adelante, a pesar de las distintas dificultades que tenía, ustedes siempre estaban ahí dándome ánimo. No tengo forma de agradecerles todo lo que han hecho por mí y este trabajo de graduación es el fruto que han cosechado por ser los mejores padres que alguien pueda tener.

A mi hermano Güichi, por ser la motivación de graduarme de la universidad especialmente por apoyarme en este transcurso de la universidad y en la redacción de la tesis, por ser mi segundo asesor y siempre preocuparte por mí.

A mi mamita Lily, por ser alguien especial que siempre compartía conmigo y disfruta con las travesuras que le hago, pero más que todo por darme siempre la bendición cada vez que me voy de mi querida ciudad para que me vaya bien.

A mis dos abuelos, papito Nino y mamita Vita (Puchis Puchis), No hay mejor cariño que el de los abuelos y yo recibí mucho más que eso, recibí a dos gemas que Dios convirtió en grandes abuelos que, aunque no estén hoy aquí conmigo, espero que allá arriba estén contentos por este logro de su nieto más pequeño. Siempre estarán en mi corazón.

A Ana Luisa, le agradezco por ser mi asesora, pero más porque siempre estuvo pendiente de mí a pesar de otras tareas que tenía en la universidad. Por su apoyo en mis momentos más preocupantes y desesperados durante la elaboración de la tesis. Gracias por todo.

A mi mascota Sorpresa, por compartir momentos buenos y alegres.

## LISTA DE CONTENIDO

PREFACIO .....	v
LISTA DE CONTENIDO.....	vii
LISTA DE CUADROS.....	x
RESUMEN .....	xiv
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. JUSTIFICACIÓN.....	2
III. OBJETIVOS .....	3
A. Objetivos generales.....	3
B. Objetivos específicos .....	3
IV. MARCO TEÓRICO.....	4
4.1 Café.....	4
4.2 Posos de café.....	4
4.3 Pirólisis .....	5
4.4 Pirólisis lenta.....	7
4.4.1 Producción de carbón vegetal (char).....	7
4.5 Efecto de la tasa de calentamiento .....	7
4.6 Métodos de activación del carbón activado .....	9
4.6.1 Activación física .....	9
4.6.2 Activación química .....	9
4.6.3 Efectos de la activación en los sitios acido-básicos.....	10
4.7 Fuerzas intermoleculares .....	10
4.7.1 Fuerzas dipolo-dipolo: Fuerzas de Keeson .....	11
4.7.2 Fuerzas dipolo-dipolo Inducido Fuerzas de Debye .....	11
4.7.3 Fuerzas dipolo instantáneo-dipolo inducido: Fuerzas de London .....	11
4.8 Adsorción.....	12
4.9 Carbón activado .....	12
4.10 Mecanismos de operación como adsorbente.....	13
4.10.1 Tipos de poros.....	14
4.11 Propiedades y condiciones que afecten la adsorción del carbón activado.....	14
4.12 Aplicaciones del carbón activado .....	15

4.12.1	Aplicaciones biomédicas .....	15
4.12.2	Aplicaciones ambientales.....	16
4.12.3	Otras aplicaciones .....	16
4.13	Analizador elemental .....	16
4.14	Cromatografía de gases.....	17
4.14.1	Microextracción en fase sólida (SPME) .....	18
4.15	Espectroscopía infrarroja .....	19
4.16	Espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier.....	19
4.16.1	Interferómetro .....	20
4.16.2	Operación FTIR .....	20
V.	ANTECEDENTES .....	22
5.1	CARACTERIZACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO PRODUCIDO A PARTIR DE RESIDUOS DE CAFÉ POR ACTIVACIÓN QUÍMICA Y FÍSICA.....	22
5.2	PRODUCCIÓN DE CARÓN ACTIVADO A PARTIR DE RESIDUOS DE CAFÉ UTILIZANDO MÉTODO QUÍMICO Y FISICO .....	22
5.3	PREPARACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE RESIDUOS DE CAFÉ COMO UN ADSORBENTE PARA REMOVER CROMO (III) DEL AGUA.....	22
VI.	METODOLOGÍA.....	23
6.1	MATERIALES .....	23
6.1.1	Reactivos.....	23
6.1.2	Cristalería.....	23
6.1.3	Equipos y materiales.....	23
6.2	MÉTODO .....	24
6.2.1	DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE MUESTRA .....	24
6.2.2	RECOLECCIÓN DE LOS RESIDUOS DE CAFÉ .....	24
6.2.3	TRANSPORTE DE LOS RESIDUOS DE CAFÉ.....	24
6.2.4	ALMACENAJE DE LOS RESIDUOS DE CAFÉ.....	25
6.2.5	PORCENTAJE DE RESIDUOS DE CAFÉ.....	25
6.2.6	RESIDUOS DE CAFÉ SECOS .....	25
6.2.7	ACTIVACIÓN QUÍMICA DEL CARBÓN.....	26
6.2.8	DETERMINACIÓN DE ADSORCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO.....	26
6.2.9	CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DE CARBÓN ACTIVADO.....	29
VII.	RESULTADOS.....	30



VIII.	DISCUSIÓN .....	32
IX.	CONCLUSIONES .....	35
X.	RECOMENDACIONES .....	36
XI.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	37
XII.	ANEXO.....	39
XIII.	DATOS ORIGINALES .....	51
XIV.	CÁLCULOS DE MUESTRA.....	58
XV.	DATOS CALCULADOS DEL EXPERIMENTO .....	60
XVI.	GLOSARIO .....	62

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Diferentes tipos de procesos de pirólisis .....	6
Cuadro 2. Características y especificaciones del carbón activado para uso comercial según distintas normas ASTM .....	13
Cuadro 3. Porcentaje de humedad de residuos de café húmedos y secos .....	30
Cuadro 4. Área total de los picos cromatográficos obtenidos de los compuestos volátiles de residuos de café húmedos y secos.....	30
Cuadro 5. Rendimiento másico de sólido obtenido después de la pirólisis a partir de posos de café secos .....	30
Cuadro 6. Rendimiento másico de carbón activado por método químico activado con cloruro de zinc.....	31
Cuadro 7. Características del carbón activado a partir de posos de café .....	31
Cuadro 8. Bandas del espectro infrarrojo características del carbón activado a partir de residuos de café .....	31
Cuadro 9. Área de perfil de compuestos volátiles de posos de café 1 con cromatógrafo de gases con deionización de llama.....	51
Cuadro 10. Área de perfil de compuestos volátiles de posos de café 2 con cromatógrafo de gases con deionización de llama.....	52
Cuadro 11. Área de perfil de compuestos volátiles de posos de café 3 con cromatógrafo de gases con deionización de llama.....	53
Cuadro 12. Área de perfil de compuestos volátiles de posos de café 4 con cromatógrafo de gases con deionización de llama.....	54
Cuadro 13. Área de perfil de compuestos volátiles de posos de café secos 1 con cromatógrafo de gases con deionización de llama .....	55
Cuadro 14. Área de perfil de compuestos volátiles de posos de café secos 2 con cromatógrafo de gases con deionización de llama .....	55
Cuadro 15. Área de perfil de compuestos volátiles de posos de café secos 3 con cromatógrafo de gases con deionización de llama .....	56
Cuadro 16. Área de perfil de compuestos volátiles de posos de café secos 4 con cromatógrafo de gases con deionización de llama .....	56
Cuadro 17. Curva de calibración de absorbancia de las distintas concentraciones de azul de metileno.....	57
Cuadro 18. Porcentaje de humedad de residuos de café y residuos de café secos. ....	60
Cuadro 19. Área de perfil de compuestos volátiles de los residuos de café antes y después del secado.....	60

Cuadro 20. Rendimiento másico de sólido obtenido después de la pirólisis a partir de residuos de café secos con una tasa de calentamiento lenta de 15°C/20 minutos .....	60
Cuadro 21. Concentración en el tiempo del azul metileno .....	61
Cuadro 22. Porcentaje de humedad del carbón activado .....	61
Cuadro 23. Densidad aparente del carbón activado .....	61

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ecuación general del proceso de la pirólisis.....	5
Figura 2. Rendimiento de productos gaseoso, líquido y sólido, en función del tiempo de residencia, la temperatura de reacción y la velocidad del calentamiento .....	6
Figura 3. Rendimiento del carbón de la pirólisis con la disminución de la temperatura, mientras que el rendimiento de gas aumenta.....	8
Figura 4. Grupos funcionales que puede contener el carbón activado .....	10
Figura 5. Visualización de las fuerzas dipolo-dipolo: Fuerza de Keeson.....	11
Figura 6. Visualización de las fuerzas dipolo-dipolo: Fuerzas de Debye.....	11
Figura 7. Visualización de las fuerzas dipolo instantáneo-dipolo inducido: Fuerzas de London.	12
Figura 8. Analizador elemental para determinar Carbono.....	17
Figura 9. Diagrama de un cromatógrafo de gases.....	18
Figura 10. Espectro electromagnético y región infrarroja .....	19
Figura 11. Esquema operativo de un instrumento de FTIR .....	20
Figura 12. FTIR basado en el interferómetro de Michaelson .....	21
Figura 13. Interferograma de un espectrofotógrafo FTIR .....	21
Figura 14. Balance de masa y energía para el secado de los posos de café.....	39
Figura 15. Balance de masa y energía para la pirólisis de posos de café .....	39
Figura 16. Balance de masa y energía de la activación química del carbón.....	40
Figura 17. Cromatografía de gases con de detector de ionización de llama de posos de café 1 ...	40
Figura 18. Cromatografía de gases con de detector de ionización de llama de posos de café 2 ...	41
Figura 19. Cromatografía de gases con de detector de ionización de llama de posos de café 3 ...	41
Figura 20. Cromatografía de gases con de detector de ionización de llama de posos de café 4 ...	41
Figura 21. Cromatografía de gases con de detector de ionización de llama de posos de café secos 1.....	42
Figura 22. Cromatografía de gases con de detector de ionización de llama de posos de café secos 2.....	42
Figura 23. Cromatografía de gases con de detector de ionización de llama de posos de café secos 3.....	42
Figura 24. Cromatografía de gases con de detector de ionización de llama de posos de café secos 4.....	43
Figura 25. Curva de decoloración de azul de metileno en el tiempo con el carbón activado químicamente.....	43

Figura 26. Espectroscopía IR para las distintas muestras obtenidas del carbón activado .....	44
Figura 27. Muestras de posos de café recolectados del coffee shop antes de su secado .....	44
Figura 28. Determinación de humedad de posos de café recolectados del coffee shop .....	45
Figura 29. Sistema de pirólisis extrema para producción de carbón .....	45
Figura 30. Posos de café secos ingresados en el reactor para pirólisis .....	46
Figura 31. Carbón obtenido después del proceso de pirólisis extrema en el reactor para pirólisis .....	46
Figura 32. Bioaceite obtenido después del proceso de la carbonización de los posos de café secos .....	47
Figura 33. Solución de agente activante de Cloruro de Zinc 1M para activación del char obtenido después de la carbonización.....	48
Figura 34. Carbón activado en bandeja de horno para eliminar el líquido restante por medio de secado.....	48
Figura 35. Carbón activado obtenido por medio de posos de café provenientes de coffee shops	49
Figura 36. Preparación de pesos de muestras de posos de café y carbón activado para ingresarlos en el analizador elemental.....	49
Figura 37. Sistema utilizado para la determinación del número de yodo y área superficial del carbón activado .....	50
Figura 38. Decoloración de azul de metileno con carbón activado .....	50

## RESUMEN

Con el objetivo de aprovechar los residuos de café para la producción de carbón activado a partir de la pirólisis, se inició con el acondicionamiento de la materia prima, disminuyendo su porcentaje de humedad de  $54.055\% \pm 3.4166\%$  a  $2.88\% \pm 0.989\%$  utilizando un horno eléctrico común por tres horas a  $110^{\circ}\text{C}$ . Además, se realizó el perfil de compuestos volátiles identificando entre 26 hasta 29 compuestos y después se determinó la disminución de su área de  $627.7814 \pm 263.1162$  UA a  $261.8501 \pm 168.1576$  UA.

Después de su acondicionamiento se colocó la muestra de residuos de café secos dentro de un reactor de pirólisis para llevar su proceso a una tasa de calentamiento lenta elevando la temperatura a  $20^{\circ}\text{C}$  cada 15 minutos. Obteniendo un rendimiento del sólido de  $68.495\% \pm 1.353\%$ , de bioaceite de  $28.62\%$  y los gases no condensables de  $2.88\%$ .

Para su activación se utilizó una solución de Cloruro de Zinc 1M, agregando 10mL de solución por cada gramo de carbón, donde se colocaron en un horno eléctrico a  $80^{\circ}\text{C}$  por dos horas, donde se obtuvo un rendimiento del carbón activado de  $61.655\% \pm 3.323\%$ .

Se determinó el número de yodo a partir de la ASTM 4607-94 con un valor de  $1313.556 \pm 9.094$  mg/g, luego se determinó el área superficial obteniendo un valor de  $1789.528 \pm 14.285$  m<sup>2</sup>/g. También se le realizó la adsorción de la concentración de azul de metileno en el tiempo a una concentración obteniendo una ecuación lineal  $y = -0.0312x + 6.3087$  con R<sup>2</sup> de 0.9077.

Por último, se le realizó al carbón activado pruebas fisicoquímicas como la humedad utilizando una balanza de humedad obteniendo un valor de  $3.65\% \pm 0.33\%$  y la densidad aparente obteniendo un valor de  $0.4235 \pm 0.0534$  g/mL. Se le hizo una espectroscopía IR donde se obtuvo 6 picos característicos conteniendo grupos alifáticos, aromáticos y alquenos.

Con los análisis realizados como el número de yodo, área superficial, azul de metileno, humedad, densidad aparente y espectroscopia IR se determinó que se logró obtener carbón activado a partir de residuos de café.

# I. INTRODUCCIÓN

Tanto en la industria como el consumo de café en general se generan residuos cuya acumulación puede ocasionar contaminación. Se estima que solo se aprovecha el 5% de la biomasa total del café en la elaboración de la bebida, encontrándose como residuos o subproductos ramas, hojas, pulpa, piel y posos de café. Los residuos o también conocidos como posos de café se obtienen después de extraer la esencia del café, los cuales poseen un alto contenido en materia orgánica, se han realizado distintas investigaciones para su aprovechamiento, utilizándolos como abono, aditivo para la alimentación animal, biodiesel, bioetanol y por supuesto para carbones activados (Mussato, 2011).

Los primeros experimentos de adsorción de carbono fueron realizados por Schele en 1773. Después esto el carbón ha ido creciendo especialmente en la eliminación de impurezas en el líquido. Desde 1930 el carbón activado se utiliza para el procesamiento y producción de agua pura. Este descubrimiento ha contribuido en gran medida a ampliar su uso. Su aplicación en escala industrial se logró unos años más tarde cuando el carbón vegetal se utilizó en una refinería para blanquear la caña de azúcar. A principios del siglo 20 las técnicas de adsorción han experimentado un gran desarrollo a través de la ciencia siendo utilizado en la industria farmacéutica, petroquímica, química y especialmente en el tratamiento de aguas como aguas residuales para luego ser de consumo humano (Rocher, 2008).

El carbón activado derivado de sustancias orgánicas es considerado un bioadsorbente que tiene una alta tasa de adsorción, el cual se produce por medio de la carbonización y este puede ser químico, físico o físico-químico. Según su estructura, el carbón activado es una estructura amorfa de carbono que consiste principalmente de carbono libre que tiene una capa superficial que hace tener una tasa de adsorción más alta a los de otros adsorbentes que depende totalmente de la elección de la materia prima para obtener una gran área superficial y porosidad específica (Allwar, 2008).

En este trabajo se aprovecharán los residuos de café, que abundan en Guatemala, como materia prima como una alternativa para la producción de carbón activado. De esta forma, se realizará todo el proceso desde la recepción de los residuos de café de la coffee shop hasta la caracterización de las propiedades de adsorción y fisicoquímicas del carbón activado obtenido químicamente utilizando Cloruro de Zinc.

## II. JUSTIFICACIÓN

Según la Asociación Nacional del Café (ANACAFE), el consumo de café hasta el año 2020 era de 2 a 3 tazas de café al día entre los guatemaltecos que prefieren de esta bebida representando un 80% de la población total, sin embargo en los últimos años, esta cifra ha crecido significativamente en un 15.9% con la apertura de varias *coffee shops* (tiendas que se dedican a la venta especializada de café) han dado un fuerte impulso al concepto de “café gourmet”. Esto se ha hecho popular entre las personas que gustan del café de altura por la cuidadosa selección de semilla, microclima, floración, tostado y molido, resultando en un aromático café preparado (Asociación Nacional del Café (ANACAFE), 2021).

