

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Química



Producción de carbón activado a
partir de madera de pino y encino

Trabajo de graduación presentado por
Carlos José Grajeda Cárdenas
para optar al grado de Licenciado en Ingeniería Química

Guatemala,
2013

**Producción de carbón activado a partir
de madera de pino y encino**

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

**Producción de carbón activado a partir
de madera de pino y encino**

Trabajo de graduación presentado por


Carlos José Grajeda Cárdenas

para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Química

Guatemala,

2013

Vo.Bo.

(f) 
Ing. Gamaliel Zambrano

Terna examinadora

(f) 
Ing. Gamaliel Zambrano

(f) 
Ing. Jaime Rosales

(f) 
Ing. José Hernández

Fecha de aprobación: Guatemala, 4 de diciembre de 2013

ÍNDICE

LISTA DE CUADROS.....	vi
LISTA DE GRÁFICOS.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	x
RESUMEN.....	xi
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. MARCO TEÓRICO.....	2
A. Carbón activado.....	2
1. Propiedades físicas.....	3
2. Propiedades químicas.....	3
B. Activaciones.....	3
1. Activación física.....	4
2. Activación química.....	4
C. Métodos para determinación de características principales del carbón activado.....	5
1. Porcentaje de humedad ASTM D-2867-91.....	5
2. Densidad aparente ASTM D-2854-89.....	6
3. Medición de pH ASTM D-3838-80.....	7
4. Adsorción de yodo ASTM D-4607-86.....	8
III. JUSTIFICACIÓN.....	10
IV. OBJETIVOS.....	11
A. Objetivo general.....	11
B. Objetivos específicos.....	11
V. METODOLOGÍA.....	12

VI.	MATERIALES, REACTIVOS, CRISTALERÍA Y EQUIPO.....	15
VII.	RESULTADOS.....	17
VIII.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	28
IX.	CONCLUSIONES.....	36
X.	RECOMENDACIONES.....	38
XI.	BIBLIOGRAFÍA.....	39
XII.	ANEXOS.....	40
	A. Datos originales.....	40
	B. Ecuaciones.....	45
	1. Porcentaje de humedad ASTM D-2826-91.....	45
	2. Densidad aparente ASTM D-2854-89.....	46
	3. Adsorción de yodo ASTM D-4607-86.....	46
	C. Cálculos de muestra.....	48
	D. Análisis de error.....	52
	E. Gráficos.....	55
	F. Fotografías.....	57

LISTA DE CUADROS

Cuadro	Página
1 Humedad de materia prima para obtención de carbón activado.....	17
2 Porcentaje de humedad, densidad aparente y pH de cuatro muestras de cuatro muestras de carbón activado a partir de aserrín de pino con activación física.....	17
3 Rendimiento de obtención de carbón activado a partir de aserrín de pino con activación física.....	18
4 Distribución de partícula de carbón activado a partir de aserrín de pino con activación física.....	18
5 Número de yodo para carbón activado a partir de pino con activación física.....	19
6 Porcentaje de humedad, densidad aparente y pH de cuatro muestras de carbón activado a partir de aserrín de encino con activación física.....	19
7 Rendimiento de obtención de carbón activado a partir de aserrín de encino con activación física.....	19
8 Distribución de partícula de carbón activado a partir de aserrín de encino con activación física.....	20
9 Número de yodo para carbón activado a partir de encino con activación física.....	20
10 Porcentaje de humedad, densidad aparente y pH de cuatro muestras de carbón activado a partir de aserrín de pino con activación química.....	22

11	Rendimiento de obtención de carbón activado a partir de aserrín de pino con activación química.....	22
12	Distribución de partícula de carbón activado a partir de aserrín de pino con activación química.....	22
13	Número de yodo para carbón activado a partir de pino con activación química.....	23
14	Porcentaje de humedad, densidad aparente y pH de cuatro muestras de carbón activado a partir de aserrín de encino con activación química.....	23
15	Rendimiento de obtención de carbón activado a partir de aserrín de encino con activación química.....	23
16	Distribución de partícula de carbón activado a partir de aserrín de encino con activación química.....	24
17	Número de yodo para carbón activado a partir de pino con activación química.....	24
18	Número de yodo para carbón activado de pino y encino con activación física y química.....	26
19	Humedad, densidad aparente, pH y rendimientos de carbones activados producidos.....	26
20	Datos para humedad de materia prima para obtención de carbón activado.....	40
21	Datos obtenidos para porcentaje de humedad en carbón activado con activación física.....	40

22	Datos obtenidos para porcentaje de humedad en carbón activado con activación química.....	41
23	Datos obtenidos para densidad aparente carbón activado con activación física.....	41
24	Datos obtenidos para densidad aparente carbón activado con activación química....	42
25	Datos obtenidos para rendimientos de carbón activado con activación física.....	42
26	Datos obtenidos para rendimientos de carbón activado con activación química.....	42
27	Datos obtenidos para distribución de tamaño de partícula de carbón activado con activación física.....	43
28	Datos obtenidos para distribución de tamaño de partícula de carbón activado con activación química.....	43
29	Datos para obtención de número de yodo para carbón activado a partir de pino con activación física.....	44
30	Datos para obtención de número de yodo para carbón activado a partir de encino con activación física.....	44
31	Datos para obtención de número de yodo para carbón activado a partir de pino con activación química.....	44
32	Datos para obtención de número de yodo para carbón activado a partir de encino con activación química.....	45

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico	Página
1 Distribución de tamaño de partícula de carbón activado a partir de aserrín de pino con activación física.....	21
2 Distribución de tamaño de partícula de carbón activado a partir de aserrín de encino con activación física.....	21
3 Distribución de tamaño de partícula de carbón activado a partir de aserrín de pino con activación química.....	25
4 Distribución de tamaño de partícula de carbón activado a partir de aserrín de encino con activación química.....	25
5 Número de yodo para carbones activados producidos.....	27
6 Número de yodo para carbón activado a partir de pino con activación física.....	55
7 Número de yodo para carbón activado a partir de pino con activación química...	55
8 Número de yodo para carbón activado a partir de encino con activación física...	56
9 Número de yodo para carbón activado a partir de encino con activación química.....	56

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1 Mufla Thermolyne Model FA10525P-1, No. Serial 32501661, 120 V, 14.0 amp, 1680 Watts.....	57
2 Proceso de impregnación por 48 horas con ácido fosfórico 0.365M con madera pino y encino.....	57
3 Prueba de remoción de color de carbón activado a partir de encino con activación física. Se utilizó un colorante orgánico verde.....	58
4 Solución de yodo 0.1N, utilizada para la obtención de número de yodo.....	58
5 Carbón activado producido a partir de madera de pino con activación física.....	59

RESUMEN

En el presente trabajo se obtuvo carbón activado a partir de madera de pino y encino por medio de activación física y activación química. Así mismo se estudiaron las propiedades y características del carbón activado. Las características y propiedades analizadas a los carbones activados fueron: porcentaje de humedad, densidad aparente, pH, rendimiento, tamaño de partícula y número de yodo. Los métodos ASTM utilizados para analizar las características y propiedades fueron: Porcentaje de humedad ASTM D-2867-91, Densidad aparente ASTM D-2854-89, Medición de pH ASTM D-3838-80 y Adsorción de yodo ASTM D-4607-86.

Con el aserrín de pino y encino se hicieron 16 muestras de carbón activado. Ocho muestras de carbón activado a partir de activación física. De las cuales cuatro eran de pino y cuatro de encino. Estos carbones activados se activaron a 800 °C por dos horas en una mufla. Se procedió a pulverizar manualmente con un mortero y se caracterizó.

Las otras ocho muestras de carbón activado fueron carbonizaciones de pino y encino con activación química. De estas ocho muestras, cuatro eran de pino y cuatro de encino. Estos carbones activados se les impregnó una solución de ácido fosfórico 0.365 M en una relación 1g de madera/mL de solución por 48 horas. Posteriormente se carbonizaron a 800 °C por dos horas en una mufla.

Por medio de los métodos previamente mencionados se encontró que la madera de pino y de encino son materias primas para la producción de un buen carbón activado que se puede utilizar en la industria debido a las características obtenidas: humedad en un rango de 8.97 ± 0.48 – 14.11 ± 0.59 %, pH entre 5.87 ± 0.01 – 8.96 ± 0.01 , densidad aparente de 0.27 ± 0.01 – 0.51 ± 0.02 g/cm³, tamaño de partícula y número de yodo entre 1127 ± 5 - 1485 ± 7 mg yodo/g carbón, haciendo que la metodología propuesta fuera satisfactoria para los objetivos del trabajo realizado. Así mismo este proceso puede ser implementado en forma industrial para producción de carbón activado con aplicaciones en tratamiento de agua, filtración para agua potable, purificación de soluciones que contienen color no deseado, filtrado de vodka y whiskey que contienen impurezas que afectan color, sabor y olor.

I. INTRODUCCIÓN

El carbón activado es porosidad rodeada por átomos de carbono. Es de color negro, poroso, friable y de una gran superficie de contacto. La porosidad tiene el tamaño de moléculas y tiene la forma de un corte. El carbón activado se utiliza para purificación de agua y de aire, así como para la separación de mezclas de gases. Se caracteriza principalmente por su gran capacidad de adsorción

En Guatemala se tienen importaciones anuales mayores de carbón activado que sobrepasa las 408 toneladas anuales que representa GTQ 3,176,000.00 Dado que la producción de carbón activado está muy relacionada con la energía, el precio incrementa con el costo de combustible para suplir el calor de calcinación y activación del carbón por lo que es un negocio que va en aumento.

Los usos que se le dan al carbón activado en Guatemala son en el área de medicamentos, bebidas carbonatadas, licores, aceites, agua, glicerina y elaboración de azúcares, así como en otras industrias más pequeñas.

Por lo que este trabajo brinda el proceso de producción de carbón activado a partir de madera de pino y encino con activación física y química. Las características y propiedades analizadas a los carbones activados fueron: porcentaje de humedad, densidad aparente, pH, rendimiento, tamaño de partícula y número de yodo. Los métodos ASTM utilizados para analizar las características y propiedades fueron: Porcentaje de humedad ASTM D-2867-91, Densidad aparente ASTM D-2854-89, Medición de pH ASTM D-3838-80 y Adsorción de yodo ASTM D-4607-86.