La preparación del café es por medio de la extracción, quedando como residuo los posos de café sólido, siendo el 91% de contenido del café molido, material que comúnmente es desechado por hogares y cafeterías. Estos residuos presentan un alto contenido de carbono, característica que lo vuelven un candidato ideal para la elaboración del carbón activado (Farrera, y otros, 2017)

La demanda de carbón activado ha ido en aumento por sus diversas aplicaciones en los campos de la medicina, industria farmacéutica y medio ambiente gracias a sus propiedades adsorbentes teniendo un consumo mundial de 0.9 millones de toneladas por año con un crecimiento anual de 5.2%, por lo que es importante la búsqueda de nuevas fuentes de carbón activado para sostener la demanda mundial (Prías, Rojas, Echeverry, Fonthal, & Calderón, 2011).

Debido a esto se considera que la producción de carbón activado a partir de posos de café, es de beneficio ya que se reusa la biomasa que se desecha, convirtiéndola en un adsorbente de gran interés cumpliendo los estándares ASTM (American Society for Testing Technical and Materials) para que sea de uso comercial.



### **III. OBJETIVOS**

#### **A. Objetivos generales**

1. Elaborar carbón activado para uso comercial a partir de posos de café por pirólisis a escala laboratorio

#### **B. Objetivos específicos**

1. Determinar el perfil de los compuestos volátiles y porcentaje de humedad del acondicionamiento de los posos de café para eliminar impurezas previo a la pirólisis.
2. Determinar el rendimiento másico del carbón producido por pirólisis por medio de análisis elemental.
3. Caracterizar carbón activado químicamente producido a través del número de yodo, área superficial y azul de metileno para que sea de uso comercial.

## IV. MARCO TEÓRICO

### 4.1 Café

El café es el nombre de la semilla del cafeto (*Coffea arabica*), un árbol originario de Etiopía, su consumo se ha extendido por la bebida que se elabora a través de la infusión de la semilla tostada y molida (Ospina, 2001).

Las diferentes estructuras tisulares del fruto del café dan lugar a la generación de subproductos y residuos que dependen del procesado del café por vía húmeda o seca donde podemos distinguir cuatro tipos de residuos: la pulpa, la cáscara, la piel de plata y posos de café.

- Pulpa: Es el primer subproducto que se obtiene tras el procesado húmedo representan el 28% del peso seco del grano. Se compone por taninos (1.8-8.56%), sustancias péptidas (6.5%), azúcares reductores (12.4%), azúcares no reductores (2.0%), cafeína (1.3%), ácido clorogénico (2.6%) y ácido cafeico (1.6%)
- Cáscara: Se obtiene a partir del procesado seco de los granos de café, supone el 12% del peso seco del grano y la cáscara está compuesta de 15% humedad, 4.5 cenizas, 7.0% proteína, 0.3% lípidos y 72.3% de carbohidratos.
- Piel de plata: También llamada cascarilla, es un subproducto que proviene del proceso de tostado, principalmente está compuesto por celulosa y hemicelulosa.
- Posos de café: Es un sedimento que queda como residuo tras la elaboración de la infusión del café. Por cada tonelada de café se genera alrededor de 650 kg de posos de café (Ospina, 2001).

### 4.2 Posos de café

Son el producto del desecho de la preparación del café la cual genera 0.91g de posos de café por 1g de café molido y se producen alrededor de dos kilogramos por cada kilogramo de café instantáneo (Blinová, Sirotiak, & Solda, 2017).

Su composición química depende de la eficiencia de extracción por diversos factores entre ellos la especie del café, grado de tostado, grado de molienda, relación café/agua, calidad del agua, temperatura, presión y tiempo de percolación. Por lo tanto, diferentes procesos de extracción darán lugar a preparaciones químicas diferentes, por ende, distintos posos de café. De hecho, los constituyentes industriales del café usado se extraen de manera mucho más efectiva, lo que da como resultado restos más agotados químicamente en comparación con el obtenido después de la preparación de cafeterías o ambientes domésticos (Blinová, Sirotiak, & Solda, 2017).

Se investigó que la composición química de los residuos de café muestra un alto porcentaje de carbono siendo de 58% o mayor y un bajo contenido de nitrógeno siendo de 2% o menor y su contenido de cenizas 1% o menos

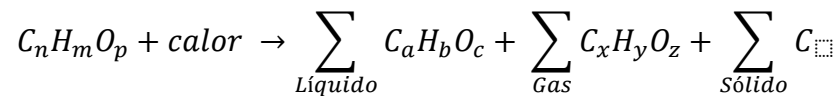
Estos están compuestos por 12.4% celulosa, 39.1% hemicelulosa (3.6% arabinosa, 19.07% manosa, 16.43% galactosa), 23.9% lignina, 2.29% grasa, 17.44% proteína y 60.46% de las fibras

dietéticas convirtiéndolas en una fuente interesante de materia prima para distintas aplicaciones. Se han usado para biodiesel, producción de bioetanol, de pellets de combustible, de vapor, de vasos reutilizables, fuentes de azúcares, absorbente para la eliminación de colorantes, como sustrato para producción de hongos, fuente de antioxidantes fenólicos naturales, productos cosméticos y como biomaterial en la industria farmacéutica, alimentaria y de polímeros (Blinová, Sirotiak, & Solda, 2017).

### 4.3 Pirólisis

La pirólisis es una combustión en ausencia total de oxígeno, excepto en los casos en que se permite la combustión parcial para proporcionar la energía térmica necesaria para este proceso. Este proceso descompone térmicamente la biomasa en gas, líquido y sólido calentando rápidamente la biomasa por 300 – 400°C. Durante la pirólisis las moléculas de hidrocarburos más pesados se descomponen en moléculas de hidrocarburos más pequeñas, gases no condensables como monóxido de carbono, dióxido de carbono y carbón sólido (Basu, 2013).

Figura 1. Ecuación general del proceso de la pirólisis

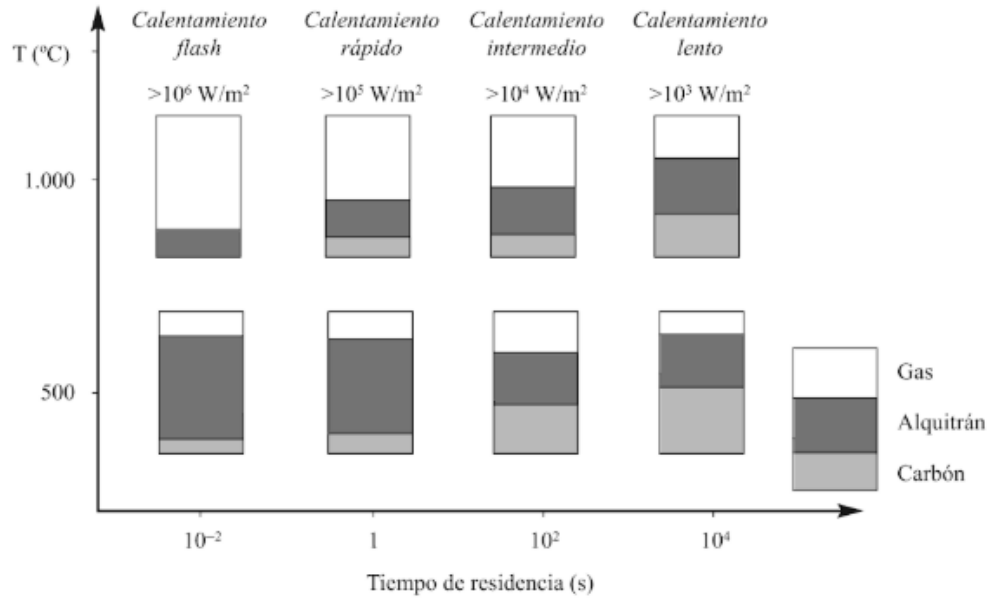


(Basu, 2013)

El proceso de pirólisis tiene tres distintos productos, los cuales son un gas, un residuo sólido de carbón y un producto líquido que se puede condensar y se conoce como bio-gas. Las composiciones de estos productos dependen de la fuente o de la materia prima, pero se caracterizan de la siguiente forma. El producto gaseoso, compuesto de gases no condensables como hidrógeno, dióxido y monóxido de carbono, etano, eteno, entre otros, puede utilizarse como combustible. El producto sólido puede utilizarse para la producción de carbón activado. El líquido condensable está compuesto por agua y otros compuestos orgánicos, el cual puede utilizarse inmediatamente como combustible de calderas o pasar por tratamientos secundarios para mejorar sus propiedades y utilizarse como combustible de transporte (Nogúes, García, & Rezeau, 2010).

La cantidad de los productos se puede modificar según los parámetros de pirólisis, como temperatura, la velocidad de calentamiento, el tiempo de residencia de la biomasa, el tiempo de residencia de los vapores y la presión. Como se observa en la Figura No.2. Con los parámetros de operación se establecen cuatro distintos tipos de pirólisis, los cuales son carbonización, pirólisis convencional, rápida para obtener líquido y para obtención de gas (Nogúes, García, & Rezeau, 2010).

Figura 2. Rendimiento de productos gaseoso, líquido y sólido, en función del tiempo de residencia, la temperatura de reacción y la velocidad del calentamiento



(Nogúes, García, & Rezeau, 2010)

Cuadro 1. Diferentes tipos de procesos de pirólisis

Proceso	Tiempo de residencia (sólido)	Temperatura (°C)	Velocidad de calentamiento	Producto principal
<b>Carbonización</b>	Horas-días	400	Muy baja	Carbón vegetal
<b>Convencional</b>	5-30 min	600	Baja	Bio-gas y producto sólido
<b>Rápida (líquido)</b>	< 2 s	500	Alta o muy alta	Bio-gas y productos químicos
<b>Rápida (gas)</b>	< 2 s	> 650	Alta o muy alta	Gas y productos químicos

(Nogúes, García, & Rezeau, 2010)

El proceso de carbonización, como se muestra en el Cuadro No. 1, provee el mejor rendimiento del producto sólido o carbón vegetal, como lo es principalmente en la producción de carbón activado. Este término engloba un gran número de materiales amorfos de carbono, que tienen una alta porosidad y gran área superficial, desde 500 a 2000 metros cuadrados por gramo, por lo que se utilizan como principales agentes de adsorción. En la industria, el carbón activado se obtiene de distintos materiales como la madera de cualquier tipo, carbones, cáscaras de coco, entre otros. La capacidad de un material adsorbente se calcula por medio del método BET (Braunauer-Emmet-Teller) (Nogúes, García, & Rezeau, 2010).

La formación de poros pequeños es muy importante. La clave es mantener el proceso a velocidad baja de calentamiento para que la liberación de los gases del sólido sea gradual, y de esta forma no se produzcan poros demasiado grandes. El producto sólido del proceso de pirólisis no es suficiente para tener un alto grado de porosidad, por lo que es necesario un proceso de activación (Nogúes, García, & Rezeau, 2010).

#### **4.4 Pirólisis lenta**

La pirólisis a bajas velocidades de calentamiento suele enfocarse a la obtención de un sólido carbonoso como principal producto del proceso. El uso de bajas velocidades de calentamiento y bajas temperaturas finales de pirólisis es el proceso normalmente utilizado para este fin. En estas condiciones, el producto obtenido se denomina carbón vegetal, dando una aplicación como combustible y como agente reductor (Basu, 2013).

La pirólisis a bajas temperaturas es la etapa preliminar de la producción de carbones activados a partir de todo tipo de biomasa. Su principal efecto producido mediante la pirólisis es la eliminación de materia volátil, donde la biomasa se convierte en un combustible más fácil de transportar y manejar y luego crear una estructura porosa preliminar que puede desarrollarse mediante etapas posteriores de tratamiento del sólido (Basu, 2013).

##### **4.4.1 Producción de carbón vegetal (char)**

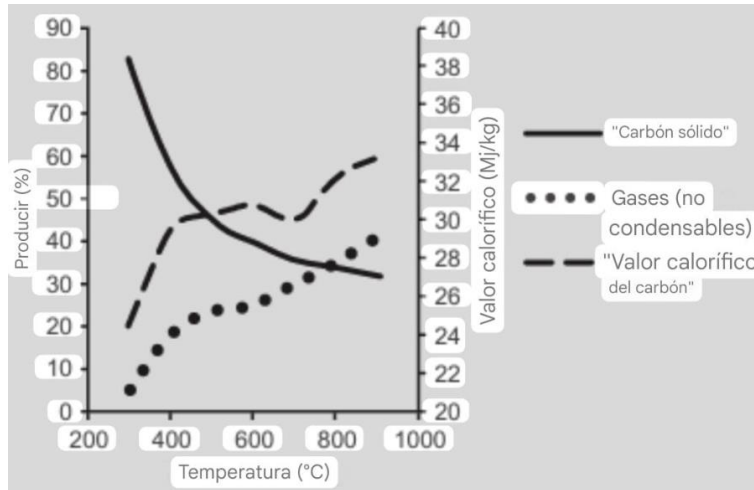
En la actualidad, la producción de char en hornos industriales se puede llevar por tres distintos métodos de calentamiento: interno, externo o mediante recirculación de gas caliente. Habitualmente, estos reactores funcionan a presión atmosférica y usan madera como materia prima pueden ser reactores de lecho fijo que opera por batch o reactores continuos en función del proceso del que se trate (Basu, 2013).

#### **4.5 Efecto de la tasa de calentamiento**

La velocidad de calentamiento de la biomasa tiene una influencia importante en el rendimiento y la composición del producto. El calentamiento rápido está moderado entre 400 –

600°C produce mayor cantidad de compuestos volátiles condensables y por lo tanto líquidos, mientras que un calentamiento más lento produce más calor. Donde Debdoubi observó que durante una velocidad de calentamiento que aumentaba de 50°C/min a 250°C/min el rendimiento del líquido aumentaba de 45% al 68.5% a una temperatura de pirólisis de 550°C (Basu, 2013).

Figura 3. Rendimiento del carbón de la pirólisis con la disminución de la temperatura, mientras que el rendimiento de gas aumenta



(Basu, 2013)

La tasa de calentamiento por sí sola no define el producto, también se debe considerar el tiempo de residencia en el reactor. Durante el calentamiento y la eliminación lenta del reactor permite que se produzca una reacción secundaria que ocurre entre las partículas de char y los compuestos volátiles (Basu, 2013).

Los parámetros de operación de la pirólisis son ajustados para encontrar los requerimientos necesarios para el producto final de interés. Las normas de diseño para calentar un pirolizador incluyen lo siguiente:

- Para maximizar la producción de carbón se debe utilizar una tasa de calentamiento baja ( $<0.01 \pm 2.0^\circ\text{C/s}$ ), una temperatura final baja y un tiempo de residencia largo.
- Para maximizar la cantidad de líquido se usa una tasa de calentamiento alto, una temperatura moderada final (450-600°C) y un tiempo de residencia corto.
- Para maximizar la producción de gas se usa una tasa de calentamiento moderado a corto con una temperatura final alta (700-900°C) y un tiempo de residencia largo (Basu, 2013).

## **4.6 Métodos de activación del carbón activado**

La activación del carbón es la generación de partículas cristalinas altamente porosas con una enorme superficie de contacto en el interior de los gránulos de carbón que le da la característica de poder adsorber (Groso, 1997).

El carbón activado puede ofrecerse a partir de todo tipo de material carbonoso o carbón mineral no grafitico, pero cada una de las materias primas brindará características y calidades distintas al producto final. Para su proceso de activación existen dos tipos: la actividad física (llamada también térmica) y activación química (llamada también deshidratación química) (Groso, 1997).

### **4.6.1 Activación física**

Cuando se utiliza un material orgánico el proceso se inicia con su carbonización, la cual debe de realizarse a una temperatura baja en la que no se favorezca la grafitación. El carbón resultante se somete a temperaturas cercanas a 1000°C en una atmósfera inerte o reductora. En estas condiciones y a lo largo de un tiempo algunos átomos de carbón reaccionan y se gasifican en forma de dióxido de carbono y otros se recombinan y se condensan en forma de las placas grafiticas. Estas placas tienden a ser imperfectas y pequeñas y eso depende de la materia prima (Groso, 1997).

El grado de activación y el rendimiento de las condiciones de operación del horno de activación que son la temperatura, composición de gases, tiempo de residencia, flujo volumétrico del vapor. El rendimiento suele estar entre 0.25 y 0.5 kg de carbón activado por kilo de carbón (Groso, 1997).

Para el horno de activación existe diferentes tipos los cuales pueden ser: rotatorio de calentamiento directo, vertical de hogares múltiples y lecho fluidizado. El carbón activado sale del horno al rojo vivo, por lo que se debe enfriar antes de entrar en contacto con el aire que se encuentra a temperatura ambiente, de lo contrario una parte de este desaparecería como dióxido de carbono y el producto resultaría con una cantidad de óxidos superficiales que puede afectar al rendimiento del producto final (Groso, 1997).