II. MARCO TEÓRICO

A. Carbón Activado

Es una forma de carbono micro cristalino y no grafito. El carbón activado se refiere a la porosidad rodeada por átomos de carbono. Es de color negro, poroso, friable y de una gran superficie de contacto. La porosidad tiene el tamaño de moléculas y tiene la forma de un corte. El carbón activado se utiliza para purificación de agua y de aire, así como para la separación de mezclas de gases. (Considine, 1974)

El carbón activado se caracteriza por una gran área superficial como de 300-2500 m²/g lo que permite que la adsorción física de gases y vapores de gases se disuelvan en líquidos. Se hacen varios grados de carbón activado para adsorbentes fase gaseosa o fase líquida. Los de fase líquida son generalmente en forma de polvo o granulares. Los de fase gaseosa son gránulos sólidos o en forma de pellets. (Considine, 1974)

Existen dos tipos de activaciones que se le puede realizar al carbón. La activación térmica y la activación química. La activación térmica se refiere a la gasificación selectiva de átomos de carbono y la activación química involucra el uso de ácido fosfórico. (Considine, 1974)

Los carbones activados se hacen de maderas duras, cáscaras de coco, carbón y de sistemas macromoleculares sintéticos. Sin embargo no se puede utilizar material orgánico natural para la realización de carbón activado. Esto se debe a que no todos los materiales orgánicos naturales se pueden hacer carbón poroso y solo algunos cumplen con los requisitos comerciales para hacer carbón activado. (Considine, 1974)

Sin embargo, cada tipo de carbón activado, dan distintas porosidades y cada uno tiene especificaciones y aplicaciones distintas. Pero de distintos recursos se pueden hacer un mismo tipo de carbón activado. (Considine, 1974)

1. **Propiedades físicas.** El área superficial es la propiedad física más importante del carbón activado. Para aplicaciones específicas, el área superficial disponible para la adsorción depende del tamaño molecular del adsorbato y el diámetro de poro del carbón activado. Generalmente, los átomos de carbono en fase líquida se caracterizan porque tienen una mayoría de poros de mayores de 3 nm de diámetro, mientras que la mayoría de los poros de adsorbentes de fase gaseosa son menores a 3 nm de diámetro. Los adsorbentes de fase líquida requieren poros más grandes debido a la necesidad de una rápida difusión en el líquido. (Marsh, 2006)

La densidad de bulto del carbón activado, junto con su capacidad adsorptiva, se usa para determinar la capacidad de lecho en el diseño de un sistema de adsorción o para determinar el grado de carbón para un sistema ya existente. (Marsh, 2006)

El rango de tamaño de partícula en el carbón activado es importante porque la velocidad de adsorción depende inversamente del tamaño de partícula. Así, partículas más pequeñas de carbón activado, tendrán velocidades más rápidas de adsorción. Pero en lechos arreglados la caída de presión incrementa con la disminución de partícula. (Marsh, 2006)

2. **Propiedades químicas.** Las propiedades químicas más importantes del carbón activado son el contenido de cenizas, composición de cenizas, y el pH del carbón. El pH o pKa del carbón, ayudan a predecir la hidrofiliicidad y preferencia de adsorción anionica o catiónica. (Marsh, 2006)

B. Activaciones

La activación ocurre cuando se carboniza ciertas sustancias orgánicas como semillas, madera y bagazo, se aumenta el área superficial porque se degradan estructuras orgánicas y se eliminan compuestos volátiles. Si se expone el material carbonizado a elevadas temperaturas con vapor de agua o dióxido de carbono, se aumenta la superficie interna del carbón, la cantidad y tamaño de poros. (Colmenares, 1924)

1. **Activación física.** El material de carbón inactivo reacciona con sustancias gaseosas. Los gases son agentes oxidantes que desgastan la superficie del carbono lo que ocasiona que se dé un incremento de área superficial. (Colmenares, 1924)

Para activar se utiliza vapor de agua, dióxido de carbono, así como oxígeno. Adicionalmente a estos también se puede usar vapores de cloro, azufre, amonio, entre otros. En la activación se forman nuevos poros debido a que descomponen los núcleos de carbono que no están organizados. (Colmenares, 1924)

En el producto intermedio existe una diferencia entre los átomos de carbono debido a la afinidad por el agente activante. Los que bordean los cristalitos son más reactivos porque su valencia no están equilibradas con los carbonos de su alrededor. Estos carbonos son sitios activos porque es aquí donde ocurre la reacción con el agente activante. (Colmenares, 1924)

Complejos son formados en la superficie de los sitios activos cuando reacciona el carbón con los agentes activantes. Así se elimina el carbón oxidado de la superficie, formando óxidos en estado gaseoso y producen nuevos átomos de carbono con cargas no saturadas, los cuales pueden reaccionar con otras moléculas del agente activante. (Colmenares, 1924)

2. **Activación química.** Las sales minerales en la carbonización dan propiedades específicas al carbón en la activación. Las sales minerales ayudan a formar la estructura en el que se depositan los cristalitos debido a las fuerzas internas que se generan. La superficie del carbón queda libre para unirse con otras sustancias cuando las sales son eliminadas por los ácidos o por el agua. (Colmenares, 1924)

Para aumentar el rendimiento de la pirolisis y disminuir la temperatura de esta, es necesario que el agente químico influya en el proceso, lo que no permite mucha formación de resinas. Lo que influye en las estructuras moleculares superficiales son los agentes químicos, sales minerales, entre otras sustancias. (Colmenares, 1924)

La celulosa es lo que más se utiliza para producir carbón activado y el agente activante hace que se de un rompimiento en esta. Después ocurren reacciones de oxidación en las que sustancias inorgánicas se unen al carbón, las cuales no pueden extraerse. (Colmenares, 1924)

La reacción más importante en la pirolisis es la deshidratación causada por el calor y el agente activante, formación de otras reacciones menos complejas y el agua. La disminución de alquitrán se da cuando la deshidratación ocurre con el agente químico. (Colmenares, 1924)

El cloruro de zinc es el activante que más se usa. También se usa el sulfuro de potasio, tiocianato de potasio, ácido sulfúrico, ácido fosfórico, hidróxido de metales alcalinos y cloruros de calcio y magnesio. Dependiendo del método a utilizar, la activación química se da a temperaturas entre 400 y 1000 °C. (Colmenares, 1924)

C. Métodos para determinación de características principales del Carbón Activado.

1. Porcentaje de humedad ASTM D-2867-91 . El contenido de humedad de carbón activado se requiere a menudo para definir y expresar sus propiedades en relación con el peso neto del carbono. (ASTM, 1992)

Método de horno de secado. Una muestra de carbono se pone en una cápsula cerrada seca y se pesa con precisión. La cápsula se abre y se coloca con la tapa en un horno precalentado. La muestra se seca a peso constante luego se retira del horno y con la cápsula cerrada, se enfría a temperatura ambiente. La cápsula cerrada se pesa de nuevo con precisión. La pérdida de peso se expresad a un porcentaje del peso de la muestra original. (ASTM, 1992)

Se necesitan los siguientes equipos:

- Secador
- Cápsulas con tapas
- Desecador

Procedimiento:

Pesar una muestra de carbón activado de 1 a 2 gramos. Ponerlo en una cápsula tarada previamente secada con tapa, y pesar. La profundidad del carbono en la cápsula no debe exceder de 1,25 cm

Retirar la tapa y colocar la cápsula y la tapa en un horno precalentado de circulación forzada a 145-150 C. Cerrar el horno y secar hasta peso constante. Abra el horno y cubrir las cápsulas rápidamente. Enfriar en un desecador a temperatura ambiente y pesar. (ASTM, 1992)

2. **Densidad aparente ASTM D-2854-89.** Este método proporciona un método para la determinación de la densidad compactada de un lecho de carbón activado granular. La determinación de la densidad compactada es esencial en el diseño de los empaques para mantener el material y para fines de ordenado cuando se adquiere el material, así como para llenar los empaques restantes. (ASTM, 1992)

La determinación de la densidad aparente en una muestra granular, se hace midiendo el volumen embalado por una caída libre de un alimentador vibratorio en un cilindro graduado de 100 ml y pesando el volumen conocido. (ASTM, 1992)

Se necesita el equipo:

- Embudo
- Alimentador de embudo
- Vibrador de metal
- Cilindro 100 mL
- Balanza

Procedimiento

Secar una muestra de carbón activado a peso constante a una temperatura de 150 C. Cuidadosamente colocar la muestra en un embudo para que el material no fluya en el cilindro graduado o probeta. Agregar la muestra al cilindro usando el alimentador vibrador. Llenar la probeta a velocidad constante de 0.75 – 1.0 mL/s hasta la marca de 100 mL. Transferir el contenido de la probeta a una balance y pesar.

3. **Medición de pH ASTM D-3838-80.** Cuando se pasa un fluido que contiene un adsorbato a través de un lecho de carbón activado, las reacciones químicas pueden tener lugar entre el carbón activado, sus otros constituyentes sin carbono, y el adsorbato que contiene el fluido. El pH del carbono puede ser un parámetro importante de tales reacciones y por lo tanto puede ser una característica importante de la carbono. (ASTM, 1992)

Una muestra de carbón activado se hierve en agua para reactivos usando un condensador de reflujo para reciclar el vapor de agua. Las partículas de carbono se separaron por filtración, el filtrado se enfrió a 50 grados Celsius y el pH del filtrado se determina mediante la medición electrométrica. (ASTM, 1992)

Se utiliza el equipo:

- Balanza analítica
- Estufa
- Condensador de reflujo
- Termómetro
- Probeta de 100 mL

- Beaker
- Papel filtro
- pH metro

Procedimiento

Pesar una muestra de carbón activado de 10 g. Hervir en un beaker 110 mL de agua destilada y agregar carbón activado. Agregar 100mL de agua destilada al beaker con carbón activado. Hervir por 900s. Remover el beaker de la estufa y filtrar el contenido con papel filtro. Enfriar el filtrado a 50 C. Medir el pH con el pH metro.

4. **Adsorción de yodo ASTM D-4607-86.** El índice de yodo es un indicador relativo de la porosidad en un carbono activado. No necesariamente se proporciona una medición de la capacidad del carbono para absorber otras especies. Índice de yodo puede ser usado como una aproximación de la superficie de algunos tipos de carbones activados. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que cualquier relación entre la superficie y el número de yodo no se puede generalizar. Esto varía con los cambios en la materia prima de carbono, las condiciones de procesamiento y distribución de volumen de poros. (ASTM, 1992)

La presencia de sustancias volátiles adsorbidos, azufre y agua extraíbles puede afectar el índice de yodo medido para un carbón activado. (ASTM, 1992)

Este método se basa en un punto de tres isoterma de adsorción . Una solución estándar de yodo se trata con tres diferente pesos de carbón activo en condiciones específicas. Las soluciones tratadas de carbono se filtran para separar el carbono de la solución de yodo tratada . El yodo que queda en el filtrado se midió por titulación . La cantidad de yodo eliminado por gramo de carbono se determinó para cada dosis de carbono y los datos resultantes se utilizan para trazar una isoterma de adsorción . La cantidad de yodo adsorbido por gramo de carbono a una concentración de yodo residual de 0,02 N se expresa como el número de yodo. (ASTM, 1992)

La concentración de yodo en la solución estándar afecta a la capacidad de un carbono activado para la adsorción de yodo . Por lo tanto , la normalidad de la solución estándar de yodo debe mantenerse a un valor constante para todas las mediciones de índice de yodo . (ASTM, 1992)

El aparato requerido consta de diversos materiales de vidrio de laboratorio utilizado para preparar las soluciones y ponerse en contacto con carbón con la solución estándar de yodo . También se requiere equipo de filtración y equipos para titular . (ASTM, 1992)

Se necesita el equipo:

- Balanza analítica
- Bureta
- Erlenmeyer
- Beaker
- Papel filtro
- Balón aforado.

Procedimiento

Pesar de 1.0 a 1.5 g de carbón activado. Transferir a un Erlenmeyer de 250mL. Pipetear 10mL de HCl 5%. Cerrar el Erlenmeyer y agitar vigorosamente por 30 segundos.

Pipetear 100mL de solución de yodo 0.1N y agitar vigorosamente por 30s. Filtrar el contenido con papel filtro. Pipetear 50mL del filtrado a otro Erlenmeyer y titular con tiosulfato de sodio hasta una solución sin color.

III. JUSTIFICACIÓN

Las mermas producidas por empresas, aserraderos y demás empresas que utilizan madera, son desechadas, por lo que ocasionan un desperdicio que se quema y produce contaminación ambiental, generando contaminación. Esto hace que los recursos no se aprovechen al 100% y maderas como pino y encino, son materias primas de las cuales se puede obtener carbón activado.

El carbón activado es un producto utilizado en varias industrias nacionales, para recuperación de solventes, eliminación de olores, colores y sabores en sustancias líquidas. Así mismo, en refinamiento de azúcares y jarabes, aceites y grasas, y refinamiento de productos.

El carbón activado en Guatemala sobrepasa las 408 toneladas anuales que representa GTQ 3,176,000.00, por lo tanto, se puede producir carbón activado a escala industrial en Guatemala para utilizarlo en la industria nacional. Dado que la producción de carbón activado está muy relacionada con la energía, el precio incrementa con el costo de combustible para suplir el calor de calcinación y activación del carbón por lo que es un negocio que va en aumento.

IV. OBJETIVOS

A. Objetivo general

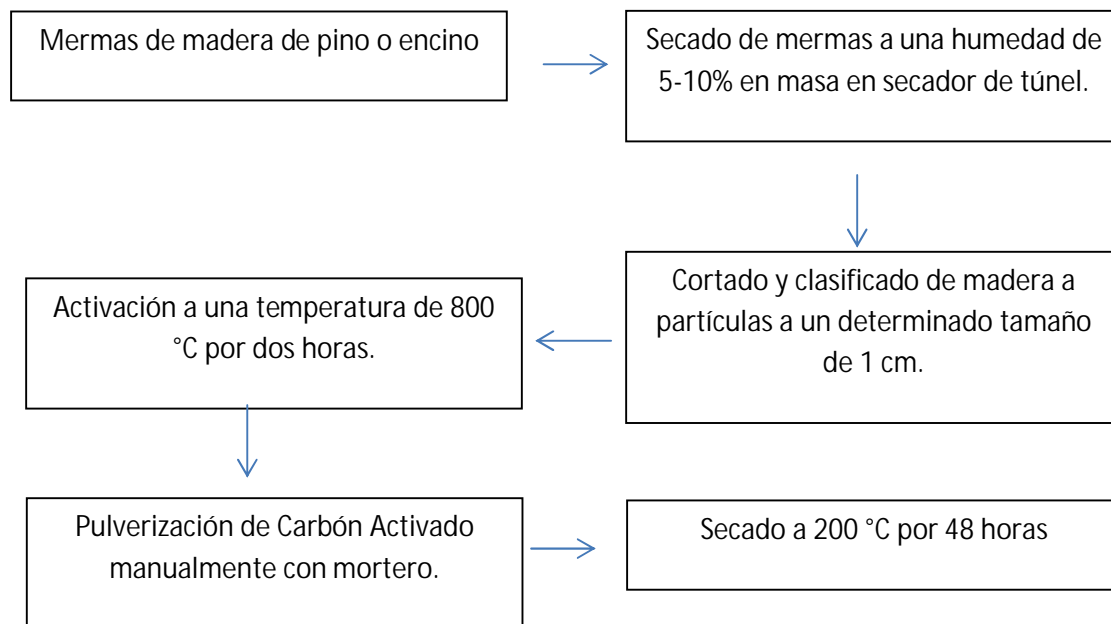
- Determinar el mejor método para obtener carbón activado de alta calidad a partir de madera de pino o encino .

B. Objetivos específicos

- Determinar las características del carbón activado obtenido a partir de madera de pino por el método de activación física.
- Establecer las propiedades del carbón activado obtenido a partir de madera de encino por el método de activación física.
- Identificar las singularidades del carbón activado obtenido a partir de madera de pino por el método de activación química.
- Especificar las particularidades del carbón activado obtenido a partir de madera de encino por el método de activación química.

V. METODOLOGÍA

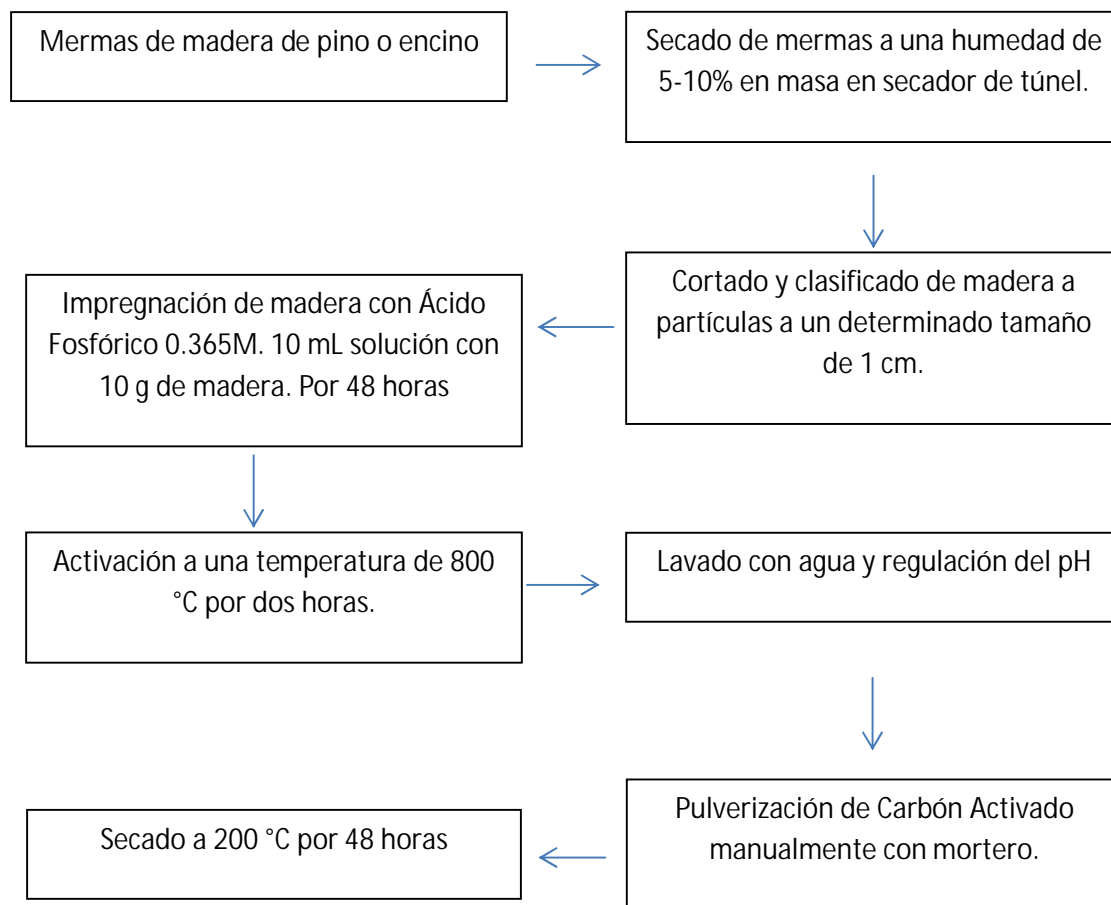
Activación física de carbón activado.



Se limpió el aserrín de pino o encino para que solo hubiera aserrín y no otras sustancias u objetos que pudieran afectar el estudio. Se procedió a secar en el secador de túnel, hasta que tuviera una humedad entre el 5-10% para que fuera más fácil el proceso de carbonización.

Se carbonizaron 100 g de aserrín por dos horas a 800 °C en la mufla. Después de haber enfriado a temperatura ambiente se pulverizó manualmente hasta tener un tamaño aceptable y que todas las partículas estuvieran pulverizadas. Se secó por 48 horas a 200 °C en la mufla. Terminado el carbón activado se pesó para determinar porcentaje de rendimiento, medición de pH, determinación de tamaño de partícula, densidad aparente y número de yodo. Los métodos usados fueron: Porcentaje de humedad ASTM D-2867-91, Densidad aparente ASTM D-2854-89, Medición de pH ASTM D-3838-80, Adsorción de yodo ASTM D-4607-86. Se guardaron las muestras en bolsas Ziploc.

Activación química de carbón activado.



Se limpió el aserrín de pino o encino para que solo hubiera aserrín y no otras sustancias u objetos que pudieran afectar el estudio. Se procedió a secar en el secador de túnel, hasta que tuviera una humedad entre el 5-10% para que fuera más fácil el proceso de carbonización.

La impregnación se hizo mezclando por cada 10 g de aserrín, 10 mL de solución ácido fosfórico 0.365M en un beaker tapado papel aluminio por 48 horas. Se mezcló para que todo el aserrín tuviera contacto con la solución y así tener una mejor impregnación.

Se carbonizaron 100 g de aserrín por dos horas a 800 °C en la mufla. Después de haber enfriado a temperatura ambiente se pulverizo manualmente hasta tener un tamaño aceptable y que todas las partículas estuvieran pulverizadas. Se secó por 48 horas a 200 °C en la mufla. Terminado el carbón activado se pesó para determinar porcentaje de rendimiento, medición de pH, determinación de tamaño de partícula, densidad aparente y número de yodo. Los métodos usados fueron: Porcentaje de humedad ASTM D-2867-91, Densidad aparente ASTM D-2854-89, Medición de pH ASTM D-3838-80, Adsorción de yodo ASTM D-4607-86. Se guardaron las muestras en bolsas Ziploc.

VI. MATERIALES, REACTIVOS, CRISTALERÍA Y EQUIPO.

A. Materiales

1. Aserrín de pino
2. Aserrín de encino

B. Reactivos:

1. Ácido Fosfórico Merck al 85%, densidad 1.685 g/mL
2. Solución de Ácido Clorhídrico 5%, Solución de Tiosulfato de Sodio 0.1N, Solución de yodo 0.1N, Solución de yodato de potasio 0.1N y Solución de Almidón.

C. Cristalería

1. Beaker 250mL
2. Erlenmeyer 250 mL
3. Bureta 50mL
4. Pipeta 10 mL
5. Probeta 10mL y 50mL

D. Equipo:

1. Secador de bandejas Armfield Limited del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.
2. Balanza OHAUS Scout Pro 2001, Cap Max 2000g, div. 0.1 g.
3. Mufla Thermolyne Model FA10525P-1, No. Serial 32501661, 120 V, 14.0 amp, 1680 Watts.
4. Estufa con temperatura ajustable
5. Termómetro de mercurio
6. Mortero con pistilo
7. Cisoles con tapadera
8. Pinzas para crisoles

VII. RESULTADOS

En este estudio se usó aserrín de pino y aserrín de encino , preparada de acuerdo al diagrama de flujo que se encuentra en la metodología.