### **4.6.2 Activación química**

Este método se aplica a ciertos materiales orgánicos que son relativamente blandos y que están formados por moléculas de celulosa, como puede ser la madera del pino.

La primera etapa consiste en deshidratar la materia prima mediante la acción de un agente reactivo y posteriormente se carboniza el material deshidratado a baja temperatura obtenido una estructura porosa.

El producto resultante se lava con el propósito de dejarlo tan libre como sea del químico utilizado, así como recuperar y utilizar este último. El grado de activación puede variar de acuerdo a la concentración del químico utilizado (Groso, 1997)

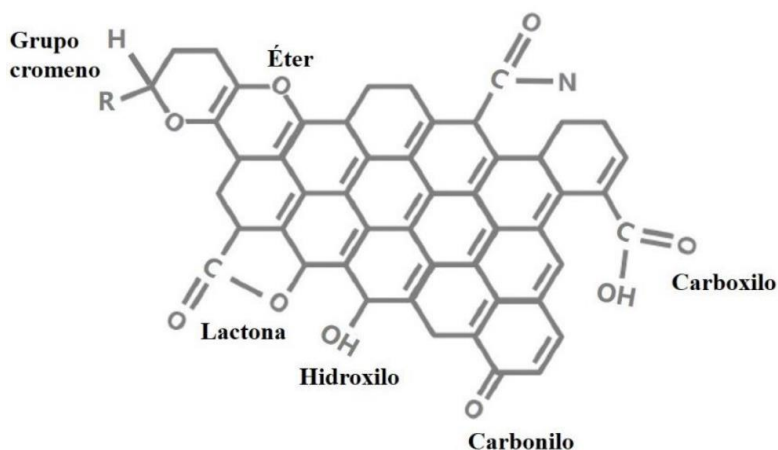
Mediante esta tecnología no se obtienen las mismas placas gráficas que resultan en el método de activación física. Las paredes del carbón se asemejan a una molécula orgánica, parte aromática y parte alifática, o a un polímero muy ramificado y entre ligado. Además, las paredes no son planas sino rugosas y contienen grandes cantidades de átomos distintos al carbono, principalmente oxígeno (Groso, 1997)

#### 4.6.3 Efectos de la activación en los sitios acido-básicos

El proceso de activación le proporciona al carbón activado ciertos grupos funcionales, las cuales dependen directamente del método que se utilice como una oxidación química que se realice en el material. Durante su proceso de activación, el carbón activado cuenta con un carácter hidrófilo y al oxidarse toma un carácter anfótero permitiendo tener sitios ácidos o básicos influyendo en su adsorción debido a la capacidad que estos grupos le generan al momento de interactuar con cierta clase de moléculas (Sevilla, 2011),

Los grupos funcionales que pueden presentarse en el carbón activado son el hidroxilo (-OH), carboxilo (-COOH), carbonilo (-C=O), éter (-O-), amina (-NH<sub>2</sub>), lactona (-O=C=O), quinona (-C=O-), cremona, entre otros; donde estos grupos funcionales pueden beneficiar en cierta medida la adsorción del material (Long, 2019).

Figura 4. Grupos funcionales que puede contener el carbón activado



(Long, 2019)

#### 4.7 Fuerzas intermoleculares

La mayoría de las fuerzas intermoleculares son de tipo electrostático y se originan por la atracción entre dipolos, recibiendo el nombre de Fuerzas de Van der Waals, este tipo de fuerzas permiten explicar el comportamiento de la mayoría de compuestos con enlaces covalentes. Aunque se puede observar algunos compuestos como el agua o el amoníaco, para las cuales las energías de



las fuerzas intermoleculares son muy superiores a las que pueden originarse mediante enlaces de Van der Waals (Martínez & Iriondo, 2013).

Las interacciones de Van Der Waals son uniones de tipo dipolo-dipolo y se puede clasificar en tres tipos en función de la naturaleza de los dipolos, según sean permanentes o inducidos.

#### 4.7.1 Fuerzas dipolo-dipolo: Fuerzas de Keeson

Son las más frecuentes e intensas, se establecen entre moléculas polares. Las moléculas se orientan por sí mismas de formas que se enfrentan los polos de signo contrario, los dipolos se atraen entre sí y el ordenamiento se extiende a todo el material. Estas fuerzas serán más intensas cuanto mayor sea la polaridad de las moléculas y cuanto mayor sea el tamaño de los átomos que la constituyen, dado que los dipolos serán más intensos cuanto mayor sea el número de electrones involucrados (Martínez & Iriondo, 2013).

Figura 5. Visualización de las fuerzas dipolo-dipolo: Fuerza de Keeson

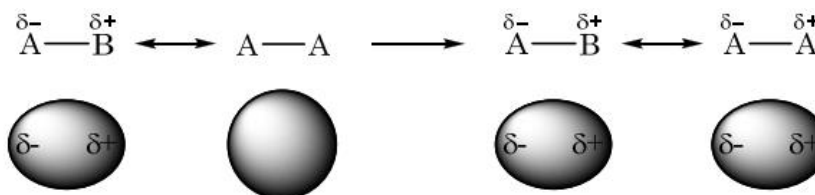


(Martínez & Iriondo, 2013)

#### 4.7.2 Fuerzas dipolo-dipolo Inducido Fuerzas de Debye

Son muy poco frecuentes y sólo aparecen en sistemas complejos con partes polar y partes apolares. Esto sucede cuando una molécula polar se aproxima a otra apolar genera un dipolo al deformar su nube de carga, donde se produce la interacción entre el dipolo permanente de la molécula polar y el inducido en la molécula apolar (Martínez & Iriondo, 2013).

Figura 6. Visualización de las fuerzas dipolo-dipolo: Fuerzas de Debye



(Martínez & Iriondo, 2013)

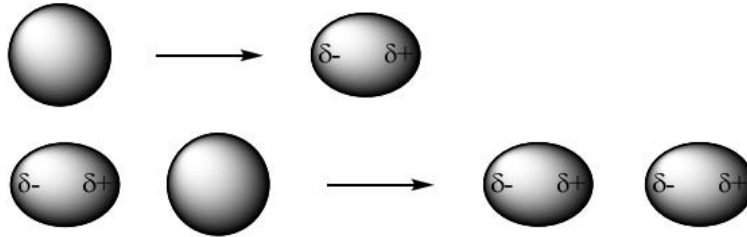
#### 4.7.3 Fuerzas dipolo instantáneo-dipolo inducido: Fuerzas de London

Son las de menor intensidad donde el movimiento continuo de los electrones alrededor del núcleo origina situaciones en las que la distribución de cargas no es homogénea, es decir dipolos

instantáneos. La polaridad de estos dipolos cambia rápidamente con el tiempo dando como resultado un momento de cero.

Debido a que los movimientos de reordenación son lentos de manera que un dipolo instantáneo tiene tiempo para inducir otro dipolo en una molécula vecina y esta a su vez a otra de manera que se extiende la polarización a todo el material y se produce la cohesión entre las moléculas (Martínez & Iriondo, 2013).

Figura 7. Visualización de las fuerzas dipolo instantáneo-dipolo inducido: Fuerzas de London



(Martínez & Iriondo, 2013)

#### 4.8 Adsorción

La adsorción consiste en que el material removido se adhiere física o químicamente a la superficie del material adsorbente, sin penetrar en su estructura física, es un proceso donde implica fuerzas de atracción del tipo Dipolo Instantáneo/Dipolo Inducido: Fuerzas de London conocidas como fuerzas de Van Der Waals, entre las moléculas de la sustancia adsorbida y de la superficie del material que adsorbe. Por lo tanto, al ser un fenómeno que ocurre en la superficie mientras mayor sea su área superficial disponible tenga un sólido, mejor adsorbente podrá ser (Escuela Politecnica de Sevilla, SF).

#### 4.9 Carbón activado

El carbón activado es un material carbonizado que puede ser de origen vegetal o mineral que posee una estructura cristalina reticular similar a la del grafito, siendo extremadamente poroso y puede llegar a desarrollar áreas superficiales de 1500 metros cuadrados por gramo de carbón. Se le llama activado debido a que tiene propiedades adsorbentes gracias al estado de activación que se le da al carbón confiriéndole propiedades especiales para adsorber ciertas sustancias (Geocities, 2009).

La alta efectividad en remoción o adsorción de compuestos se debe a que el carbón activado tiene una gran área superficial disponible para que las moléculas de la sustancia que adsorbe puedan interactuar. Esta gran superficie se adquiere cuando el material el material carbonáceo se somete a altas temperaturas o bases de celulosa en ausencia de oxígeno. Este repentino cambio

provoca en la estructura interna del material un gran número de huecos de tamaño microscópico que sirve para la retención de moléculas con cierta estructura (Geocities, 2009).

El carbón activado tiene una estructura de sus átomos combinados en forma de placas graníticas separatas con distintas orientaciones por lo que existen espacio entre ellas, denominados poros, que brindan al carbón activo su principal característica de tener una gran área superficial y por lo tanto una alta capacidad de adsorbente. El área de la mayoría de los carbones activados comerciales está entre 500 – 2500 metros cuadrados por gramo (Geocities, 2009).

La actividad de adsorción viene dado por la naturaleza de la materia prima y su proceso de activación, donde se ve favorecida por la estructura porosa y la interacción con adsorbatos polares y no polares, dada por su estructura química, además las reacciones químicas en su superficie están influenciadas por centros activos, dislocaciones y discontinuidades, donde los carbones tienen electrones desapareados y valencias insaturadas presentando mayor energía potencial (Geocities, 2009).

Cuadro 2. Características y especificaciones del carbón activado para uso comercial según distintas normas ASTM

Características	Especificaciones	Norma
Número de yodo (mg/g, mín)	1000	ASTM D-4607
Área superficial (mg/g, mín)	1000	ASTM D-4607
Humedad (% , máx)	8.0	ASTM D-2867
Contenido de cenizas (% , máx)	3.0	ASTM D-2866
pH	8-0 – 10.0	CEFIC
Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	0.45 – 0.52	ASTM D-2854
Dureza (mín)	95	ASTM D-3802

(GGC, 2017)

#### 4.10 Mecanismos de operación como adsorbente

El mecanismo de adsorción permite predecir con cierto grado la aproximación del comportamiento del carbón activado en las distintas aplicaciones que puede tener. Existen dos tipos de fenómenos de adsorción: Fisorción y Quimisorción (Groso, 1997).

- **Fisorción:** Es el caso más común del carbón activado para la adsorción donde no existe intercambio de electrones entre adsorbente y adsorbato, lo que permite que el proceso sea reversible.
- **Quimisorción:** Esta es la menos frecuente, este tipo de adsorción es irreversible debido a que modificaciones de las estructuras químicas del adsorbato del adsorbente (Groso, 1997).

#### 4.10.1 Tipos de poros

El carbón activado tiene gran variedad de tamaño de poros que se clasifican de acuerdo a su función, en poros de adsorción y de transporte

- **Poros de adsorción:** Consisten en espacios entre placas gráficas con una separación de entre una hasta cinco veces el diámetro de la molécula que se va a retener. Ambas placas de carbón están lo suficientemente cerca para ejercer atracción entre el adsorbato y retenerlo con mayor fuerza (Groso, 1997).
- **Poros de transporte:** Son mayores que los de adsorción y tiene un rango muy amplio de tamaños, estos van hasta el límite detectable para la vista que corresponden a 0.1mm. En este tipo de poros sólo una placa ejerce atracción sobre el adsorbato y lo realiza con una fuerza menor e insuficiente para retenerlo. Así los poros de transporte actúan como caminos de difusión por lo que circula la molécula hacia los poros de adsorción en los que se encuentran una mayor atracción afectando la cinética con la que se debe realizar el proceso de adsorción (Groso, 1997).

También existe otro tipo de clasificación por parte de la IUPAC (International of Pure and Applied Chemists) que se basa en el diámetro de estos, se dividen de acuerdo a lo siguiente:

- **Micro-poros:** Menores a 2nm. Tienen el tamaño adecuado para retener moléculas pequeñas, compuestos que son aproximadamente más volátiles que el agua como pueden ser olores, sabores y otros solventes.
- **Macro-poros:** Entre 50 – 10000nm. Estas atrapan moléculas grandes, como colores intensos o sustancias húmicas, como ácidos húmicos y fúlvicos, que se generan al descomponerse a materia orgánica.
- **Meso-poros:** Entre 2 – 50nm. Son los más apropiados para moléculas de tamaño intermedio, las cuales se encuentran entre las dos anteriormente mencionadas. (Groso, 1997)

#### 4.11 Propiedades y condiciones que afecten la adsorción del carbón activado

La adsorción del carbón activado puede verse afectada por diversas propiedades tanto para el carbón como del adsorbato, como también las condiciones del gas o líquido en donde se está realizando el fenómeno. Las propiedades pueden ser las siguientes:

- **Tipo de carbón activado**
  - La adsorción aumenta cuando el diámetro de los poros predominantes está entre una y cinco veces el diámetro del adsorbato.
  - Diferencias en la química superficial y en los constituyentes de las cenizas pueden afectar la adsorción, especialmente en la fase líquida (Groso, 1997).

- **Adsorbato**
  - La adsorción de orgánicos es más fuerte al aumentar su peso molecular, mientras el tamaño no rebase el del poro.
  - Las moléculas orgánicas no polares se adsorben con mayor fuerza que las polares.
  - Las moléculas orgánicas ramificadas se adsorben con mayor fuerza que las lineales.
  - La mayoría de las moléculas orgánicas que tienen ligados átomos de cloro, bromo o yodo se adsorben con mayor fuerza.
  - La adsorción en fase líquida aumenta al disminuir la solubilidad del adsorbato. (Groso, 1997)
  
- **Líquido que rodea al carbón activado**
  - Por lo general aumenta la adsorción al disminuir el pH.
  - A mayor temperatura aumenta la solubilidad del adsorbato y se adsorbe en menor proporción. También disminuye la viscosidad del solvente facilitando la movilidad del adsorbato y acelerando la velocidad de difusión hacia los poros. (Groso, 1997)

## 4.12 Aplicaciones del carbón activado

El carbón activado es muy utilizado por sus propiedades como su gran área superficial, porosidad, volumen de poro, grupos funcionales y propiedades electroestáticas que estos tienen por su química superficial. Teniendo una amplia gama de aplicaciones en la biomedicina, tratamiento de aguas y eliminación de contaminantes en soluciones acuosas, separación y purificación en fases gaseosas, almacenamiento de energía, uso en baterías, almacenamiento de calor, supercondensadores, productos farmacéuticos y cuidado personal (Kwiatkowski, 2012).

### 4.12.1 Aplicaciones biomédicas

En este sector han tenido un auge muy grande el carbón activado debido a que este material proporciona áreas superficiales muy grandes y propiedades adsorbentes elevadas, estas mismas características permiten que se puedan utilizar para tratar intoxicaciones, siendo una superficie de anclaje para materiales supermagnéticos, captación de bacterias, ser antimicrobiano y además tiene biocompatibilidad de este material (Kwiatkowski, 2012).

Una de las principales funciones del carbón activado desde hace tiempo es su uso en el ámbito de la toxicología, donde se puede encontrar diálisis gastrointestinales con carbón activado, tratamiento indicado para tratar venenos como insecticidas o raticidas. Se han realizado investigaciones clínicas acerca de la aceleración de la recuperación de los ganglios linfáticos en pacientes de cáncer de colon y tipo rectal, también en el uso como material antimicrobiano y de inhibición bacteriana como la *Escherichia coli* (Kwiatkowski, 2012).

#### **4.12.2 Aplicaciones ambientales**

Sus aplicaciones en usos ambientales abarcan desde soluciones acuosas hasta gaseosas teniendo una gran importancia en la adsorción de contaminantes en el agua. Se han realizado estudios ambientales siendo la aplicación más frecuente la remoción de elementos contaminantes en soluciones acuosas teniendo como ejemplo arsénico, plomo y eliminar colorantes de aguas residuales como el tinte de azul de metileno y el verde brillante, siendo de gran interés para el tratamiento de agua en procesos industriales (Kwiatkowski, 2012).

El carbón activado se ha utilizado también para la remoción-eliminación de contaminantes en fase gaseosa, por ejemplo, se ha empleado el carbón activado para la captación del dióxido de carbono y el sulfuro de hidrógeno para purificar aire y gases industriales (Kwiatkowski, 2012).

#### **4.12.3 Otras aplicaciones**

El café en extracto acuoso que contiene cafeína es absorbido por la etilcelulosa y esta es adsorbida por el carbón activado y posteriormente se desorbe del carbón para utilizarse en otros productos. Se utiliza para modificar los perfiles para adecuar las características organolépticas y eliminar moléculas no deseables en un destilado. También se utiliza para eliminar eficazmente olores provocados por alimentos de origen orgánico aplicándolo en refrigeradores, cocinas y bodegas (Kwiatkowski, 2012).