Tabla No. 1 : Humedad de materia prima para obtención de carbón activado

Muestra	Humedad, % ± 0.008 aserrín de pino	Humedad, % ± 0.008 aserrín de encino
A	7.400	9.790
B	7.450	9.890
C	7.380	9.680
D	7.360	9.780

Carbón Activado a partir de pino con activación física

Tabla No. 2: Porcentaje de humedad, densidad aparente y pH de cuatro muestras de carbón activado a partir de aserrín de pino con activación física

Muestra de carbón activado	Humedad, % ± 0.008	Densidad aparente, g/cm ³ ± 0.0127	pH, 25 °C ± 0.001
1	8.24	0.2538	8.731
2	8.83	0.2635	8.746
3	9.4	0.2683	8.824
4	9.42	0.2827	8.809

Tabla No. 3: Rendimiento de obtención de carbón activado a partir de aserrín de pino con activación física

Muestra de carbón activado	Rendimiento, %, ± 0.20
1	33.4
2	34.4
3	34.1
4	33.8

Tabla No. 4 Distribución de partícula de carbón activado a partir de aserrín de pino con activación física

USA Standard ASTM E 11-61	Abertura, mm	% de carbón activado, ± 0.04
20	0.841	1.52
30	0.595	3.08
45	0.354	9.82
60	0.25	8.43
80	0.177	9.65
100	0.149	5.71
Finos	< 0.149	61.79

Tabla No. 5: Número de yodo para carbón activado a partir de pino con activación física

Muestra	Número de yodo, mg yodo, g carbón ± 4
1	1126
2	1132
3	1120
4	1130

Carbón Activado a partir de encino con activación física

Tabla No. 6: Porcentaje de humedad, densidad aparente y pH de cuatro muestras de carbón activado a partir de aserrín de encino con activación física

Muestra de carbón activado	Humedad, % ± 0.008	Densidad aparente, $\text{g/cm}^3 \pm 0.0127$	pH, 25 $^{\circ}\text{C}$ ± 0.001
1	12.500	0.366	8.96
2	13.180	0.367	8.954
3	13.870	0.374	8.975
4	12.300	0.362	8.968

Tabla No. 7: Rendimiento de obtención de carbón activado a partir de aserrín de encino con activación física

Muestra de carbón activado	Rendimiento, %, ± 0.20
1	27.1
2	28.1
3	27.2
4	27.5

Tabla No. 8 Distribución de partícula de carbón activado a partir de aserrín de encino con activación física

Mesh No.	Abertura, mm	% de Carbón Activado, ± 0.04
20	0.841	0.66
30	0.595	2.35
45	0.354	8.48
60	0.25	8.16
80	0.177	10.48
100	0.149	6.65
Finos	< 0.149	63.22

Tabla No. 9: Número de yodo para carbón activado a partir de encino con activación física

Muestra	Número de yodo, mg yodo, g carbón ± 5
1	1353
2	1363
3	1348
4	1345

Gráfico 1: Distribución de tamaño de partícula de carbón activado a partir de aserrín de pino con activación física

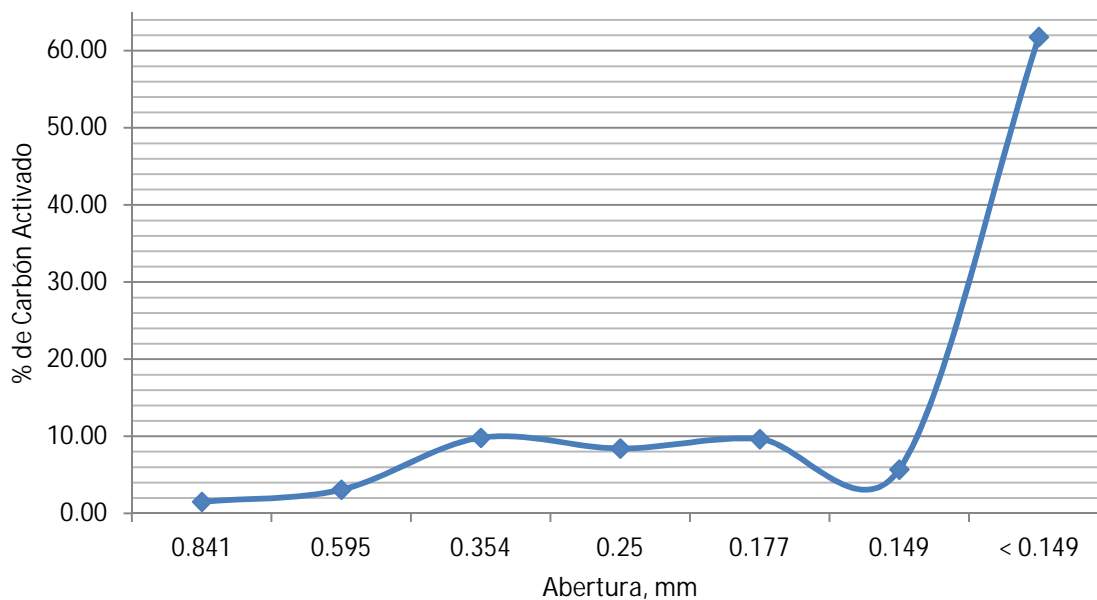
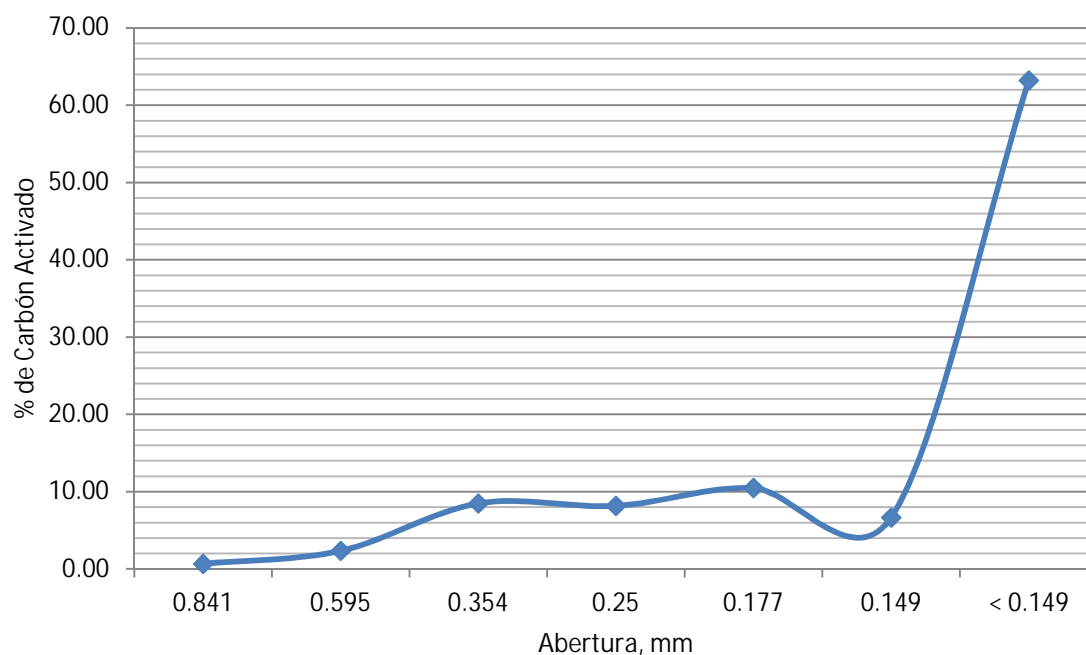


Gráfico 2: Distribución de tamaño de partícula de carbón activado a partir de aserrín de encino con activación física



Carbón Activado a partir de pino con activación química.

Tabla No. 10: Porcentaje de humedad, densidad aparente y pH de cuatro muestras de carbón activado a partir de aserrín de pino con activación química

Muestra de Carbón Activado	Humedad, % ±0.008	Densidad aparente, g/cm ³ ±0.0127	pH, 25 °C ±0.001
1	12.54	0.3332	5.833
2	12.52	0.3304	5.862
3	13.2	0.3421	5.84
4	13.39	0.3495	5.835

Tabla No. 11: Rendimiento de obtención de carbón activado a partir de aserrín de pino con activación química

Muestra de Carbón Activado	Rendimiento, % ±0.20
1	27.61
2	28.72
3	27.99
4	28.53

Tabla No. 12 Distribución de partícula de carbón activado a partir de aserrín de pino con activación química

USA Standard ASTM E 11-61	Abertura, mm	% de Carbón activado, ±0.04
20	0.841	3.79
30	0.595	6.75
45	0.354	16.13
60	0.25	9.75
80	0.177	8.89
100	0.149	4.39
Finos	< 0.149	50.30

Tabla No. 13: Número de yodo para carbón activado a partir de pino con activación química

Muestra	Número de yodo, mg yodo, g carbón ± 6
1	1230
2	1235
3	1220
4	1235

Carbón Activado a partir de encino con activación química

Tabla No. 14: Porcentaje de humedad, densidad aparente y pH de cuatro muestras de carbón activado a partir de aserrín de encino con activación química

Muestra de carbón activado	Humedad, % ± 0.008	Densidad aparente, g/cm ³ ± 0.0127	pH, 25 °C ± 0.001
1	13.17	0.48	7.475
2	14.2	0.512	7.473
3	14.25	0.518	7.479
4	14.81	0.518	7.523

Tabla No. 15: Rendimiento de obtención de carbón activado a partir de aserrín de encino con activación química

Muestra de carbón activado	Rendimiento, %, ± 0.20
1	20.77
2	21.65
3	22.85
4	20.65

Tabla No. 16 Distribución de partícula de carbón activado a partir de aserrín de encino con activación química

Mesh No.	Abertura, mm	% de Carbón activado, ± 0.04
20	0.841	0.54
30	0.595	2.81
45	0.354	15.70
60	0.25	15.72
80	0.177	16.36
100	0.149	8.31
Finos	< 0.149	40.56

Tabla No. 17 Número de yodo para carbón activado a partir de pino con activación química

Muestra	Número de yodo, mg yodo, g carbón ± 6
1	1487
2	1482
3	1477
4	1495

Gráfico 3: Distribución de tamaño de partícula de carbón activado a partir de aserrín de pino con activación química