#### **4.13 Analizador elemental**

El analizador elemental es un equipo que se emplea para la determinación rápida de carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre y oxígeno (C, N, H, S y O) en todo tipo de muestras orgánicas o inorgánicas, sólidas o líquidas, volátiles y no volátiles para obtener los elementos en porcentaje respecto al peso, detección para la determinación cuantitativa, esta es automatizada llevando a las muestras a una combustión de 950-1000°C. Representa una técnica fiable y rentable usada para evaluar la pureza y composición de los compuestos ayudando a los analistas a determinar la estructura de la sustancia de muestra. El analizador requiere de pesos de muestras relativamente pequeños, estos pueden variar según la naturaleza de la muestra. Como al final de cada muestra el porcentaje se da en forma de peso es importante saber el peso exacto de la muestra (Burgos, 2020).

El método se basa en la completa oxidación de la muestra mediante una combustión instantánea. Los gases resultantes de la combustión son transportados mediante un gas portador, normalmente Helio, a través de un horno de reducción. La técnica funciona mediante la utilización de una columna cromatográfica, donde se produce la separación de los distintos elementos, concluyendo con su paso por un detector de conductividad térmica que origina una señal directamente proporcional a la concentración de cada uno de los componentes (Burgos, 2020).

Figura 8. Analizador elemental para determinar Carbono



(Burgos, 2020)

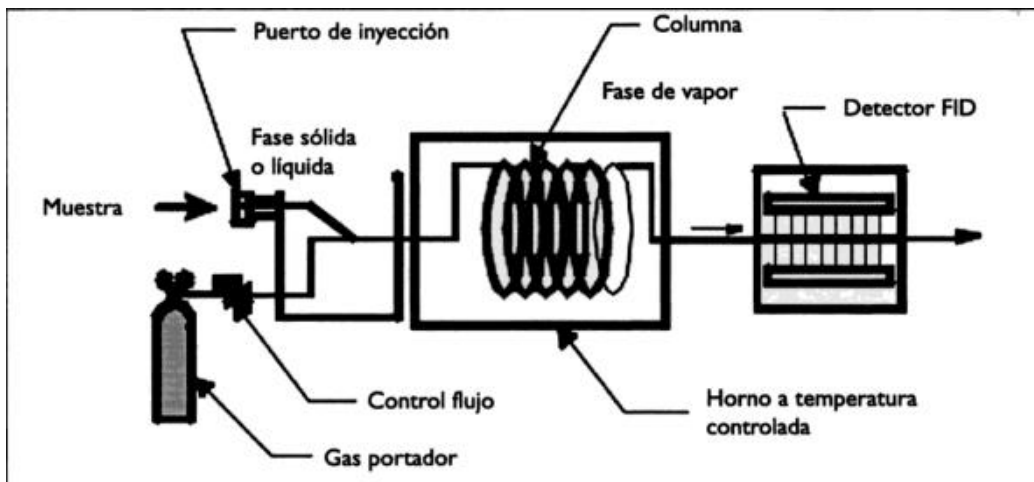
#### 4.14 Cromatografía de gases

En una cromatografía de gases (GC), los componentes de una muestra se separan al ser distribuidos entre una fase móvil gaseosa y una fase estacionaria líquida o sólida retenida en una columna. Al realizar una separación por cromatografía de gases la muestra es vaporizada e inyectada en la parte superior de la columna cromatográfica, donde la elución ocurre por el flujo de la fase móvil inerte gaseosa que sirve para transportar al analito a través de la columna (Skoog, 2015).

Los principales componentes de un cromatógrafo de gases se enumeran a continuación:

- Botella de gas portador (contiene la fase móvil)
- Reguladores de presión
- Filtros de oxígeno y humedad (indicadores de la presencia de O<sub>2</sub>)
- Inyector (con un sistema de control de temperatura)
- Columna cromatográfica (se coloca en el horno)
- Detector (con sistema para control de temperatura)
- Sistema receptor, procesador y almacenamiento de la información
- Registrador o un monitor

Figura 9. Diagrama de un cromatógrafo de gases



(Barquero, 2006)

#### 4.14.1 Microextracción en fase sólida (SPME)

La SPME se basa en la extracción de los analitos de la matriz de la muestra por medio de una fibra de sílice fundida recubierta de un sorbente, seguida de la desorción de los analitos mediante temperatura o un disolvente orgánico. Donde se utiliza una fibra recubierta con una fase de extracción: un líquido (polímero), un sólido (absorbente) o una combinación de ambos. La fibra recubierta se encuentra en una aguja protectora y fijada a un soporte parecido a una jeringa. Cuando la fibra se expone a una muestra, se separan de la matriz de la muestra hacia la fase estacionaria hasta que se establece un equilibrio. El recubrimiento de la fibra extrae los compuestos de la muestra que puede ser por absorción (revestimientos líquidos) o por adsorción (revestimientos sólidos) (MERCK, SF).

Después de un tiempo de extracción, se retira la fibra y se inserta directamente en un cromatógrafo, que pueden ser un cromatógrafo de gases (GC) o un HPLC, para su desorción y análisis. En la cromatografía de gases la desorción de los analitos se realiza térmicamente, mientras que en la HPLC se utiliza un disolvente para la desorción en una fase líquida. Esta técnica presenta una serie de ventajas como un bajo coste, puede ser automatizada, requiere pequeños volúmenes de muestra y generalmente no precisa el uso de disolvente orgánicos, además es fácilmente transportable y poder utilizar con todos los tipos de muestras que pueden ser gaseosas, líquidas o sólidas. También se puede aplicar para la determinación de compuestos de diferente volatilidad (MERCK, SF).



#### 4.15 Espectroscopía infrarroja

La espectroscopia se puede definir como la interacción entre la materia y la luz. La espectroscopia infrarroja es una técnica muy potente que utiliza radiación electromagnética en la región infrarroja para determinar o identificar estructuras moleculares, además de tener diversas aplicaciones cuantitativas dentro de la química analítica (CHROMacademy, SF)

Los espectrofotómetros de infrarrojos utilizan dispositivos ópticos para dispersar y enfocar la radiación electromagnética de frecuencia IR que pasa a través de la muestra y cualquier cambio en la absorbancia con el haz de luz. Existen tres regiones definidas (cercana, media y lejana), los límites entre ellos están definido pero que todavía persisten debates. Se definen como:

- Infrarrojo cercano ( $12820\text{ cm}^{-1}$  -  $4000\text{ cm}^{-1}$ ): consta de armónicos y bandas combinadas resultantes de vibraciones en la región infrarrojo medio del espectro.
- Infrarrojo medio ( $4000\text{ cm}^{-1}$ -  $400\text{ cm}^{-1}$ ) proporciona información estructural para la mayoría de las moléculas orgánicas
- Infrarrojo lejano ( $400\text{ cm}^{-1}$ -  $33\text{ cm}^{-1}$ ): este ha sido el menos investigado que las otras dos regiones y se utiliza para moléculas orgánicas

Figura 10. Espectro electromagnético y región infrarroja



(CHROMacademy, SF)

#### 4.16 Espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier

Estos espectrofotómetros constan de una fuente de infrarrojos, un interferómetro, una celda o cámara de muestra, un detector y un láser. La radiación IR se emite desde una fuente de cuerpo negro brillante, la radiación pasa a través de una apertura que controla la cantidad de radiación que llega a la muestra y al detector. Las fuentes de ir más comunes son:

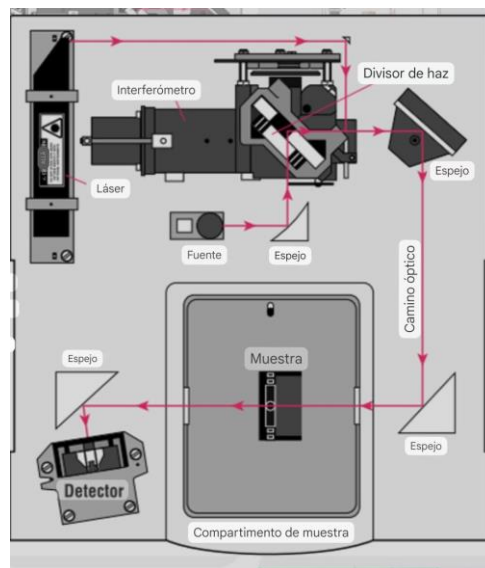
- Varillas de carburo de silicio: A través de la varilla pasa una corriente eléctrica que se calienta a  $1300\text{ K}$  y emite grandes cantidades de radiación IR.
- Bobina de alambre de nicromo: Este lo utilizaban anteriormente y eran muy populares para emitir radiación IR ya que no requerían de enfriamiento, pero resultó que emite menor cantidad de radiación de infrarrojos.

- Nernst Glowers: Se fabrican a partir de una mezcla de óxidos refractorios y son capaces de alcanzar a temperaturas más altas, sin embargo, no son capaces de producir IR por encima de  $2000\text{ cm}^{-1}$  (CHROMacademy, SF).

#### 4.16.1 Interferómetro

El primer interferómetro fue inventado por Albert Abraham Michelson que recibió el premio Nobel en 1907. Sin esta pieza esencial de equipo óptico, el sistema de FTIR moderno no existiría, el interferómetro consta de un divisor de haz, un espejo fijo y un espejo móvil (CHROMacademy, SF)

Figura 11. Esquema operativo de un instrumento de FTIR



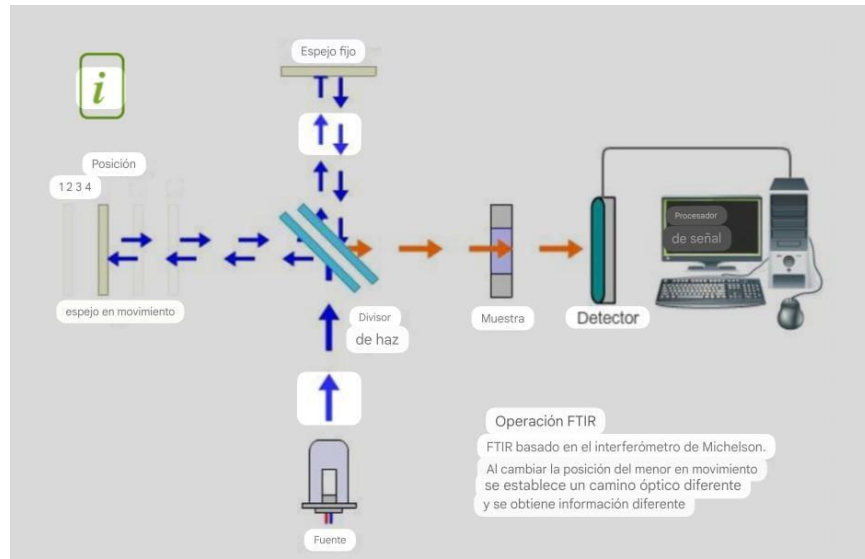
(CHROMacademy, SF)

#### 4.16.2 Operación FTIR

La espectrometría FTIR permite escanear todas las frecuencias infrarrojas simultáneamente lo que permite recopilar datos en cuestión de segundos en lugar de varios minutos. Esto se logra mediante el uso de un dispositivo óptico llamado interferómetro que produce una señal que se compone de todas las frecuencias infrarrojas (CHROMacademy, SF)

La mayoría de los interferómetros constan de un divisor de haz que divide el haz infrarrojo incidente en dos haces ópticos separados. Un haz refleja desde un espejo fijo, mientras que el otro haz se refleja desde un espejo que se mueve constantemente en el instrumento. El espejo móvil normalmente se mueve sólo unos pocos milímetros desde el divisor de haz (CHROMacademy, SF)

Figura 12. FTIR basado en el interferómetro de Michelson



(CHROMacademy, SF)

Los dos haces se reflejan en sus respectivos espejos y se recombinan en el divisor de haz. La longitud de haz que se refleja en el espejo fijo permanece constante, mientras que la longitud del recorrido del haz que se refleja en el espejo en movimiento cambia constantemente a medida que el espejo se mueve. La señal que sale del interferómetro es el resultado de la interferencia de los dos haces entre sí y se llama interferograma (CHROMacademy, SF)

El interferograma es único porque cada punto de datos, que es una posición del espejo en movimiento tiene información sobre cada frecuencia infrarroja emitida desde la fuente, esto permite medirlas simultáneas. Luego se convierte en un espectro IR más familiar (número de onda frente % de transmitancia) utilizando la conocida transformada de Fourier (CHROMacademy, SF)

Figura 13. Interferograma de un espectrofotógrafo FTIR



(CHROMacademy, SF)

## V. ANTECEDENTES

### 5.1 CARACTERIZACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO PRODUCIDO A PARTIR DE RESIDUOS DE CAFÉ POR ACTIVACIÓN QUÍMICA Y FÍSICA

Según Javier Sánchez Aznar en el año 2011, evaluó los diferentes resultados entre la activación química utilizando como agente Ácido Fosfórico y física utilizando vapor como gas oxidante a partir de residuos de café. Obteniendo resultados diferentes según el método de activación empleado, comenzando con la pérdida del porcentaje de compuestos volátiles teniendo un mayor valor el método físico que el químico (Aznar, 2011).

Para el área superficial se utilizó el método BET se utilizaron diferentes concentraciones de Ácido Fosfórico, determinando que la solución al 40% y a una temperatura de 600°C mostraron mejores resultados conduciendo a una mayor porosidad y capacidades de adsorción con un valor alrededor de 690m<sup>2</sup>/g. A comparación de la activación física con vapor que se obtuvo rendimientos más bajos y contenidos de cenizas más altos (Aznar, 2011).

### 5.2 PRODUCCIÓN DE CARÓN ACTIVADO A PARTIR DE RESIDUOS DE CAFÉ UTILIZANDO MÉTODO QUÍMICO Y FÍSICO

Según Yuliusmann Yuliusmann en el año 2017, elaboró carbón activado a partir de residuos de café, secándolos para reducir varios componentes como vapor, compuestos volátiles y lignocelulósicos. Luego se activó mediante activación química con Cloruro de Zinc y por activación física con Dióxido de Carbono a 600°C (Yulisman, y otros, 2017).

Se analizó el carbón activado por medio de la prueba del número de Yodo y por una relación lineal se determinó el área superficial obteniendo un mejor valor por la activación química siendo de 432.60m<sup>2</sup>/g, en comparación de la activación física con un valor de 405.68m<sup>2</sup>/g (Yulisman, y otros, 2017).

### 5.3 PREPARACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE RESIDUOS DE CAFÉ COMO UN ADSORBENTE PARA REMOVER CROMO (III) DEL AGUA

Según Adolfo Valdivia, Carlos Osorio y Yolanda Vargas en el año 2020, se logró obtener carbón activado por tratamiento térmico calcinándolo a 900°C y luego activándolo con Ácido Sulfúrico 10% y calentándolo a 65°C a partir de los residuos de café. El carbón fue filtrado y lavado agua desionizada y secado a 110°C por una hora, determinando que las condiciones óptimas para su adsorción es a un pH 3 obteniendo un área superficial de 1365.79 m<sup>2</sup>/g (Valdivia, 2020)

## VI. METODOLOGÍA

### 6.1 MATERIALES

#### 6.1.1 Reactivos

- a. Aluminio
- b. Solución de yodo 0.1N
- c. Tiosulfato de sodio 0.1N
- d. Ácido clorhídrico 5%
- e. Yodato de potasio 0.1N
- f. Yoduro de potasio 0.1N
- g. Azul de metileno
- h. Cloruro de zinc 1M

#### 6.1.2 Cristalería

- a. Pipetas 1,2,5 y 10mL
- b. Probetas de 25mL, 50mL y 100mL
- c. Kit de destilación
- d. Balón aforado de 10mL, 25mL,100mL y 500mL
- e. Embudo
- f. Bureta 50mL
- g. Erlenmeyers 50 y 125mL

#### 6.1.3 Equipos y materiales

- a. Balanza analítica
- b. Estufa eléctrica
- c. Pizeta
- d. Cubetas de 20L
- e. Reactor para pirólisis
- f. Horno eléctrico
- g. Cámara de pirólisis
- h. Mangueras
- i. Papel filtro
- j. Soporte universal
- k. Balanza de medición de humedad
- l. Fibras para microextracción en fase sólida

- m. Cromatógrafo de gases por ionización de llama
- n. Analizador elemental
- o. Espectrofotómetro infrarrojo con transformada de Fourier y Reflectancia total atenuada

## 6.2 MÉTODO

### 6.2.1 DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE MUESTRA

**Cálculo de tamaño de muestra.** Realizar el cálculo de muestra desconociendo el tamaño de la población utilizando la ecuación que se muestra a continuación:

$$n = \frac{Z_a^2 * p * q}{d^2}$$

(Montesinos, 2010)

Donde:

$Z_a^2$ = nivel de confianza (2.58 equivalente al 99% de confianza)

p= probabilidad de éxito (por lo general 95%)

q= probabilidad del fracaso (por lo general 5%)

d= precisión (error máximo admisibles de proporción, por lo general 30%)

### 6.2.2 RECOLECCIÓN DE LOS RESIDUOS DE CAFÉ

1. Se encendió la máquina de expreso.
2. Se preparó la bebida líquida del café con el método a utilizar.
3. Se retiró el portafiltro de la máquina de expreso.
4. Se separó los residuos de café del portafiltro.
5. Se colocó los residuos de café en un recipiente plástico.
6. Se recolectó los residuos de café por un máximo de 2 días a temperatura ambiente, para evitar descomposición.

### 6.2.3 TRANSPORTE DE LOS RESIDUOS DE CAFÉ

1. Se colocó los recipientes de plástico con los residuos de café en el camión con refrigeración
2. Se colocó la refrigeración entre 4°C a 8°C.
3. Se trasladó los residuos de café al sitio de proceso de la operación (el tiempo de traslado no debe ser mayor de 5 horas desde la recolección de los residuos de café).

4. Se descargó los recipientes de plástico con los residuos de café.

#### **6.2.4 ALMACENAJE DE LOS RESIDUOS DE CAFÉ**

1. Se ingresó los residuos de café a la cámara de refrigeración para aumentar vida útil
2. Se colocó la refrigeración entre 8°C a 4°C.
3. Se almacenó los residuos de café por un máximo de 1 semana a 1 semana y media.
4. Se ingresó los residuos de café al proceso de secado.

#### **6.2.5 PORCENTAJE DE RESIDUOS DE CAFÉ**

Se realizó la determinación de porcentaje de humedad por medio de balanza de humedad por método para café final seco a 110°C.

##### **Medición de porcentaje de humedad**

1. Se limpió la bandeja con una brocha especial.
2. Se encendió la balanza de humedad Ohaus.
3. Se colocó el método para café final seco a 110°C.
4. Se elaboró un plato de aluminio y se colocó la muestra.
5. Se colocó el plato de aluminio dentro de la balanza y se taró.
6. Se colocó 1gr de residuos de café y se cerró el equipo.
7. Se inició la medición.
8. Se anotó el valor de humedad.
9. Se apagó el equipo y se limpió la bandeja.

#### **6.2.6 RESIDUOS DE CAFÉ SECOS**

**Secado de residuos de café.** Se realizó el secado de residuos de café como se describe a continuación:

1. Se encendió el horno eléctrico.
2. Se precalentó el horno a 110°C.
3. Se pesó la muestra de residuos de café.
4. Se colocó los residuos de café en bandeja de horno.
5. Se abrió el horno y se midió la temperatura.
6. Se colocó la bandeja con los residuos de café en el horno y se cerró.
7. Se esperó 3 horas, controlando la temperatura.
8. Se sacó la bandeja de horno y se apagó el horno eléctrico.
9. Se encendió la balanza analítica.
10. Se pesó la bandeja de horno con residuos de café.
11. Se pesó la bandeja de horno.

12. Se anotó los pesos para obtener la cantidad de residuos de café secos.

**Porcentaje de humedad de residuos de café secos.** Se realizó el porcentaje de humedad de residuos de café secos como se describe a continuación:

1. Se limpió la bandeja con una brocha especial.
2. Se encendió la balanza de humedad Ohaus.
3. Se colocó el método para café final seco a 110°C.
4. Se realizó un plato de aluminio para colocar la muestra.
5. Se colocó el plato de aluminio dentro de la balanza y se taró.
6. Se colocó 1gr de residuos de café seco y se cerró el equipo
7. Se inició la medición.
8. Se anotó valor de humedad.
9. Se apagó el equipo y se limpió la bandeja.

### **6.2.7 ACTIVACIÓN QUÍMICA DEL CARBÓN**

1. Se realizó una solución de 1M de Cloruro de Zinc, se agregó 10mL por cada gramo de carbón.
2. Se agitó la solución y se dejó reposar por 24 horas.
3. Se colocó el carbón en un filtro y se limpió con agua del chorro.
4. Se colocó el carbón activado en una bandeja para horno.
5. Se encendió el horno eléctrico Oviedo y se precalentó a 80°C.
6. Se colocó la bandeja con carbón activado a 80°C por dos horas.
7. Se retiró la bandeja con carbón activado y se apagó el horno eléctrico.
8. Se encendió la balanza analítica.
9. Se pesó la muestra y se anotó el dato.

### **6.2.8 DETERMINACIÓN DE ADSORCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO**

#### **Estandarización de tiosulfato de sodio**

1. Se encendió la balanza analítica.
2. Se pesó 0.35677g de yodato de potasio, se diluyó y se aforó con agua en un balón volumétrico de 100mL.
3. Se pesó 1g de yoduro de potasio con 12.5mL de solución de yodato de potasio realizada anteriormente y 2.5mL de ácido clorhídrico concentrado.
4. Como indicador se pesó 1g de almidón, se diluyó y se aforó con agua en un balón volumétrico de 100mL.
5. Para la solución de tiosulfato de sodio 0.1N se pesó 12.5g, se diluyó y se aforó con agua en un balón volumétrico de 500mL.



6. Se colocó la solución de tiosulfato de sodio en una bureta de 50mL.
7. Se tituló solución de yodato y yoduro de potasio preparada en el paso 3.
8. Se anotó el volumen utilizado de tiosulfato de sodio.
9. Se calculó la concentración de tiosulfato de sodio.

$$N_1 = \frac{(P * R)}{S}$$

(ASTM D4607-94, 2011)

*Donde:*

$N_1$  = Normalidad de tiosulfato de sodio, N

$P$  = Volumen de yodato de potasio, mL

$R$  = Normalidad de yodato de potasio, N

$S$  = Volumen de tiosulfato de sodio, mL

#### **Estandarización de solución de yodo**

1. Se colocó 10mL de solución de yodo en un Erlenmeyer de 50mL.
2. Se colocó solución de tiosulfato de sodio en bureta de 50mL.
3. Se tituló con solución de tiosulfato de sodio.
4. Se anotó el volumen utilizado y se realizó el cálculo.

$$N_2 = \frac{(S * N_1)}{I}$$

(ASTM D4607-94, 2011)

*Donde:*

$N_1$  = Normalidad de tiosulfato de sodio, N

$I$  = Volumen de solución de yodo, mL

$N_2$  = Normalidad de solución de yodo, N

$S$  = Volumen de tiosulfato de sodio, mL

#### **Determinación de número de yodo**

1. Se encendió la balanza analítica.
2. Se pesó 1.5g de carbón activado y se colocó en un Erlenmeyer de 125mL.

3. Se pipeteó 1mL de ácido clorhídrico al 5% en el paso 2.
4. Se ebulló la solución por 30 segundos, se retiró y se dejó enfriar a temperatura ambiente.
5. Se colocó 10mL de solución de yodo en paso 4 y se agitó por 30 segundos.
6. Se filtró la solución y se colocó en un Erlenmeyer de 125mL.
7. Se tituló solución con tiosulfato de sodio.
8. Se anotó el volumen tiosulfato de sodio utilizado y se calculó el número de yodo.

$$\frac{X}{M} = \frac{[A - (DF)(B)(S)]}{M}$$

(ASTM D4607-94, 2011)

*Donde:*

*A = Normalidad de yodo \* 12693*

*DF = Factor de dilución*

*B = Normalidad de yodato de potasio \* 126.93*

*M = Peso de carbón activado, g*

*X = Peso de yodo adsorbido, mg*

*S = Volumen de tiosulfato de sodio, mL*

### **Determinación de área superficial**

Para convertir el número de yodo en área superficial se utilizó una regresión lineal que hace referencia al ASTM D-4607-94, siendo la siguiente ecuación:

$$\text{Número de Yodo} = 0.6366 * \text{Área Superficial} + 174.34$$

### **Decoloración de azul de metileno**

1. Se agregó 35 gotas de azul de metileno en 150mL de agua.
2. Se realizó soluciones a diferentes concentraciones y se realizó una curva de calibración.
3. Se obtuvo concentración de solución inicial y se anotó.
4. Se agregó 1g de carbón activado a solución de paso 1 y se agitó levemente.
5. Se dejó carbón activado con solución de metileno y se tomó alícuotas de 1mL a diferentes tiempos hasta 75 minutos.
6. Se colocó filtro de café en un embudo y se colocó la alícuota del paso 5.
7. Se obtuvo el filtrado y se midió absorbancia.

8. Se midió la absorbancia en distintos tiempos y se graficó la decoloración de azul de metileno.

## 6.2.9 CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DE CARBÓN ACTIVADO

### Porcentaje de humedad

1. Se limpió la bandeja con una brocha especial.
2. Se encendió balanza de humedad Ohaus.
3. Se colocó el método para café final seco a 110°C.
4. Se realizó un plato de aluminio para colocar la muestra.
5. Se colocó plato de aluminio dentro de la balanza y se taró.
6. Se colocó 1gr de residuos de carbón activado y se cerró el equipo.
7. Se inició la medición.
8. Se anotó valor de humedad.
9. Se apagó equipo y se limpió la bandeja.

### Densidad aparente

1. Se limpió la bandeja con una brocha especial.
2. Se encendió la balanza analítica.
3. Se pesó una probeta de 25mL.
4. Se anotó el peso.
5. Se colocó la muestra de carbón activado y se llenó hasta 5mL.
6. Se golpeó levemente la probeta varias veces y se llenó nuevamente hasta 5mL.
7. Se pesó la probeta con carbón activado.
8. Se anotó el dato y se calculó densidad aparente.

$$\rho = \frac{M}{V}$$

(SADSDC,2009)

*Donde:*

$\rho$  = Densidad aparente, g/mL

$M$  = Peso de muestra, g

$V$  = Volumen donde se encuentra la muestra, mL

## VII. RESULTADOS

Cuadro 3. Porcentaje de humedad de residuos de café húmedos y secos

<b>Descripción</b>	<b>Resultado (Promedio ± SD)</b>	<b>Diferencia</b>
Porcentaje de humedad de residuos de café húmedos	54.055%±3.4166%	51.175%±2.4276%
Porcentaje de humedad de residuos de café secos	2.88%±0.989%	

Descripción: Estos datos fueron medidos en cuadruplicado y se reporta el resultado promedio del porcentaje de humedad.

Cuadro 4. Área total de los picos cromatográficos obtenidos de los compuestos volátiles de residuos de café húmedos y secos

<b>Descripción</b>	<b>Resultado (Promedio ± SD)</b>	<b>Diferencia</b>
Área total de residuos de café húmedos	627.7814 UA±263.1162 UA	370.9312 UA ±114.0596 UA
Área total de residuos de café secos	261.8501 UA±168.1576 UA	

Descripción: Estos datos fueron medidos en cuadruplicado y se reporta el resultado promedio del área de compuesto volátiles.

Cuadro 5. Rendimiento másico de sólido obtenido después de la pirólisis a partir de posos de café secos

<b>Peso de posos de café secos (Promedio ± SD)</b>	<b>Peso de carbón (Promedio ± SD)</b>	<b>Rendimiento del sólido (Promedio ± SD)</b>
132.2g±8.79g	90.55g±6.56g	68.495%±1.353%

Descripción: Estos datos fueron medidos en cuadruplicado y se reporta el resultado promedio de la de los pesos y rendimiento del sólido de la pirólisis.

Cuadro 6. Rendimiento másico de carbón activado por método químico activado con cloruro de zinc.

<b>Peso de carbón (Promedio ± SD)</b>	<b>Peso de carbón activado (Promedio ± SD)</b>	<b>Rendimiento del sólido (Promedio ± SD)</b>
53.225g±2.396g	32.85g±2.228g	61.655%±3.323%

Descripción: Estos datos fueron medidos en cuadruplicado y se reporta el resultado promedio de la de los pesos y rendimiento del sólido de activación química.

Cuadro 7. Características del carbón activado a partir de posos de café

<b>Descripción</b>	<b>Resultado (Promedio ± SD)</b>	<b>Especificaciones</b>
Número de yodo	1313.556 mg/g±9.094 mg/g	1000 mg/g (mínimo)
Área superficial	1789.528 m <sup>2</sup> /g ±14.285 m <sup>2</sup> /g	1000 m <sup>2</sup> /g (mínimo)
Porcentaje de humedad	3.65%±0.33%	8% (máximo)
Densidad aparente	0.4235 g/mL ±0.0534 g/mL	0.45 g/mL – 0.52 g/mL
Relación de concentración de Azul de metileno vs absorbancia	y= -0.0312x+6.3087 R <sup>2</sup> = 0.9077	

Descripción: Estos datos fueron medidos en cuadruplicado y se reporta el resultado promedio del número de yodo, área superficial, azul de metileno a través del tiempo, porcentaje de humedad y densidad aparente.

Cuadro 8. Bandas del espectro infrarrojo características del carbón activado a partir de residuos de café

<b>No.</b>	<b>Número de onda de la banda (1/cm)</b>	<b>Grupo</b>
1	3378.60	Alifáticos y aromáticos
2	2919.18	Alifáticos
3	2850.16	Alifático
4	1614.78	Alqueno
5	1539.12	Alqueno
6	1436.82	Alqueno
7	1171.57	Alifático

Descripción: Estos datos fueron medidos por espectro infrarrojo.

## VIII. DISCUSIÓN

Para la producción de carbón activado por medio de pirólisis de residuos de café fue necesario disminuir la cantidad de humedad a la materia prima, para luego realizar el proceso de pirólisis extrema con el objetivo de obtener la mayor cantidad de carbono y de último su activación por medio de método químico con Cloruro de Zinc. Realizando distintas pruebas como el número de yodo, área superficial, azul de metileno, densidad aparente y humedad para determinar que se obtuvo carbón activado.

Los posos de café obtenidos de la tienda de coffee shop dentro de la Universidad del Valle de Guatemala es una materia prima que contiene un alto porcentaje de humedad con un valor de promedio  $54.055\% \pm 9.094$  determinado con la balanza de humedad como se observa en el Cuadro 3, por lo que fue necesario disminuir la cantidad de agua que contiene para poder realizar después la carbonización teniendo como valor máximo de humedad de 10%. Para eliminar el agua se colocó en cada proceso una bandeja con una cantidad de materia prima, llegando a una temperatura de  $110^{\circ}\text{C}$  utilizando un horno eléctrico por un tiempo de 3 horas. Con esto se volvió a determinar el porcentaje de humedad de la materia prima obteniendo un porcentaje de  $2.88\% \pm 0.989\%$ , disminuyendo así en un  $51.175\% \pm 2.4276\%$  la cantidad de agua que contenían los residuos de café inicial. Además, como se observa en el Cuadro 4, se realizó el perfil de compuestos volátiles para ver los distintos componentes que contienen los posos de café habiendo entre 25 hasta 29 de ellos (ver Figura 17 a 20), después de su secado se pudo observar una disminución del área de cada una de las muestras con un promedio de  $370.9312 \text{ UA} \pm 114.0596 \text{ UA}$ , donde se notó que en la muestra 1 presentó una menor disminución de los compuestos volátiles en comparación con las otras muestras. Esto debido a que no se realizó el precalentamiento antes de introducir los residuos de café, generando variaciones en la temperatura interna del horno provocando que el sistema no llegara a una temperatura uniforme y estable, afectando en la eficacia del proceso para la disminución del área del perfil de los compuestos volátiles.

Para el proceso de carbonización se requirió de una mufla y un reactor donde se colocaron los residuos de café secos utilizando una tasa de calentamiento lenta de 15 grados centígrados por 20 minutos para la obtención de la mayor cantidad de carbón o sólido de interés de los tres productos de la pirólisis, teniendo una duración de las cuatro corridas de 4 horas y 40 minutos, dejando a una temperatura máxima de  $300^{\circ}\text{C}$  por una hora para maximizar la producción del sólido. Al finalizar el proceso se determinó el rendimiento de los residuos de café con un  $68.495\% \pm 1.353\%$  de carbón como se observa en el Cuadro 5. Durante la experimentación en el proceso de condensación se presenció un arrastre de cera aproximadamente a los  $257^{\circ}\text{C}$  ocasionando que el rendimiento del carbón se viera disminuido. Otros de los productos que se obtuvieron fue el bioaceite con un porcentaje de 28.62% y los gases no condensables con un porcentaje de 2.88%, en el cual se obtuvo este último a base de la diferencia de la muestra con los otros productos. Donde estos dos productos se pueden utilizar como biocombustible líquido y un gas combustible.