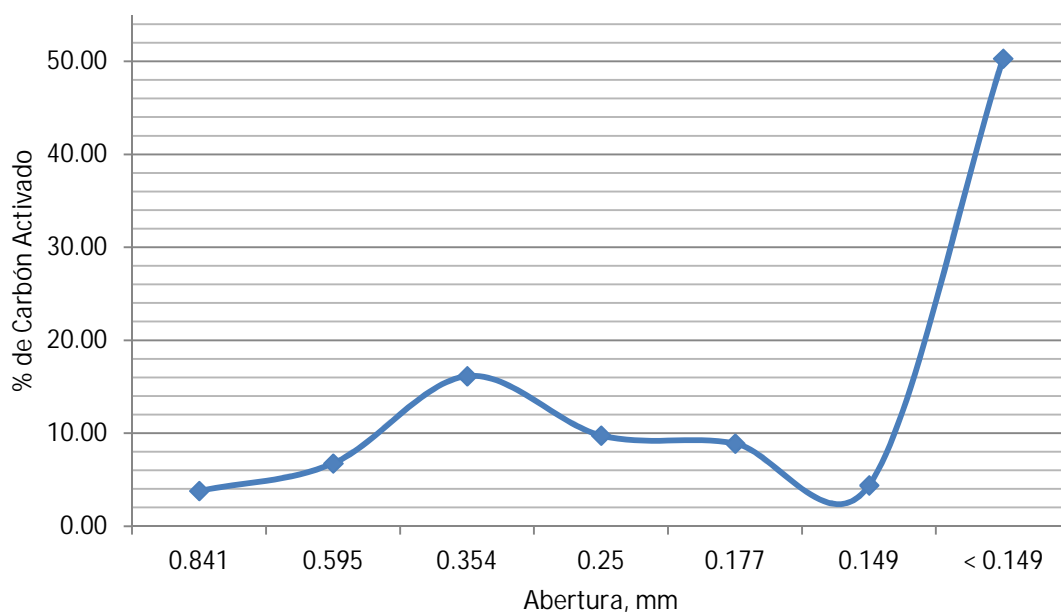
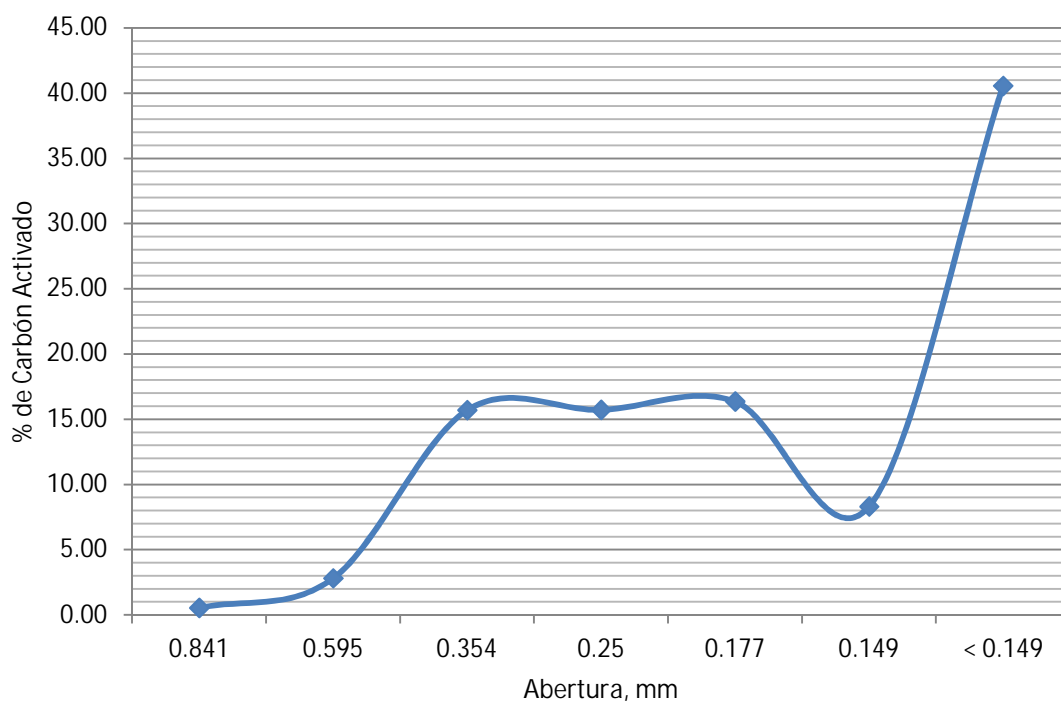


Gráfico 4: Distribución de tamaño de partícula de carbón activado a partir de aserrín de encino con activación química



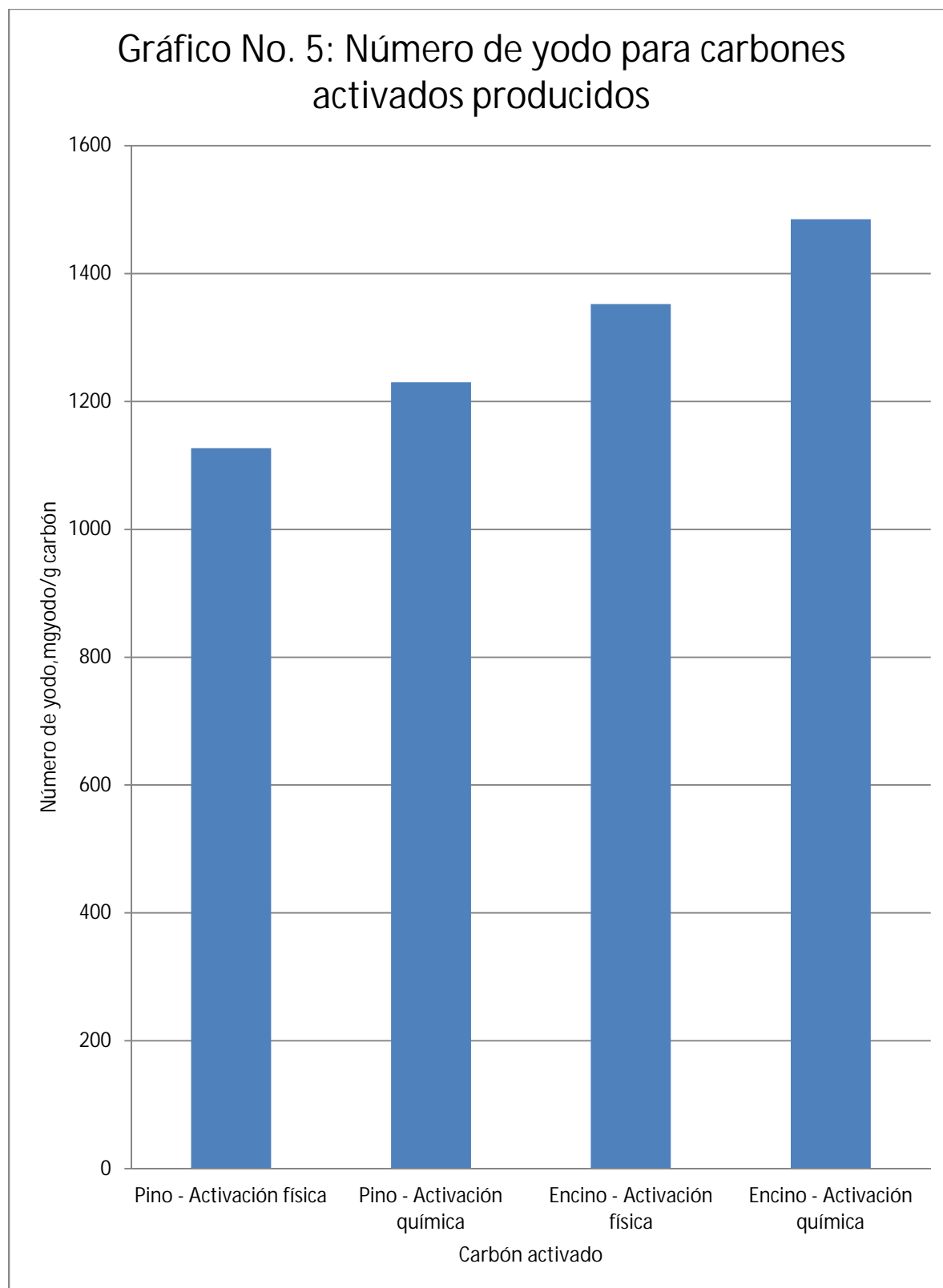
Características generales de los carbones activados producidos

Tabla No. 18 : Número de yodo para carbón activado de pino y encino con activación física y química

Carbón activado	Número de Yodo, mg yodo/g carbón	±
Pino - Activación física	1127	5
Pino - Activación química	1230	6
Encino - Activación física	1352	7
Encino - Activación química	1485	7

Tabla No. 19: Humedad, densidad aparente , pH y rendimientos de carbones activados producidos

Carbón activado	Humedad, %	±	Densidad aparente, g/cm ³	±	pH, 25 °C	±	Rendimiento, %	±
Pino - Activación física	8.97	0.48	0.27	0.01	8.78	0.04	33.93	0.37
Pino - Activación química	12.91	0.39	0.34	0.01	5.84	0.01	28.21	0.44
Encino - Activación física	12.96	0.62	0.37	0.00	8.96	0.01	27.48	0.39
Encino - Activación química	14.11	0.59	0.51	0.02	7.49	0.02	21.48	0.88



VIII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El propósito de este trabajo de investigación es obtener carbón activado de aserrín de pino y de encino con activación física y química, así como la determinación de las características del carbón activado. En la bibliografía se encuentra producción de carbón activado a partir de madera, el cual tiene características deseadas para la adsorción.

La primera parte de los análisis de la materia prima tuvo como objeto la caracterización de la materia prima. Para ello básicamente se analizaron varias muestras de aserrín y se obtuvo el porcentaje de humedad. El aserrín de pino para producir el carbón activado contenía una humedad promedio de $7.40 \pm 0.01\%$ y el aserrín de encino tenía una humedad de $9.79 \pm 0.01\%$. Debido a que esta humedad está entre el rango de 5 – 10%, según lo encontrado en la literatura, el tiempo de activación más óptimo es de dos horas.

Para el carbón activado con activación física a partir de aserrín de pino, se obtuvo una humedad que está en el rango de 8.24 – 9.42 % en peso y para el carbón activado con activación física a partir de aserrín de encino, se obtuvo una humedad que está en el rango de 12.30 – 13.87 % en peso. Comparando con el porcentaje de humedad en la activación física, el carbón activado a partir de aserrín de encino obtuvo más porcentaje de humedad, adsorbiendo mayor cantidad de agua en el ambiente. Así mismo, la materia prima que es el encino contiene mayor humedad que el pino, haciendo más adsorbente el aserrín de encino.

El pH de carbón activado a partir de pino con activación física estuvo entre el rango de 8.731 – 8.824 el cual se relaciona con el contenido de cenizas según lo encontrado en la literatura, teniendo una relación directamente proporcional. Este tipo de carbón activado, debido a su pH, puede ser usado en medios neutros o ligeramente alcalino.

La densidad aparente del carbón activado a partir de pino con activación física estuvo en un rango de 0.2538 – 0.2827. Los valores en la literatura indican que la densidad aparente mínima a partir de madera debe ser 0.25 g/cm^3 , lo cual los valores obtenidos indican que es ligeramente por encima por el valor aceptado para carbón activado usados en fase líquida.

Los rendimientos con activación física fueron mayores para el carbón activado a partir de pino. Esto se debe a que el pino es un árbol con menor cantidad de humedad, teniendo mayor masa de compuestos de carbono que posteriormente serán solamente carbón. Los rendimientos de activación física son muy bajos debido a que se está trabajando a una temperatura de 800 °C. Así mismo a altas temperaturas, se tiene una pérdida de materia orgánica, que hace que los rendimientos se vean disminuidos. En la literatura se encuentra que a mayor temperatura de activación, se tendrán menores rendimientos, pero la calidad adsorbente de carbón activado será mejor que es lo que se busca con el carbón activado.

La distribución de tamaño de partícula para el carbón activado con activación física son muy similares. Sin embargo en el carbón activado a partir de encino se tiene un porcentaje por 2% mayor que el obtenido con el pino. Lo más importante de este análisis de tamaño de partícula reside en que el más del 60% es más pequeño que 0.149mm, el cual se cumple para el carbón activado a partir de pino y de encino. Comparando el tamaño de partícula de los carbones activados a partir de madera, generalmente son mayores que el Mesh 100, por lo que el carbón activado con activación física de pino y encino cumple con esta especificación.