Se realizó un análisis elemental a los posos de café secos para poder determinar la cantidad de carbono que contenían, incinerando la muestra a 900°C en un analizador elemental, obteniendo un porcentaje de carbono orgánico de 60.73% y contenido de nitrógeno orgánico de 2.63% proporcionando una referencia inicial sobre la composición química de los posos de café secos. Analizando los resultados obtenidos después de la pirólisis sobre el porcentaje de carbono orgánico de 60.73%, se observó una ligera discrepancia de 7.765% en los resultados en comparación con el análisis elemental. Esta diferencia se debió a las distintas condiciones que se llevó a cabo la pirólisis, con una temperatura más baja y una mayor cantidad de muestra, explicando el por qué el resultado de contenido de carbono fue mayor, pero sin afectar la cantidad obtenida durante la pirólisis. Por lo cual después del proceso de pirólisis se confirma que se obtuvo un alto porcentaje de carbono, siendo esto adecuado para realizar el carbón activado a partir de los residuos de café.

Para la activación del carbón obtenido, se utilizó como agente activante Cloruro de Zinc, a concentración 1M, por su gran capacidad para mejorar la adsorción. Se agregó 10mL por cada gramo de carbón, dejando la solución por un día para lograr mayor contacto entre ambos. Luego se eliminó la solución restante de Cloruro de Zinc y cenizas utilizando un filtro comercial y se colocó la masa sobrante en un horno eléctrico llevándolo a una temperatura de 80°C por dos horas. Después de secarlo, se disminuyó el tamaño de partícula de malla 100 a 150 para tener un tamaño uniforme y mejorar la capacidad de adsorción, en la cual como se observa en el Cuadro 6 se obtuvo un rendimiento de  $61.655\% \pm 3.323\%$  de carbón activado a partir del carbón.

Con la obtención de carbón activado a partir de residuos de café se realizaron pruebas para determinar si cumplen con sus características necesarias para poder usarse comercialmente. La primera es el número de yodo en el que se basó a partir de la norma ASTM 4607-94 siendo un índice del área superficial y relativo de la porosidad en un carbón activado donde el yodo se adsorbe con mucha eficiencia y su tamaño permite alojarse hasta en los poros más pequeños. Para su determinación se utilizó una solución estandarizada de tiosulfato de sodio 0.094N y solución de yodo 0.1631N, con el cálculo 5 que se encuentra en los anexos, se obtuvo un valor de 1313.556 mg/g  $\pm 9.094$  mg/g que al compararse con el rango teórico de 600 hasta 1500mg/g, cumple. Como el número de yodo está relacionado con el área superficial, este se obtuvo a partir de una regresión lineal obtenida a partir de la norma ASTM D4607-94 según Yulismann como se observa en el cálculo 6, en la cual se obtuvo un valor de  $1789.528 \text{ m}^2/\text{g} \pm 14.285 \text{ m}^2/\text{g}$  donde el rango de un carbón activado debe de estar entre 500 a  $2500 \text{ m}^2/\text{g}$ .

Otra forma para observar la capacidad de adsorción de carbón activado fue realizando la prueba de azul de metileno, en el cual se quería observar su comportamiento en el tiempo. Para esto se inició con una solución de azul de metileno 6.46mg por 1L de agua. Se realizó una curva de calibración a diferentes concentraciones y se leyó su absorbancia en el espectrofotómetro de arreglo de diodos como se observa en el Cuadro 17. Se tomaron 8 Erlenmeyers, se les agregó 1gr

de carbón activado a cada uno, se le agregó una alícuota de la solución de azul de metileno y se esperó en diferentes tiempos como se observa en el Cuadro 21, se filtró y se leyó la absorbancia de la solución. Luego de 75 minutos se alcanzó una concentración final de 4.125mg/L para la decoloración de azul de metileno como se observa en la Figura 25. La filtración se llevó a cabo con filtros de café ya que el filtro Whatman No. 6 adsorbía el color del azul de metileno. Con los valores de tiempo y concentración de azul de metileno se obtuvo una ecuación lineal de  $y = -0.0312x + 6.3087$  con  $R^2$  de 0.9077 indicando lo cercano que se ajusta los datos reales a la regresión, siendo ideal para poder predecir el comportamiento del carbón activado en el tiempo con el azul de metileno.

Las siguientes pruebas que se le hicieron al carbón activado fueron fisicoquímicas como el porcentaje de humedad, utilizando la balanza de humedad, obteniendo un valor de  $3.65\% \pm 0.33\%$ , estando dentro del rango, la cual es de 0% hasta 6.97%, siendo importante porque puede afectar su capacidad de adsorción de diferentes compuestos. Luego se analizó la densidad aparente donde se utilizó una probeta y a un volumen de 5mL se obtuvo un valor de  $0.4235 \pm 0.0534 \text{g/mL}$  encontrándose dentro del rango entre 0.4 a 0.6g/mL.

Se realizó un espectro infrarrojo por transformada de Fourier para identificar su composición química con los grupos funcionales superficiales que están presentes en el carbón activado donde se observa un estiramiento de grupo  $-\text{OH}$  en el pico  $3378.60 \text{ cm}^{-1}$ , dos grupos C-H alifáticos en los picos  $2919.18$  y  $2850.16 \text{ cm}^{-1}$ , tres grupos de alquenos C=C-O en los picos  $1614.78$ ,  $1539.12$  y  $1436.82 \text{ cm}^{-1}$  y un grupo alifático R-O-R en el pico  $1171.57 \text{ cm}^{-1}$ . Características de grupos funcionales que adquiere el carbón activado, especialmente cuando su activación es por medio químico, en este caso con Cloruro de Zinc, realizando reacciones de deshidrogenación y oxidación permitiendo que el carbón activado obtenga una mejor interacción de adsorción con las moléculas.

Con los datos obtenidos de adsorción con el número de yodo, área superficial y azul de metileno, y con los datos obtenidos fisicoquímicos de la humedad, la densidad aparente y el infrarrojo por transformada de Fourier, se determinó que a partir de la pirólisis de residuos de café se logró obtener por medio de método químico, utilizando como agente activante Cloruro de Zinc a 1M, un carbón activado de uso comercial.

Durante el desarrollo del estudio se ha observado la importancia de controlar la temperatura en el proceso de secado en las futuras experimentaciones, donde se realicen pruebas utilizando un secador que permita mantener una temperatura constante, garantizando así la eliminación eficiente de los compuestos volátiles y por consiguientes de la humedad requerida en el menor tiempo posible. Para la pirólisis de residuos de café se sugiere limitar la temperatura máxima de operación a  $257^\circ\text{C}$ , ya que a estas condiciones inicia la descomposición de la materia convirtiéndolos en cera y provocando la pérdida de los compuestos de interés para la producción de carbón activado.



## IX. CONCLUSIONES

- Se logró obtener carbón activado a partir de posos de café para uso comercial cumpliendo los parámetros necesarios para su uso.
- En los residuos de café obtenidos del coffee shop dentro de la Universidad del Valle de Guatemala se logró disminuir el porcentaje de humedad de 56% a 4% y disminuir el área de compuestos volátiles a 627.7814 UA a 261.8501 UA eliminando hasta 21 compuestos volátiles para poder ingresarlo al proceso de pirólisis extrema.
- Mediante la pirólisis extrema a 300°C a una tasa de calentamiento lento de 15 minutos por 20°C, se determinó que el rendimiento másico de carbón a partir de los posos de café fue de 68.365%.
- Se determinó por el método ASTM 4607-94 que el número de yodo y el área superficial para el carbón activado a partir de posos fue de 1313.556±9.094mg/g y 1789.528±14.285m<sup>2</sup>/g, respectivamente. Determinando que se obtuvo carbón activado a partir de residuos de café. Además se logró la decoloración del azul de metileno por medio del carbón activado llegando una concentración final de 4.125mg/L después de 75 minutos obteniendo así una ecuación de  $y = -0.0312x + 6.3087$  con un R<sup>2</sup> de 0.9077. Por último, se determinó por la espectroscopía IR que el carbón activado presenta grupos funcionales OH, C-H, C=C-O y R-O-R por la activación química con Cloruro de Zinc. Además, se determinó que contiene una humedad de 3.66%±0.33% y una densidad aparente de 0.4235±0.0534g/mL.

## **X. RECOMENDACIONES**

- Se recomienda utilizar un secador como equipo para que la temperatura no varíe y se pueda eliminar la mayor cantidad de compuestos volátiles y llegar a la humedad requerida en el menor tiempo posible.
- Para la pirólisis se recomienda llegar como temperatura máxima de la operación a 257°C ya que a estas condiciones comienza a arrastrar sólido de los posos de café convirtiéndose en cera y perdiendo el producto de interés para el carbón activado.
- Se recomienda realizar una comparación de la activación por medio de otros agentes activantes como Hidróxido de Potasio, Hidróxido de Sodio, Ácido Fosfórico y Ácido Clorhídrico para determinar si se tiene una mejor capacidad de adsorción con algunos de estos reactivos.
- Se recomienda realizar más pruebas al carbón activado obtenido a partir de posos de café para determinar su eficiencia de adsorción y desorción en las distintas aplicaciones industriales que se requiera.

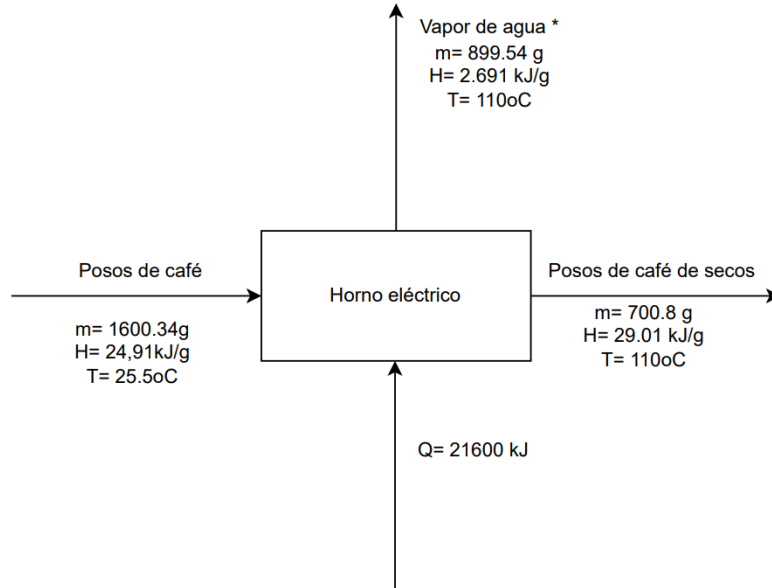
## XI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allwar, A. N. (2008). Textural Characteristics of Activated Carbons Prepared from Oil Palm Shells Activated with ZnCl<sub>2</sub> and Pyrolysis Under Nitrogen and Carbene Dioxide. *Ohysical Science*, 93-104.
- Asociación Nacional del Café (ANACAFE). (2021). *La importacia del café en la economía de Guatemala: Productividad, SOstenibilidad, Migración y Huella*. Ciudad de Guatemala: Central American Bussiness Intellifence (CABI).
- Aznar, J. (2011). *Characterization of activated carbon produced from coffee residues by che,ical and physical activation*. Estocolmo: Chemical Science and Engineering.
- Barquero, M. (2006). *Pincipios y aplicaciones de la cromatografía de gases*. San José Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- Basu, P. (2013). *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction*. San Diego : El Sevier.
- Blinova, L., & Sirotiak, A. (2017). *Utilization of waste coffee production*. Trnava: Faculty of MAterial Science and Technology.
- Blinová, L., Sirotiak, A., & Solda, M. (2017). Utilization of waste coffe production. *Faculty of materials science and technology in Trnava*, Volumen 25, Number 40.
- Burgos, U. d. (4 de Marzo de 2020). *Microanálisis Elemental (CHNS)*. Obtenido de <https://www.ubu.es/parque-cientifico-tecnologico/servicios-cientifico-tecnicos/analisis-elemental/microanalisis-elemental-chns>
- CHROMacademy. (SF). *Introduction to IR Spectroscopy*. Obtenido de <https://www.chromacademy.com/channels/spectroscopy-training-courses/principles/introduction-to-ir-spectroscopy/>
- Escuela Politecnica de Sevilla. (SF). *Manual del carbón activo*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Farrera, R., Marroquín, C., Cid, M., Dávila, E., García, H., & Méndez, M. (2017). Producción de carbon activado a escala laboratorio a partir de residuos de café. *Pakbal*, 40-44.
- Geocities. (Octubre de 2009). *Carbón Activado*. Obtenido de <https://www.oocities.org/edrochac/sanitaria/carbonactivado.htm>
- GGC. (2017). *Carbotecnia*. Obtenido de <https://carbotecnia.info> ventas@carbotecnia.com.mx
- Groso, G. (1997). *El carbón activado granular en el tratamiento del agua*. Madrid: Aconcagua .
- Kwiatkowski, J. F. (2012). *Activated carbons; Clasifications, properties and applications*. Nueva York: Nova.
- Long, Y. J. (2019). Removal of Pb (II) from aqueos by hydroxyapatite/carbon composite: Preparation and adsorption behavior. *Engineering aspectd*, 471-479.

- Martínez, J., & Iriondo, C. (2013). *Fuerzas intermoleculares*. Obtenido de [https://ocw.ehu.eus/pluginfile.php/43173/mod\\_resource/content/1/TEMA\\_5\\_v5.pdf](https://ocw.ehu.eus/pluginfile.php/43173/mod_resource/content/1/TEMA_5_v5.pdf)
- MERCK. (SF). *Microextracción en fase sólida (SMPE)*. Obtenido de <https://www.sigmaaldrich.com/GT/es/applications/analytical-chemistry/sample-preparation/solid-phase-microextraction>
- Ministerio de Economía de Guatemala. (12 de marzo de 2019). *Ministerio de Economía de Guatemala*. Obtenido de [https://www.mineco.gob.gt/sites/default/files/cafe\\_en\\_guatemala.pdf](https://www.mineco.gob.gt/sites/default/files/cafe_en_guatemala.pdf)
- Montesinos, O. E. (2010). *Muestreo estadístico*. Colima: Textos Universitarios.
- Mussato, S. M. (2011). 2011. *Food and Bioprocess Technology*, 661-672.
- Nogúes, S., García, D., & Rezeau, A. (2010). *Energía renovables. Energía de la biomasa (volumen I)*. Zaragoza: Pressas Universitarias de Zaragoza.
- Ospina, L. (2001). *Características físico mecánicas y análisis de calidad de granos*. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia.
- Prías, J., Rojas, C., Echeverry, N., Fonthal, G., & Calderón, H. (2011). Identificación de las variables óptimas para la obtención de carbon activado a partir del precursor GUADA ABGUSTIFOLIA KUNTH. *Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, Volumen 35. No. 135.
- Rocher, V. S. (2008). Removal of organic dyes by magnetic alginate beads;. *Water research*, 1290-1298.
- Sevilla, U. (2011). *Manual del carbón activado*. Obtenido de <http://www.elaguapotable.com/Manual%20del%20carb%C3%B3n%20activo.pdf>
- Skoog, D. W. (2015). *Fundamentos de química analítica*. Santa Fe: Cengage Learning.
- Valdivia, A. O. (2020). Preparation of Activated Carbon from Coffee Waste as an Adsorbent for the Removal of Chromium (III) from water. *MDPI*, 2-12.
- Yulisman, Y., Nasruddin, N., Afdhol, M., Haris, F., Amiliana, R., Hanafi, A., & Ramadhan, I. (2017). Production of activated carbon from coffee grounds using chemical and physical activation method. *American Scientific Publishers*, Vol 23, 5751-5755.