El pH de carbón activado a partir de encino con activación física estuvo entre el rango de 8.954 – 8.975 el cual se relaciona con el contenido de cenizas según lo encontrado en la literatura, teniendo una relación directamente proporcional. Este tipo de carbón activado, debido a su pH, puede ser usado en medios ligeramente alcalino. En comparación con el carbón activado con activación física de pino, el carbón activado con activación física de encino es más básico y tomando en base a la literatura, este tiene mayor cantidad de cenizas.

La densidad aparente del carbón activado a partir de encino con activación física estuvo en un rango de 0.362 – 0.374 g/cm³, lo cual los valores obtenidos indican que es aceptable para carbón activado usados en fase líquida. Comparando con el carbón activado con activación física de pino, el carbón activado con activación física de encino tiene mayor densidad aparente.

A pesar de activar el carbón a una temperatura de 800 °C, donde se tiene menor densidad aparente, el valor de la densidad aparente para los carbones activados con activación física son aceptables. Si se hubiera activado a una temperatura menor tal como 400 °C, se hubiera tenido una densidad aparente mayor. Para el carbón activado con activación química a partir de aserrín de pino, se obtuvo una humedad que está en el rango de 12.52 - 13.39 % en peso y para el carbón activado con activación física a partir de aserrín de encino, se obtuvo una humedad que está en el rango de 13.17 – 14.81 % en peso. Comparando con el porcentaje de humedad en la activación química, el carbón activado a partir de aserrín de encino obtuvo más porcentaje de humedad, adsorbiendo mayor cantidad de agua en el ambiente. Como panorama general en la humedad se tiene el siguiente esquema para los carbones activados producidos.

Humedad en carbón activado producidos según activaciones y origen.

Activación física pino < Activación química pino < Activación física encino < Activación química encino

En general, se obtuvo un porcentaje de humedad más alto en los carbones más adsorbentes, debido a su mayor capacidad de retener la humedad del medio ambiente.

Por las características anteriormente mencionadas, el carbón activado a partir de pino y encino con activación física obtenido se puede utilizar en remoción de color en soluciones, así como olor y sabor u otras impurezas no deseadas como aquellas que causan espuma en la solución. Este proceso generalmente se realiza en batch. El líquido a ser tratado se mezcla con una cantidad apropiada de carbón activado. Se calienta la solución para reducir viscosidad y se agita de 10-60 minutos. Cuando el proceso se completa, el carbón activado se separa por medio de filtración y se descarta o se regenera para un uso posterior.

Así mismo, este carbón activado puede ser usado para laboratorios, reacciones de catálisis y filtros de agua para acuarios.

El pH de carbón activado a partir de pino con activación química estuvo entre el rango de 5.833 – 5.862 . Este tipo de carbón activado, debido a su pH, puede ser usado en medios ligeramente ácidos. El pH de carbón activado a partir de encino con activación

química estuvo entre el rango de 7.473 – 7.523 . Este tipo de carbón activado, debido a su pH, puede ser usado en medios neutros. En comparación con el carbón activado con activación química de pino, el carbón activado con activación química de encino es más básico y tomando en base a la literatura, este tiene mayor cantidad de cenizas.

La densidad aparente del carbón activado a partir de pino con activación química estuvo en un rango de 0.3304 – 0.3495 g/cm³. La densidad aparente del carbón activado a partir de encino con activación química estuvo en un rango de 0.48 – 0.518 g/cm³. Las densidades de los carbones activados estuvieron de la siguiente manera, según su tipo de activación y tipo de madera, como se observa en la tabla no. 20. Los carbones activados comerciales a partir de madera tienen una densidad mayor de 0.25 g/cm³, por lo que los 4 tipos de carbón activado producidos cumplen con esta característica, haciéndolos ideales para usarlos en la industria.

Activación física pino < Activación química pino < Activación física encino < Activación química encino.

Relacionando la humedad del carbón activado y su densidad aparente se observa que a mayor humedad, se tendrá una mayor densidad aparente.

La aplicación del carbón activado de pino con activación química es adecuado para la remoción de sustancias tóxicas o biorefractivas. Insecticidas, herbicidas, hidrocarburos clorados y fenoles, típicamente presentes en muchos suministros de agua pueden ser reducidos considerablemente con el tratamiento de carbón activado. Otra aplicación para este carbón activado es la galvanoplastia para remover impurezas orgánicas del batch. También puede ser usado para recuperación de oro de las pulpas de la lixiviación del cianuro. Así, el oro puede ser recuperado incinerando el carbón o diluyendo el oro.

La aplicación del carbón activado de encino con activación química sería la remoción de color del azúcar. Este uso en la industria azucarera remueve proteína así como hidroximetilsulfuro del jarabe, dando una presentación sin color y estable. Este carbón activado es ideal ya que posee un pH neutro, siendo el más adecuado a utilizar en este proceso. Así mismo, este carbón activado puede ser usado en la purificación y remoción de

color durante el procesamiento de jugos de frutas, miel, jarabe de maple, dulces, gaseosas y bebidas alcohólicas.

Los rendimientos con activación química fueron mayores para el carbón activado a partir de pino. Esto se debe a que el pino es un árbol con menor cantidad de humedad, teniendo mayor masa de compuestos de carbono que posteriormente serán solamente carbón. Como se observa en el cuadro 20, el carbón activado que posee menor humedad tiene el rendimiento más alto. Haciendo la relación humedad/rendimiento una relación inversamente proporcional. Como se ha visto hasta ahora la humedad del carbón activado es una propiedad que está relacionada con las otras características, siendo un parámetro importante en las características del carbón. Así mismo se observa que se obtiene un menor rendimiento para carbones activados más adsorbentes. Esto se debe probablemente que en el momento de la carbonización, los macroporos de mayor tamaño son obstruidos por las resinas no liberadas, y no se forman los microporos.

La distribución de tamaño de partícula para el carbón activado con activación química son distintas en el carbón de pino y encino. El carbón activado a partir de encino se tiene una distribución de partícula más similar, teniendo promedios más similares en tamaños de partícula, sin embargo solo llega a un 40.56% para partículas más pequeña que Mes 100, siendo el carbón activado que tiene menos porcentaje de mesh 100. Por el contrario, el carbón activado de pino con activación química resalta que tiene el 50.30 % de partículas más pequeñas que Mes 100. El tamaño de partícula en este estudio es subjetivo debido que no se utilizó equipo de molienda especial para disminuir el tamaño de partícula, solamente se utilizó un mortero para moler el carbón activado y se termina de moler cuando se cree que se ha reducido en su totalidad las partículas.

Mediante la activación química se observa un incremento en la humedad del carbón activado, esto se debe que al aumentar la porosidad del carbón, el carbón tiene la capacidad de adsorber mayor humedad del ambiente. Así mismo, debido a que se realizó en época lluviosa y no tener un ambiente controlado de temperatura y humedad, el carbón activado adsorbe la humedad del ambiente.

Por otra parte, la activación química aumenta la densidad aparente del carbón activado, que es deseada ya que a una mayor densidad aparente, se tiene una mayor capacidad adsorptiva para carbones activados a partir de maderas. Esto se debe a que con la activación química se aumenta la porosidad del carbón activado, haciendo que tenga una mayor densidad aparente y esto hace que el carbón activado producido sea un mejor adsorbente.

El proceso de impregnación para la activación química está influenciado por el tiempo y temperatura. En este estudio se realizó la impregnación a temperatura ambiente, por lo que solo se tomó en cuenta el tiempo como variable. Así, la impregnación con ácido fosfórico se hizo por 48 horas, un tiempo suficiente para que se de a totalidad la impregnación.

El tiempo de impregnación utilizado es el que produce el mejor carbón activado, con mayor capacidad de adsorción, así como la temperatura de activación que es de 800 °C, según se encontró en la literatura. Esto da como resultado que existe un gran aumento de microporos, lo que hace que el carbón activado sea más adsorbente.

Tal como se esperaba, la capacidad adsorptiva de los carbones activados químicamente son mejores que los carbones activados físicamente. Mediante la impregnación, se logró que los carbones tuvieran una mejor adsorción, haciendo que se produjera carbón activado con adsorción similar a los carbones activados comerciales.

Se escogió una temperatura de 2 horas para la activación a 800 °C, ya que si se da un mayor tiempo, se incrementara el porcentaje de cenizas ya una parte del carbón se pierde en dióxido de carbono y por lo tanto el rendimiento disminuye considerablemente.

Hasta ahora se ha enfocado la parte de las características de los carbones producidos, sin embargo lo más importante es la capacidad de adsorción de los carbones activados. Para ello se hace la prueba de número de yodo. Este parámetro nos indicará si el carbón producido es un buen carbón o un mal carbón. Así este número nos indicará la porosidad en el carbón activado.

El número de yodo puede ser usado para dar una aproximación de área superficial para algunos tipos de carbón. Sin embargo este método de área superficial necesita equipo costoso y métodos muy complicados.

La Tabla no. 19 da el número de yodo en mg de yodo adsorbido/g de carbón activado utilizado. Como se observa en todos los carbones activados tienen un número de yodo mayor a 1000 mg yodo / g carbón, lo que es un excelente indicativo. Se produjo carbones activados con número de yodo en el rango de 1127 – 1485 mg yodo / g de carbón.

El carbón activado de pino con activación física tuvo un número de yodo de 1127 ± 5 mg yodo /g de carbón. El carbón activado de pino con activación química tuvo un número de yodo de 1230 ± 6 mg yodo /g de carbón. Como se observa la activación química con ácido fosfórico tuvo el efecto deseado de aumentar la porosidad y adsorptividad del carbón activado. El carbón activado de encino con activación física tuvo un número de yodo de 1352 ± 7 mg yodo /g de carbón. El carbón activado de encino con activación química tuvo un número de yodo de 1485 ± 7 mg yodo /g de carbón. Como fue el caso de pino, para el encino también se tiene un aumento de porosidad y adsorción con la activación química con ácido fosfórico.

Como se observa, mientras mayor sea la humedad del carbón activado, mayor será el número de yodo del carbón activado. La relación que existe entre el número de yodo y la humedad del carbón activado es directamente proporcional. Esto se debe a que el carbón que adsorbe más yodo tiene la capacidad de adsorber mayor humedad del ambiente.

Así mismo, se observa que la densidad aparente y el número de yodo también tienen relación directamente proporcional. De igual manera que la humedad, cuando la densidad aparente es mayor, se tiene un mayor número de yodo. Esto se debe que se al tener mayor porosidad, se tiene una mejor capacidad adsorptiva.

El rendimiento mayor obtenido fue de 33.93 ± 0.37 % para la activación física con pino, pero este solamente tiene un número de yodo de 1127 ± 6 mg yodo/ g carbón. El menor rendimiento obtenido fue 21.48 ± 0.88 % para el carbón activado de encino con activación química, sin embargo tiene como ventaja que su número de yodo es de 1485 ± 7 mg yodo/ g carbón.

Las muestras de carbón activado producido, tienen las características requeridas y propiedades adsorbentes para poder ser utilizados en la industria ya que tienen propiedades similares o mejores que los carbones activados comerciales.