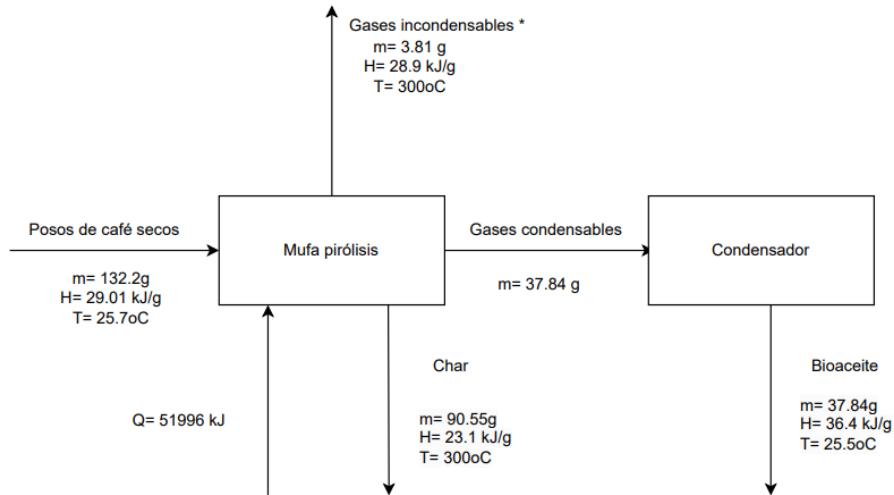
## XII. ANEXO

Figura 14. Balance de masa y energía para el secado de los posos de café



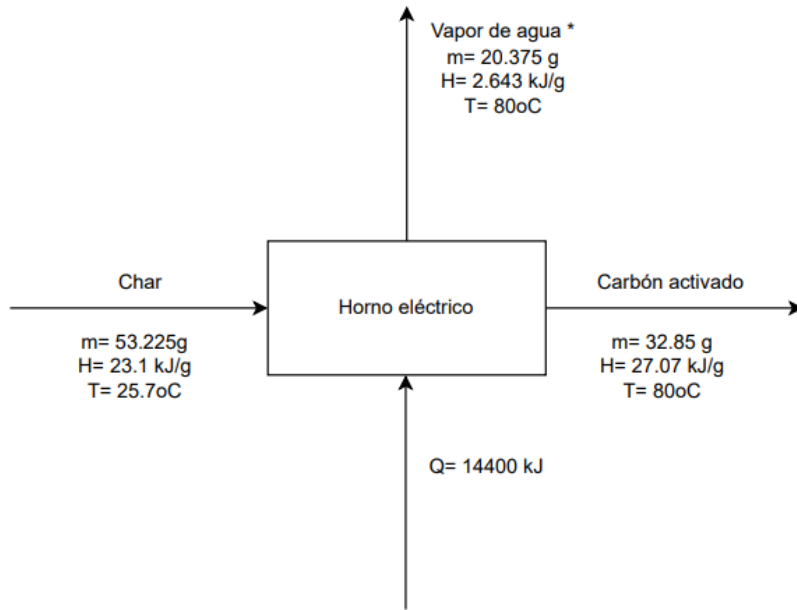
\*Se calculó por diferencia

Figura 15. Balance de masa y energía para la pirólisis de posos de café



\*Se calculó por diferencia

Figura 16. Balance de masa y energía de la activación química del carbón



\*Se calculó por diferencia

Figura 17. Cromatografía de gases con de detector de ionización de llama de posos de café 1

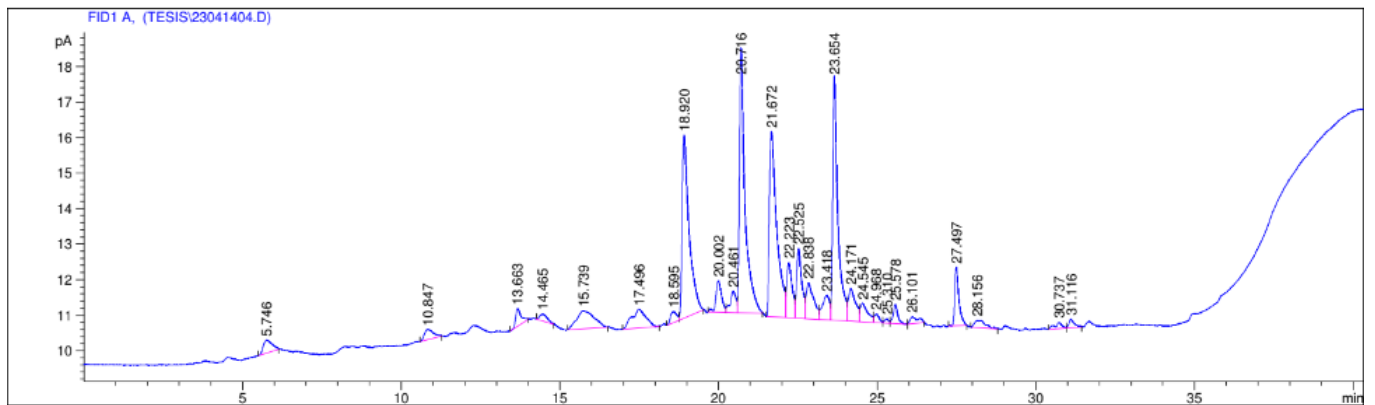


Figura 18. Cromatografía de gases con de detector de ionización de llama de posos de café 2

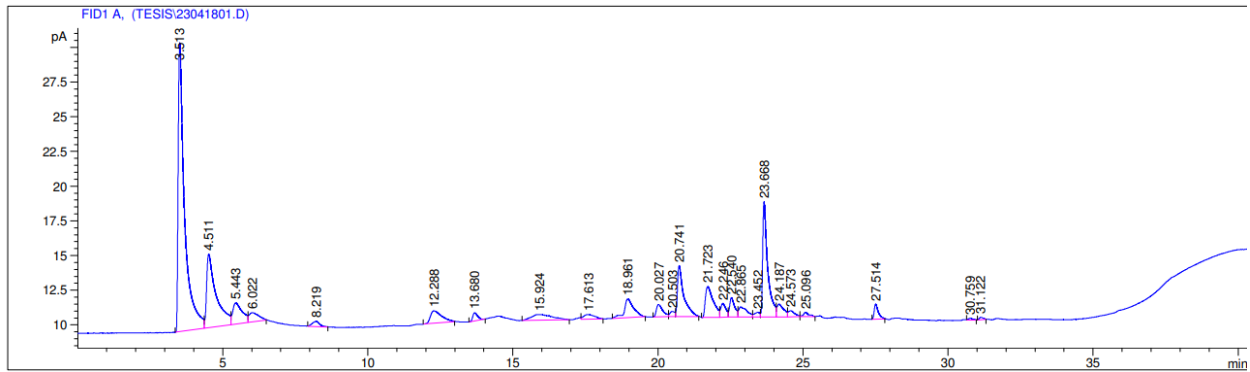


Figura 19. Cromatografía de gases con de detector de ionización de llama de posos de café 3

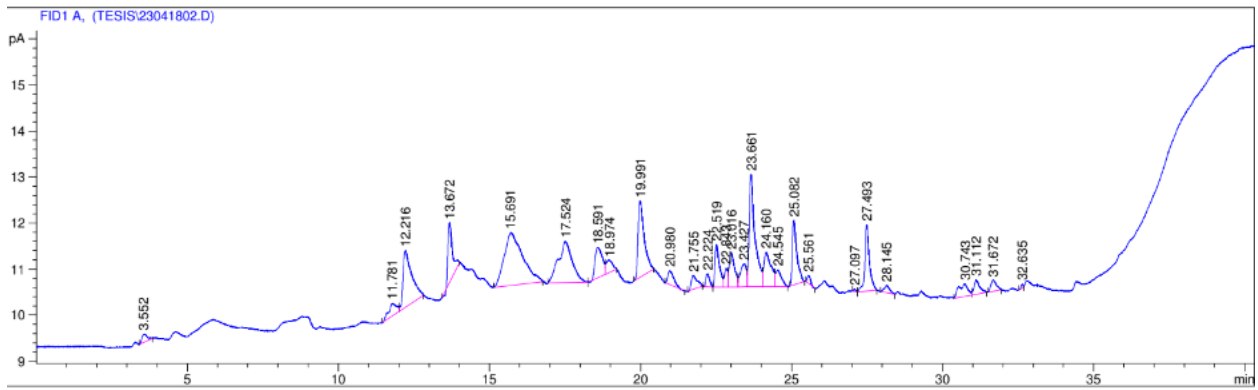


Figura 20. Cromatografía de gases con de detector de ionización de llama de posos de café 4

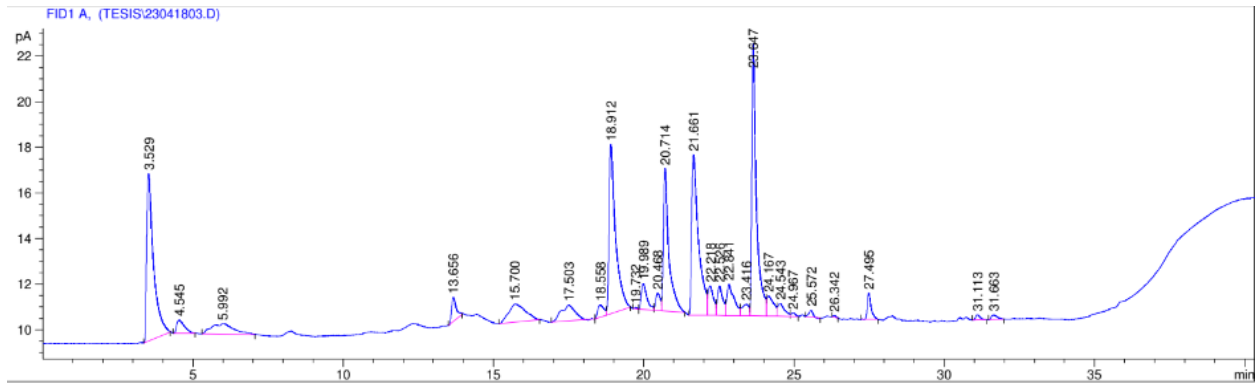


Figura 21. Cromatografía de gases con de detector de ionización de llama de posos de café secos 1

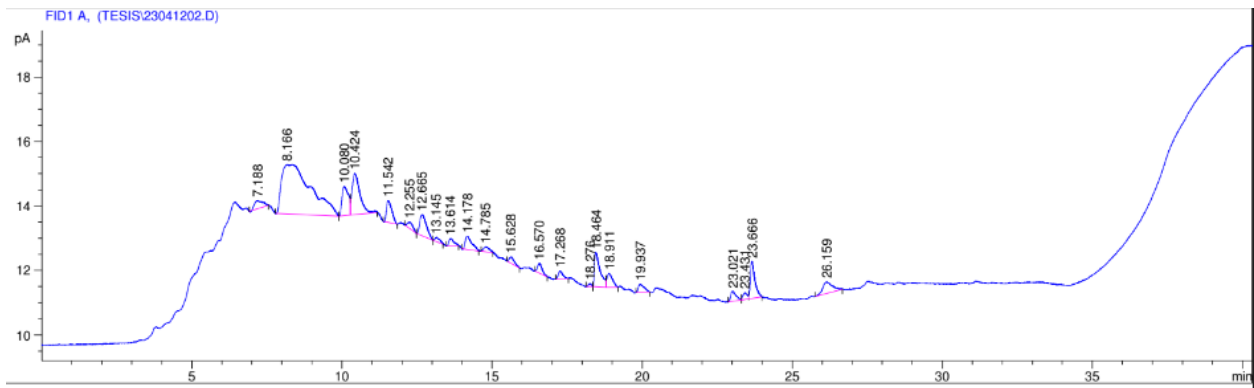


Figura 22. Cromatografía de gases con de detector de ionización de llama de posos de café secos 2

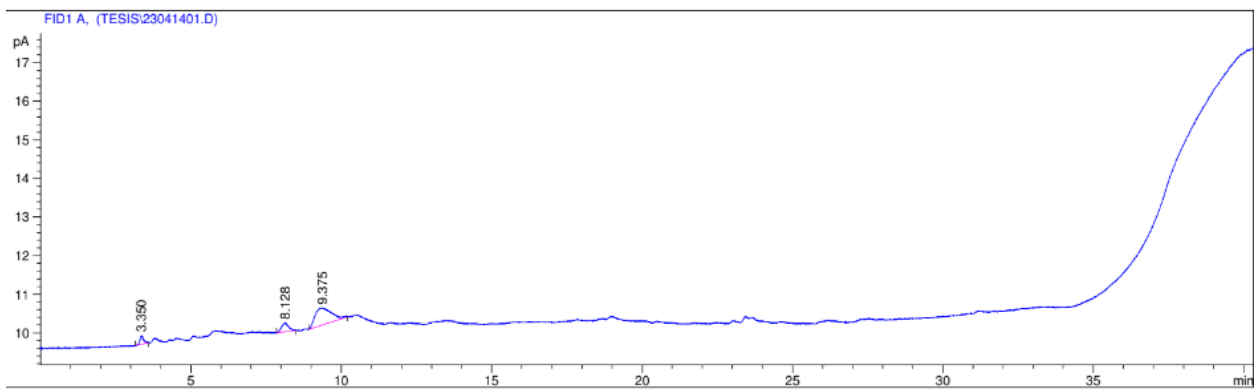


Figura 23. Cromatografía de gases con de detector de ionización de llama de posos de café secos 3

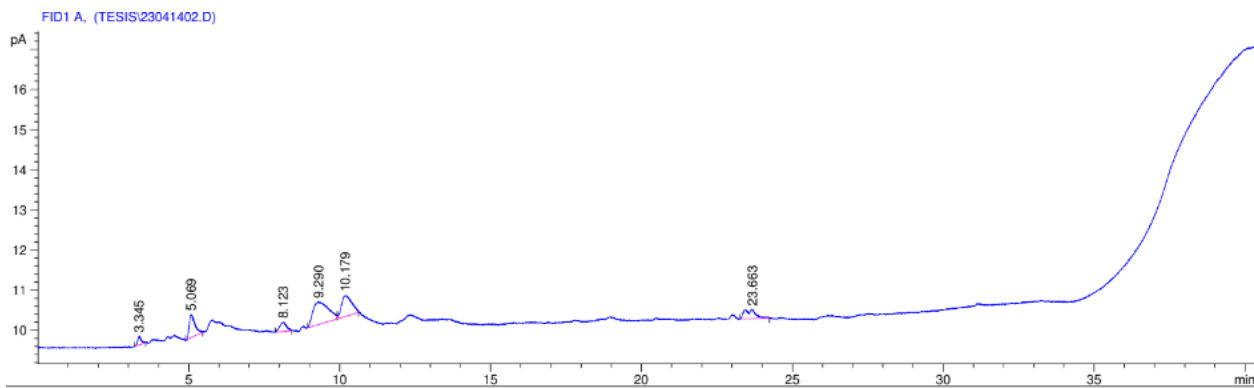




Figura 24. Cromatografía de gases con de detector de ionización de llama de posos de café secos 4

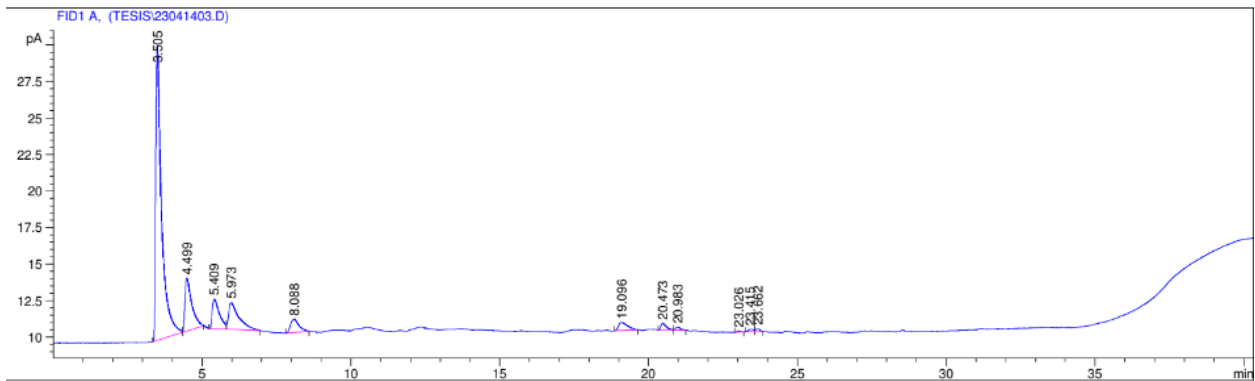


Figura 25. Curva de decoloración de azul de metileno en el tiempo con el carbón activado químicamente

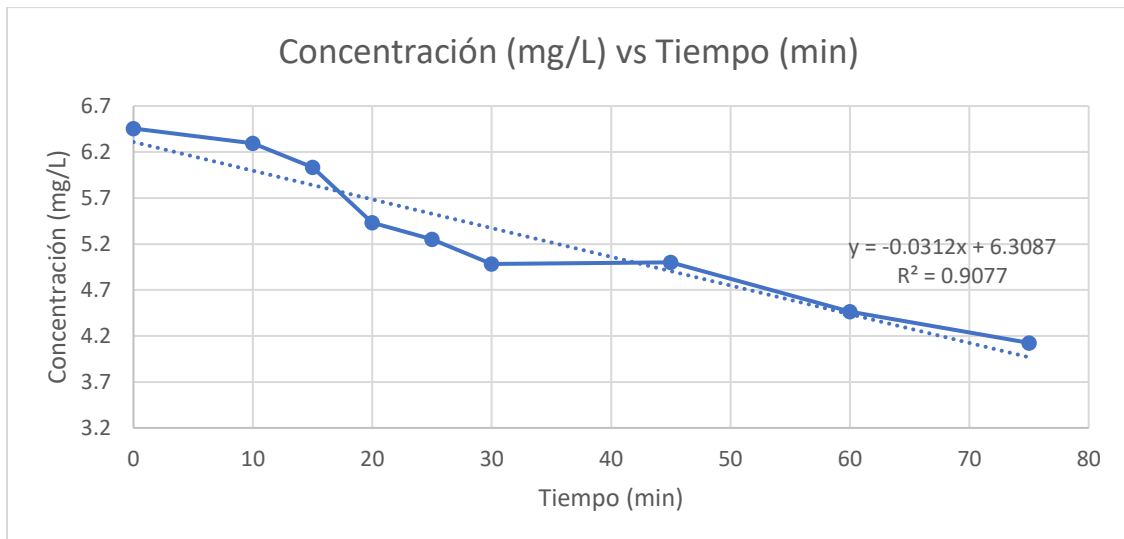


Figura 26. Espectroscopía IR para las distintas muestras obtenidas del carbón activado

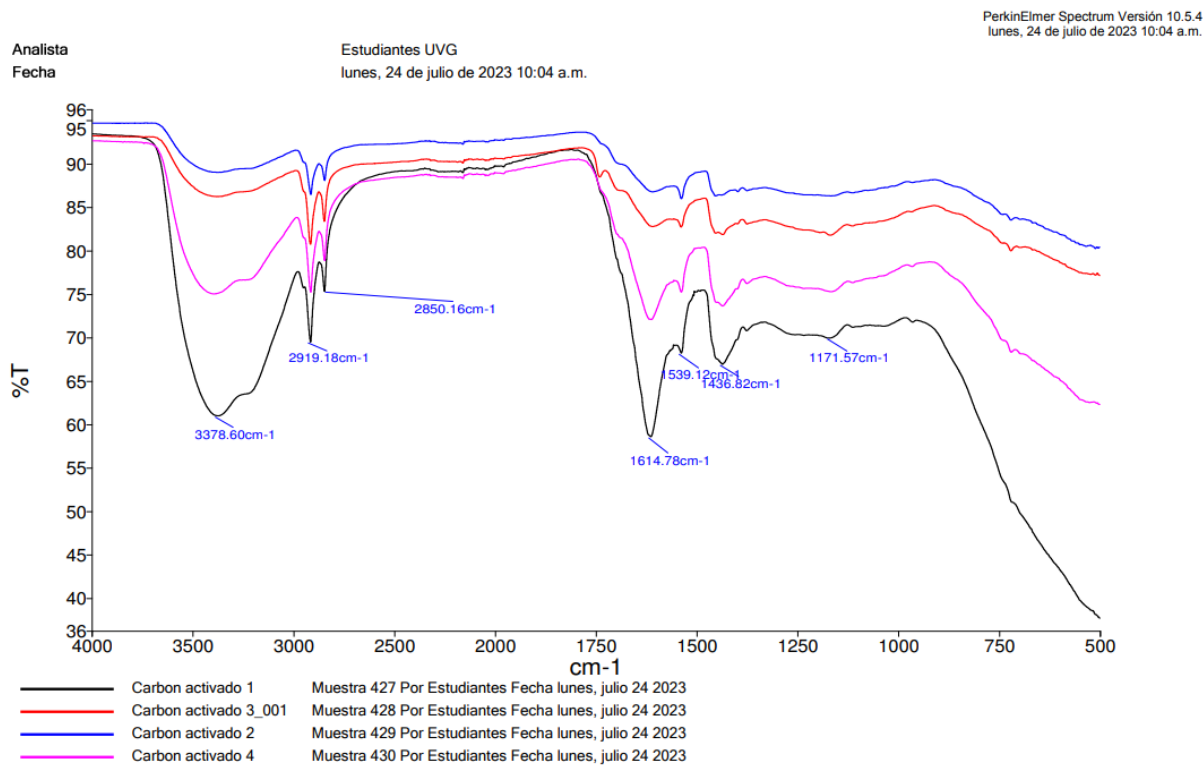


Figura 27. Muestras de posos de café recolectados del coffee shop antes de su secado



Figura 28. Determinación de humedad de posos de café recolectados del coffee shop



Figura 29. Sistema de pirólisis extrema para producción de carbón



Figura 30. Posos de café secos ingresados en el reactor para pirólisis



Figura 31. Carbón obtenido después del proceso de pirólisis extrema en el reactor para pirólisis



Figura 32. Bioaceite obtenido después del proceso de la carbonización de los posos de café secos



Figura 33. Solución de agente activante de Cloruro de Zinc 1M para activación del char obtenido después de la carbonización

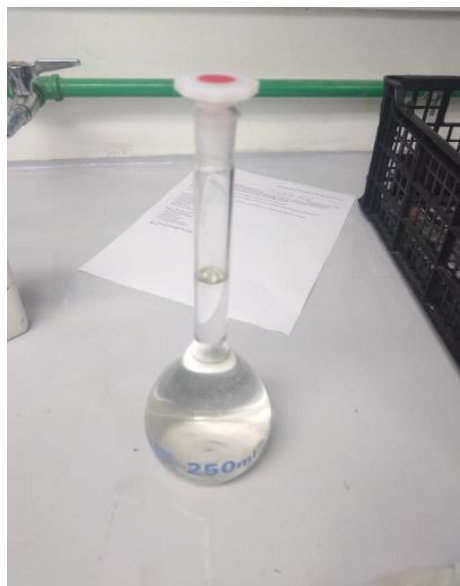


Figura 34. Carbón activado en bandeja de horno para eliminar el líquido restante por medio de secado



Figura 35. Carbón activado obtenido por medio de posos de café provenientes de coffee shops



Figura 36. Preparación de pesos de muestras de posos de café y carbón activado para ingresarlos en el analizador elemental



Figura 37. Sistema utilizado para la determinación del número de yodo y área superficial del carbón activado



Figura 38. Decoloración de azul de metileno con carbón activado





### XIII. DATOS ORIGINALES

Cuadro 9. Área de perfil de compuestos volátiles de posos de café 1 con cromatógrafo de gases con deionización de llama

<b>Número de pico</b>	<b>Área (UA)</b>
1	6.90929
2	5.61920
3	5.82592
4	3.17818
5	19.06301
6	16.0757
7	4.09744
8	78.91261
9	10.99524
10	7.51458
11	92.02618
12	85.17096
13	18.87509
14	22.0042
15	17.03216
16	10.74726
17	77.42088
18	14.74021
19	8.57570
20	2.532171
21	1.05449
22	5.33005
23	3.51516
24	15.09216
25	4.8682
26	2.55919
27	2.83095
<b>Total</b>	<b>542.55254</b>

Cuadro 10. Área de perfil de compuestos volátiles de posos de café 2 con cromatógrafo de gases con deionización de llama

<b>Número de pico</b>	<b>Área (UA)</b>
1	319.18735
2	120.53016
3	34.71089
4	15.18813
5	6.24906
6	24.02937
7	6.63551
8	20.49887
9	8.75952
10	29.88150
11	13.56338
12	4.31572
13	55.08181
14	41.65801
15	12.41663
16	17.04028
17	14.69680
18	4.35723
19	98.89326
20	15.04109
21	6.99373
22	4.35922
23	10.66265
24	1.29142
25	1.57433
<b>Total</b>	<b>887.61593</b>

Cuadro 11. Área de perfil de compuestos volátiles de posos de café 3 con cromatógrafo de gases con deionización de llama

<b>Número de pico</b>	<b>Área (UA)</b>
1	2.0639
2	4.99933
3	24.81282
4	13.11718
5	48.75366
6	28.81467
7	10.77982
8	4.07963
9	23.54169
10	4.14506
11	3.94164
12	2.33414
13	9.58492
14	3.05496
15	9.25314
16	6.81345
17	32.46326
18	12.85835
19	4.86737
20	14.76352
21	1.31084
22	0.249131
23	14.81785
24	1.91934
25	5.61842
26	4.02054
27	3.10226
28	0.366533
<b>Total</b>	<b>296.44742</b>

Cuadro 12. Área de perfil de compuestos volátiles de posos de café 4 con cromatógrafo de gases con deionización de llama

<b>Número de pico</b>	<b>Área (UA)</b>
1	116.06867
2	10.24055
3	23.40528
4	11.35613
5	30.28018
6	22.38620
7	7.45771
8	112.08574
9	0.332531
10	14.72217
11	7.76041
12	78.97661
13	112.14805
14	16.99545
15	15.96529
16	23.09104
17	7.88076
18	127.16132
19	14.52113
20	8.67563
21	1.49754
22	2.66799
23	0.56069
24	10.17983
25	2.42953
26	2.69279
<b>Total</b>	<b>781.50923</b>

Cuadro 13. Área de perfil de compuestos volátiles de posos de café secos 1 con cromatógrafo de gases con deionización de llama

<b>Número de pico</b>	<b>Área (UA)</b>
1	4.73315
2	103.76777
3	13.36481
4	23.5901
5	8.42667
6	2.46714
7	10.24886
8	1.62083
9	2.24454
10	3.02240
11	2.51271
12	0.60442
13	14.11795
14	5.55300
15	3.45303
16	3.67102
17	1.97303
18	12.03139
19	7.99079
Total	236.24703

Cuadro 14. Área de perfil de compuestos volátiles de posos de café secos 2 con cromatógrafo de gases con deionización de llama

<b>Número de pico</b>	<b>Área (UA)</b>
1	45.65536
2	9.43713
3	11.66924
4	22.64009
5	3.54361
6	1.27558
7	5.69668
8	0.79905
9	3.01852

10	2.35454
11	1.26561
12	1.45251
13	1.79671
14	1.62162
15	2.19126
16	1.30777
17	10.48822
Total	126.21352

Cuadro 15. Área de perfil de compuestos volátiles de posos de café secos 3 con cromatógrafo de gases con deionización de llama

Número de pico	Área (UA)
1	1.75199
2	7.40458
3	3.48452
4	19.77358
5	12.36690
6	5.82780
Total	50.60936

Cuadro 16. Área de perfil de compuestos volátiles de posos de café secos 4 con cromatógrafo de gases con deionización de llama

Número de pico	Área (UA)
1	188.83942
2	38.13414
3	13.88381
4	45.13087
5	13.74748
6	3.26291
7	1.42739
Total	304.42601

Cuadro 17. Curva de calibración de absorbancia de las distintas concentraciones de azul de metileno.

<b>Concentración (g/mL)</b>	<b>Absorbancia (AU)</b>
2.50E-06	0.0481
5.00E-06	0.12346
7.50E-06	0.17107
1.00E-05	0.21957

## XIV. CÁLCULOS DE MUESTRA

Cálculo 1. Determinación del tamaño muestra experimental

$$n = \frac{Z_a^2 * p * q}{d^2} = \frac{(2.58)^2 * (0.95) * (0.05)}{(0.3)^2} = 3.5 \approx 4.0$$

Descripción: Este tamaño de muestra se realizó para el secado, pirólisis y activación, para la obtención de carbón activado a partir de residuos de café

Cálculo 2. Determinación de humedad promedio

$$\frac{\sum_{i=1}^n x_1}{n} = \frac{55.51\% + 58.04\% + 52.39\% + 50.28\%}{4} = 54.055\%$$

Descripción: Este cálculo se aplicó a todas las mediciones y datos obtenidos en cuadruplicado

Cálculo 3. Determinación de desviación estándar muestral de humedad

$$\begin{aligned} & \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_1 - \bar{X})^2}{n - 1}} \\ &= \sqrt{\frac{(55.51\% - 54.055\%)^2 + (58.04\% - 54.055\%)^2 + (52.39\% - 54.055\%)^2 + (50.28\% - 54.055\%)^2}{4 - 1}} \\ &= 3.4166\% \end{aligned}$$

Descripción: Este cálculo se aplicó a todas las mediciones y datos obtenidos en cuadruplicado

Cálculo 4. Determinación de porcentaje de rendimiento

$$\text{Porcentaje de rendimiento} = \frac{\text{Sólidos de salida}}{\text{Sólidos de entrada}} * 100\% = \frac{90.55}{132.2} * 100\% = 68.495\%$$

Descripción: Este cálculo se aplicó para todos los porcentajes de rendimiento de sólidos



Cálculo 5. Determinación de número de yodo de carbón activado

$$\frac{X}{M} = \frac{([A - (DF)(B)(S)])}{M} = \frac{([0.161 * 12693 - (\frac{10 + 1}{1})(0.094 * 126.93)(7.375)] mg)}{1.5g}$$

$$= 1,315.62 \frac{mg \text{ de yodo}}{g \text{ carbón activado}}$$

Descripción: Este cálculo se aplicó para todos los carbones activados y se calculó el promedio en cada relación.

Cálculo 6. Determinación de área superficial de carbón activado

$$\text{Área Superficial} = \frac{\text{Número de Yodo} - 174.34}{0.6366} = \frac{1,315.62 - 174.34}{0.6366}$$

$$= 1,789.528 \frac{m^2}{g}$$

Descripción: Este cálculo se aplicó para todos los carbones activados y se calculó el promedio en cada relación.

Cálculo 7. Determinación de concentración de azul de metileno

$$\text{Ázul de metileno} = y = -0.0312x + 6.3087 = -0.0312 * (75 \text{ min}) + 6.3087$$

$$= 4.12483 \frac{g}{mL}$$

Descripción: Este cálculo se aplicó para el azul de metileno en el tiempo con el carbón activado

Cálculo 8. Determinación de densidad aparente

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{2.1175g}{5mL} = 0.42355 \frac{g}{mL}$$

Descripción: Este cálculo se aplicó para todos los carbones activados y se calculó el promedio en cada relación.

## XV. DATOS CALCULADOS DEL EXPERIMENTO

Cuadro 18. Porcentaje de humedad de residuos de café y residuos de café secos.

No	Porcentaje de humedad de residuos de café	Porcentaje de humedad de residuos de café secos
1	55.51%	3.51%
2	58.04%	1.36%
3	52.39%	2.19%
4	50.28%	1.47%
Promedio	54.055%±3.4166%	2.88%±0.989%

Cuadro 19. Área de perfil de compuestos volátiles de los residuos de café antes y después del secado.

No	Área de residuos de café (UA)	Área de residuos de café secos (UA)	Disminución del área (UA)
1	545.55254	236.24703	309.30511
2	887.616593	456.11804	431.498553
3	296.44742	50.60936	245.83806
4	781.50923	304.42601	487.08322
Promedio	627.7814±263.1162	261.8501±168.1576	370.9312±114.0596

Cuadro 20. Rendimiento másico de sólido obtenido después de la pirólisis a partir de residuos de café secos con una tasa de calentamiento lenta de 15°C/20 minutos

No	Peso de residuos secos (g)	Peso de carbón (g)	% de rendimiento de sólido
1	130.8	87.0	66.514%
2	133.2	92.7	69.595%
3	121.7	83.8	68.858%
4	143.1	98.7	68.973%
Promedio	132.2±8.79	90.55±6.56	68.495%±1.353%

Cuadro 21. Concentración en el tiempo del azul metileno

<b>Tiempo (min)</b>	<b>Absorbancia (UA)</b>	<b>Concentración (g/mL)</b>
0	0.14517	6.45573
10	0.14153	6.29386
15	0.13569	6.03415
20	0.12211	5.43025
25	0.1181	5.25192
30	0.11207	4.98377
45	0.11247	5.00156
60	0.10037	4.46347
75	0.092755	4.12483

Cuadro 22. Porcentaje de humedad del carbón activado

<b>No.</b>	<b>Porcentaje de humedad de carbón activado</b>
1	4.06%
2	3.45%
3	3.78%
4	3.32%
Promedio	3.65%±0.33%

Cuadro 23. Densidad aparente del carbón activado

<b>No.</b>	<b>Densidad aparente (g/mL)</b>
1	0.43548
2	0.4346
3	0.47582
4	0.3483
Promedio	0.42355±0.05372

## XVI. GLOSARIO

- Área superficial: Es una medida de la cantidad de superficie disponible en el material para adsorber diferentes sustancias.
- Azul de metileno: Es un colorante orgánico que se utiliza como tinte para teñir y pigmentar.
- Bioadsorbente: Es un material biológico que se utiliza para adsorber o eliminar sustancias orgánicas e inorgánicas de soluciones acuosas.
- Cloruro de Zinc: Es un compuesto inorgánico, sólido cristalino blanco altamente soluble en agua, utilizado como agente activante para el carbón activado.
- Compuestos volátiles: Son compuestos orgánicos que tienen una alta presión de vapor a temperatura ambiente provocando que se evaporen fácilmente.
- Densidad aparente: Es la masa de muchas partículas dividida por el volumen de partículas y el volumen vacío entre partículas y el volumen de poro interno.
- Porcentaje de humedad: Cantidad presente en un material en relación con su peso o volumen.
- Pirólisis: Proceso químico que implica la descomposición térmica de materiales orgánicos a altas temperaturas en ausencia de oxígeno.
- Residuo o posos de café: Son los restos que quedan en la cafetera de preparar el café, considerándolos como desecho.