IX. CONCLUSIONES

1. La madera de encino es materia prima para la producción de un buen carbón activado con activación química que se puede utilizar en la industria debido a las características obtenidas de: $14.11 \pm 0.59\%$ humedad, densidad aparente de $0.51 \pm 0.02 \text{ g/cm}^3$, y número de yodo de $1485 \pm 7 \text{ mg yodo/g carbón}$.
2. La densidad aparente del carbón activado y la adsorción del mismo tienen una relación directamente proporcional debido al aumento en la porosidad del carbón activado. La menor densidad aparente obtenida de $0.27 \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$ con la menor adsorción de $1127 \pm 5 \text{ mg yodo/g carbón}$ y la mayor densidad aparente de 0.51 g/cm^3 con la mayor adsorción de $1485 \pm 7 \text{ mg yodo/g carbón}$.
3. El proceso de impregnación de ácido fosfórico en la activación química es muy importante ya que mejora las características de adsorptividad del carbón activado producido, aumentando la cantidad de poros, así como el área superficial del mismo.
4. El carbón activado a partir de encino es más adsorbente que el carbón activado a partir de pino, ya sea con activación física o activación química obteniendo $1485 \pm 7 \text{ mg yodo/g carbón}$ para activación química de encino y $1230 \pm 6 \text{ mg yodo/g carbón}$ para activación química de pino.
5. El rendimiento mayor obtenido fue de $33.93 \pm 0.37 \%$ para la activación física con pino, pero este solamente tiene un número de yodo de $1127 \pm 6 \text{ mg yodo/g carbón}$. El menor rendimiento obtenido fue $21.48 \pm 0.88 \%$ para el carbón activado de encino con activación química, sin embargo tiene como ventaja que su número de yodo es de $1485 \pm 7 \text{ mg yodo/g carbón}$.
6. Se tiene un rendimiento mayor para los carbones activados a partir de pino y un rendimiento menor para los carbones activados a partir de encino, sin embargo la adsorción es mayor para los carbones activados a partir de encino y menor para los carbones activados a partir de pino.

7. Los carbones activados producidos pueden ser utilizados en medios con distinto pH. Para medio ácido se puede utilizar el carbón activado a partir de pino con activación química con pH de 5.84 ± 0.01 . Para medios neutros se puede utilizar carbón activado a partir de encino con activación química con pH de 7.49 ± 0.01 y para medios básicos los carbones activados con activación física con pH de 8.78 ± 0.01 para pino con activación física y 8.96 ± 0.01 para encino con activación física.

8. En vista de la alta capacidad adsorptiva y características del carbón activado producido de maderas de pino y encino, se puede usar para la remoción de contaminante de aguas de desecho, remoción de color en soluciones, así como olor y sabor u otras impurezas no deseadas como aquellas que causan espuma en la solución, remoción de color en el azúcar así como en insecticidas, herbicidas, hidrocarburos clorados y fenoles, típicamente presentes en muchos suministros de agua pueden ser reducidos considerablemente con el tratamiento de carbón activado.

X. RECOMENDACIONES

1. Realizar la impregnación con ácido sulfúrico para la activación química, enfocándose si existe un aumento en el número de yodo del carbón activado.
2. Analizar otro tipo de maderas para la producción de carbón activado, realizando una comparación con el pino y encino.
3. Aumentar la concentración de ácido fosfórico utilizado para la activación química, enfocándose si existe un aumento en el número de yodo del carbón activado.
4. Disminuir y variar el tiempo de impregnación para determinar si existe un cambio significativo en el número de yodo, así como las otras características analizadas al carbón activado en este trabajo.

XI. BIBLIOGRAFÍA

1. Aveyard, R, Haydon, D. 1973. *An introduction to the principles of surface chemistry*. Cambridge University Press, Cambridge.
2. Adamson, A. 1967. *Physical chemistry of surfaces*. 2 Edition. Interscience Publishers, New York, United States of America.
3. American Society for Testing and Materials. 1984. *1984 annual book of ASTM standards*. Philadelphia, United States of America.
4. Chaney, N. 1924. *Trans. A. Electrochem Soc.* Chaney.
5. Colmenares, A. 1984. *Producción de Carbón Activado a partir de la cáscara de semilla de hule. Hevea brasiliensis*. Tesis. Universidad del Valle de Guatemala.
6. Considine, D. 1974. *Chemical and process technology encyclopedia*. McGrawHill. New York.
7. Hassler, J. 1974. *Purification with activated carbón*. Chemical Publishing Co. New York. United States of America.
8. Juhola, A. 1975. *Carbón*. Chapter 13. Page 437
9. Marsh, H. 2001. *Activated Carbón Compendium*. Elsevier. United States of America.
10. Marsh, H. y Rodríguez , F. 2006. *Activated Carbón*. Elsevier. United States of America.
11. Matsumura, Y. 1975. *Applications of Chemical Biotechnology*. Chapter 25.
12. Morrison, R. 1978. *The Chemical physics of surfaces* . 2Edition, Plenum Press. New York, United States of America.
13. Shomaker, D. Garland, P. Steinfeld, J. 1981. *Experiments in Physical Chemistry*. 4Edition. McGrawHill, New York, United States of America.
14. Smisek, M. Cerny, S. 1970. *Active Carbón*. American Elsevier Publishing Co. New York. United States of America.
15. Williams, A. 1946. *Min J.* London. England

XII. ANEXOS

A. Datos originales

Tabla No. 20: Datos para humedad de Materia Prima para obtención de Carbón Activado

Muestra	Aserrín de pino			Aserrín de encino		
	Masa cápsula con cobertor, B, g ±0.0001	Masa cápsula con cobertor más muestra, C, g ±0.0001	Masa cápsula con cobertor más muestra seca, D, g ±0.0001	Masa cápsula con cobertor, B, g ±0.0001	Masa cápsula con cobertor más muestra, C, g ±0.0001	Masa cápsula con cobertor más muestra seca, D, g ±0.0001
A	5.000	6.0025	5.9283	5.000	6.2156	6.0966
B	5.000	6.0325	5.9556	5.000	6.0562	5.9517
C	5.000	6.0854	6.0053	5.000	6.3250	6.1967
D	5.000	6.0126	5.9381	5.000	6.1580	6.0447

Tabla No. 21: Datos obtenidos para porcentaje de humedad en carbón activado con activación física

Muestra	Carbón activado a partir de aserrín de pino			Carbón activado a partir de aserrín de encino		
	Masa cápsula con cobertor, B, g ±0.0001	Masa cápsula con cobertor más muestra, C, g ±0.0001	Masa cápsula con cobertor más muestra seca, D, g ±0.0001	Masa cápsula con cobertor, B, g ±0.0001	Masa cápsula con cobertor más muestra, C, g ±0.0001	Masa cápsula con cobertor más muestra seca, D, g ±0.0001
1	5.000	7.1250	6.9499	5.000	7.2325	6.9534
2	5.000	7.2350	7.0376	5.000	7.2153	6.9233
3	5.000	7.2156	7.0073	5.000	7.2315	6.9220
4	5.000	7.2156	7.0069	5.000	7.2153	6.9428

Tabla No. 22: Datos obtenidos para porcentaje de humedad en carbón activado con activación química

Muestra	Carbón activado a partir de aserrín de pino			Carbón activado a partir de aserrín de encino		
	Masa cápsula con cobertor, B, g ± 0.0001	Masa cápsula con cobertor más muestra, C, g ± 0.0001	Masa cápsula con cobertor más muestra seca, D, g ± 0.0001	Masa cápsula con cobertor, B, g ± 0.0001	Masa cápsula con cobertor más muestra, C, g ± 0.0001	Masa cápsula con cobertor más muestra seca, D, g ± 0.0001
1	5.000	7.0231	6.7694	5.000	7.2315	6.9376
2	5.000	7.2353	6.9554	5.000	7.0236	6.7362
3	5.000	7.3250	7.0181	5.000	7.0214	6.7334
4	5.000	7.3152	7.0052	5.000	7.0326	6.7316

Tabla No. 23: Datos obtenidos para densidad aparente carbón activado con activación física

Muestra	Aserrín de pino	Aserrín de encino
	Masa de carbón activado, g, $\pm 0.0001/100$ mL	Masa de carbón activado, g, $\pm 0.0001/100$ mL
1	25.3800	36.6000
2	26.3500	36.7000
3	26.8300	37.4000
4	28.2700	36.2000

Tabla No. 24: Datos obtenidos para densidad aparente carbón activado con activación química		
Muestra	Aserrín de pino	Aserrín de encino
	Masa de carbón activado, g, $\pm 0.0001/100$ mL	Masa de carbón activado, g, $\pm 0.0001/100$ mL
1	33.3200	48.0467
2	33.0400	51.1682
3	34.2100	51.8487
4	34.9500	51.7600

Tabla No. 25: Datos obtenidos para rendimientos de carbón activado con activación física				
Muestra	Aserrín de pino		Aserrín de encino	
	Masa de aserrín, g, ± 0.0001	Masa de carbón activado, g, ± 0.0001	Masa de aserrín, g, ± 0.0001	Masa de carbón activado, g, ± 0.0001
1	10.2530	3.4245	10.6565	2.8879
2	10.3560	3.5625	10.3650	2.9126
3	10.5480	3.5969	10.2560	2.7896
4	10.6589	3.6027	10.3650	2.8504

Tabla No. 26: Datos obtenidos para rendimientos de carbón activado con activación química				
Muestra	Aserrín de pino		Aserrín de encino	
	Masa de aserrín, g, ± 0.0001	Masa de carbón activado, g, ± 0.0001	Masa de aserrín, g, ± 0.0001	Masa de carbón activado, g, ± 0.0001
1	10.2560	2.8317	10.2540	2.1295
2	10.2140	2.9335	10.5860	2.2919
3	10.2360	2.8651	10.9650	2.5055
4	10.2560	2.9260	10.2560	2.1179

Tabla No. 27: Datos obtenidos para distribución de tamaño de partícula de carbón activado con activación física		
USA Standard ASTM E 11-61	Masa de carbón activado a partir de aserrín de pino, g, $\pm 0.0001g$	Masa de carbón activado a partir de aserrín de encino, g, $\pm 0.0001g$
20	0.1559	0.067
30	0.3158	0.240
45	1.0069	0.866
60	0.8644	0.833
80	0.9894	1.070
100	0.5855	0.679
Finos	6.3355	6.457
Total	10.2533	10.214

Tabla No. 28: Datos obtenidos para distribución de tamaño de partícula de carbón activado con activación química		
USA Standard ASTM E 11-61	Masa de carbón activado a partir de aserrín de pino, g, $\pm 0.0001g$	Masa de carbón activado a partir de aserrín de encino, g, $\pm 0.0001g$
20	0.3845	0.0564
30	0.6848	0.2937
45	1.6364	1.6410
60	0.9892	1.6431
80	0.9019	1.7100
100	0.4454	0.8686
Finos	5.1031	4.2395
Total	10.1453	10.4523

Tabla No. 29: Datos para obtención de número de yodo para carbón activado a partir de pino con activación física

Muestra	5% HCl usado, mL, H	Filtrado titulado, mL, F	Factor de dilución, DF	Carbón Activado, g, M	Tiosulfato de sodio, mL, S	yodo adsorbido por gramo de carbón, X/M	Filtrado residual, N, C
A	5	25	1.2	0.523	4.3	1031.78	0.017
B	5	25	1.2	0.7078	2.8	794.68	0.011
C	5	25	1.2	0.7765	2.2	736.16	0.009

Tabla No. 30: Datos para obtención de número de yodo para carbón activado a partir de encino con activación física

Muestra	5% HCl usado, mL, H	Filtrado titulado, mL, F	Factor de dilución, DF	Carbón Activado, g, M	Tiosulfato de sodio, mL, S	yodo adsorbido por gramo de carbón, X/M	Filtrado residual, N, C
A	5	25	1.2	0.3032	3.7	1645.36	0.031
B	5	25	1.2	0.412	2.2	1313.35	0.018
C	5	25	1.2	0.5267	1.2	1082.66	0.01

Tabla No. 31: Datos para obtención de número de yodo para carbón activado a partir de pino con activación química

Muestra	5% HCl usado, mL, H	Filtrado titulado, mL, F	Factor de dilución, DF	Carbón Activado, g, M	Tiosulfato de sodio, mL, S	yodo adsorbido por gramo de carbón, X/M	Filtrado residual, N, C
A	5	25	1.2	0.5205	4	1045.47	0.016
B	5	25	1.2	0.7314	2.6	773.22	0.01
C	5	25	1.2	0.6256	3	894.15	0.012

Tabla No. 32: Datos para obtención de número de yodo para carbón activado a partir de encino con activación química

Muestra	5% HCl usado, mL, H	Filtrado titulado, mL, F	Factor de dilución, DF	Carbón Activado, g, M	Tiosulfato de sodio, mL, S	yodo adsorbido por gramo de carbón, X/M	Filtrado residual, N, C
A	5	15	2	0.864	1.4	1128.53	0.0093
B	5	15	2	0.7012	2.4	1354.25	0.016
C	5	15	2	0.6705	2.7	1404.87	0.018

B. Ecuaciones

1. Porcentaje de humedad ASTM D-2867-91

$$\text{Humedad, \%} = \left[\frac{C - D}{C - B} \right] * 100$$

Donde:

B = peso de cápsula con tapa, g

C = peso de cápsula con tapa más muestra original, g

D = peso de cápsula con tapa más muestra seca, g

$$\text{Humedad, \%} = \left[\frac{V}{C - E} \right] * 100$$

Donde:

V = agua colectada, mL

C = peso inicial de botella, g

E = peso de muestra después de remover humedad, g

2. Densidad aparente ASTM D-2854-89

$$\text{Densidad aparente, } \frac{g}{mL} = \text{Peso de carbon activado}/100$$

3. Adsorción de yodo ASTM D-4607-86

Estandarización de 0.1N Tiosulfato de Sodio

$$N1 = (P * R)/S$$

Donde:

N1 = Tiosulfato de sodio, N

P = Yodato de potasio, N

R = Yodato de potasio, mL

S = Tiosulfato de sodio, mL

Estandarización de 0.1N solución de yodo

$$N2 = (S * N1)/I$$

Donde:

N2 = yodo, N

S = Tiosulfato de sodio, mL

N1 = Tiosulfato de sodio, N

I = Yodo, mL

$$A = N2 * 12693.0$$

$$B = N1 * 126.93$$

$$DF = (I + H)/F$$

Donde:

DF = factor de dilución,

I = Yodo, mL

H = 5% HCl, mL

F = Filtrado, mL

$$\frac{X}{M} = [A - DF * B * S]/M$$

Donde:

X/M = yodo adsorbido por gramo de carbón, mg/g

S = Tiosulfato de sodio, mL

M = Carbón, g

$$C = (N1 * S)/F$$

Donde:

C = Filtrado residual, N

N1 = tiosulfato de sodio, N

M = Carbón, g

Se obtienen tres puntos (C, X/M)

Por regresión lineal se obtiene X/M con $C = 0.02N$, el cual es el valor de número de yodo para el carbón activado analizado.

C. Cálculos de Muestra

- Cálculo No. 1: Cálculo para obtención de humedades en carbón activado

Para Carbón activado a partir de pino con activación física.

Para la muestra 1 en tabla no. 21.

$$B = 5.0000 \pm 0.0001g$$

$$C = 7.1250 \pm 0.0001g$$

$$D = 6.9499 \pm 0.0001g$$

$$Humedad, \% = \left[\frac{C - D}{C - B} \right] * 100$$

$$Humedad, \% = \left[\frac{6.9499 \pm 0.0001g - 5.0000 \pm 0.0001g}{7.1250 \pm 0.0001g - 5.0000 \pm 0.0001g} \right] * 100$$

$$Humedad, \% = 8.240 \pm 0.008$$

Se realizó el mismo procedimiento para la humedad para los demás carbones activados

- Cálculo No. 2: Cálculo de densidad aparente para carbón activado

Para carbón activado a partir de pino activación física

Para la muestra 1 tabla no. 23

$$\text{Masa en 100 mL} = 25.380 \pm 0.0001$$

$$\text{Densidad aparente, } \frac{g}{mL} = \text{Peso de carbon activado}/100$$

$$\text{Densidad aparente, } \frac{g}{mL} = 25.3800 \pm 0.0001/100 \pm 0.5$$

$$0.2538 \pm 0.0127 \text{ g/mL}$$

Se realizó el mismo procedimiento para el cálculo de densidad aparente de los demás carbones activados

- Cálculo No. 3: Cálculo para obtención de rendimiento del carbón activado producido.

Para carbón activado a partir de pino con activación física

Para la muestra 1, tabla no. 25

$$\text{Masa de Aserrín, g, } \pm 0.0001 = 10.253$$

$$\text{Masa de Carbón Activado, g, } \pm 0.0001 = 3.4245$$

$$\text{Rendimiento, \%} = \frac{[\text{Masa de Carbon Activado}]}{[\text{Masa de Aserrin}]} * 100$$

$$\text{Rendimiento, \%} = \frac{[3.4245 \pm 0.0001]}{[10.253 \pm 0.0001]} * 100$$

$$33.40 \pm 0.20 \%$$

Se realizó el mismo procedimiento para calcular los demás rendimientos de los otros carbones activados.

- Cálculo No. 4: Cálculo para obtener la distribución de tamaño de partícula del carbón activado.

Para la distribución de carbón activado a partir de madera de pino con activación química.

Tabla No. 27

USA Standard ASTM E 11-61	Masa de carbón activado a partir de aserrín de pino, g, ± 0.0001 g
20	0.1559
30	0.3158
45	1.0069
60	0.8644
80	0.9894
100	0.5855
Finos	6.3355
Total	10.2533

$$Tamaño, \% = \frac{[Masa\ de\ carbon\ activado\ en\ plato]}{[Masa\ total\ de\ Carbon\ Activado]} * 100$$

Para el plato con Mesh 20

Masa de Carbón activado a partir de Aserrín de Pino, g, ± 0.0001 g = 0.1559

g

Masa Total de Carbón Activado = 10.2533 g

$$Tamaño, \% = \frac{[0.1559 \pm 0.0001]}{[10.2533 \pm 0.0001]} * 100$$

1.52 \pm 0.04 %

Se realizó el mismo procedimiento para los demás platos y para los demás carbones activados.

- Cálculo No. 5: Cálculo para obtención de Número de Yodo del carbón activado.

Con la Tabla no. 29, Muestra A

$$N1 = 0.100 \text{ N Tiosulfato de sodio}$$

$$N2 = \frac{11.9 * 0.100}{25} = 0.0476$$

$$A = 0.0476 * 12693.0 = 605.19$$

$$B = 0.1 * 126.93 = 12.71$$

$$DF = \frac{25 + 5}{25} = 1.2$$

$$\frac{X}{M} = \frac{[605.19 - 1.2 * 12.71 * 4.3]}{0.523} = 1031.73$$

$$C = \frac{0.10 * 4.3}{25} = 0.017$$

Este es el primer punto para hacer la gráfica no. 6 (anexos)
Los otros dos puntos se obtienen con el mismo procedimiento y se realiza una regresión lineal con los tres puntos.

Estos son los tres puntos obtenidos:

X/M	C
1031.78	0.017
794.68	0.011
736.16	0.009

La regresión lineal obtenida es:

$$X/M = 35957 (C) + 407.59$$

$$R^2 = 0.9914$$

Se obtiene X/M con $C = 0.02$

$$X/M = 35957 (0.02) + 407.59 = 1126 \pm 4 \text{ mg yodo/ g carbón}$$

Se realiza el mismo procedimiento para obtención de número de yodo para los demás carbones activados

D. Análisis de Error

- Cálculo No 6. : Incertidumbre para sumas y restas

Para la resta del cálculo no. 1

C – D

$$C = 7.1250 \pm 0.0001 \text{g}$$

$$D = 6.9499 \pm 0.0001 \text{g}$$

$$S_y = \sqrt{S_a^2 + S_b^2 + S_c^2} \text{ (Ecuación No 9, Skoog, 2005)}$$

$$S_y = \sqrt{(0.01)^2 + (0.01)^2} \text{ (Ecuación No 9, Skoog, 2005)}$$

$$\pm 0.008$$

Se realizó el mismo procedimiento para incertidumbres de sumas y restas

- Cálculo No.7 : Incertidumbre para multiplicaciones y divisiones

Para la división en el cálculo no. 1

$$\text{Humedad, \%} = \left[\frac{1.9499 \pm 0.0001g}{2.1250 \pm 0.0001g} \right] * 100$$

$$\frac{S_y}{y} = \sqrt{\frac{(0.0001)^2}{1.9499} + \frac{(0.0001)^2}{2.1250}} \quad (\text{Ecuación No. 10, Skoog, 2005})$$

$$8.240 \pm 0.008$$

Se realizó el mismo procedimiento para incertidumbres de multiplicaciones y divisiones

- Cálculo No. 8: Cálculo de Promedios

Para obtención humedad del carbón activado a partir de pino con activación física en Tabla no. 19

Esta humedad se obtuvo con los datos de la Tabla no. 2:

Muestra de Carbón Activado	Humedad, % ±0.008
1	8.240
2	8.830
3	9.400
4	9.420

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} \quad (\text{Ecuación No. 11, Skoog, 2005})$$

$$\bar{x} = \frac{8.24 + 8.83 + 9.40 + 9.42}{4}$$

$$8.97 \pm 0.48\%$$

Se realizó el mismo procedimiento para la obtención de otros promedios.

- Cálculo No. 9: Cálculo de Desviación estándar

Para desviación estándar en promedios obtenidos

Para obtención de humedades en carbón activado a partir de pino con activación física Tabla no. 19.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (\text{Ecuación No. 12, Skoog, 2005})$$

Muestra de Carbón Activado	Humedad, % ±0.008
1	8.240
2	8.830
3	9.400
4	9.420

Promedio = 8.970

Se utilizó Microsoft Excel para obtención de Desviación Estándar.

DESVEST(8.97,8.24,8.83,9.40,9.42)

= ±0.48

E. Gráficos

Gráfico No.6: Número de yodo para carbón activado a partir de pino con activación física

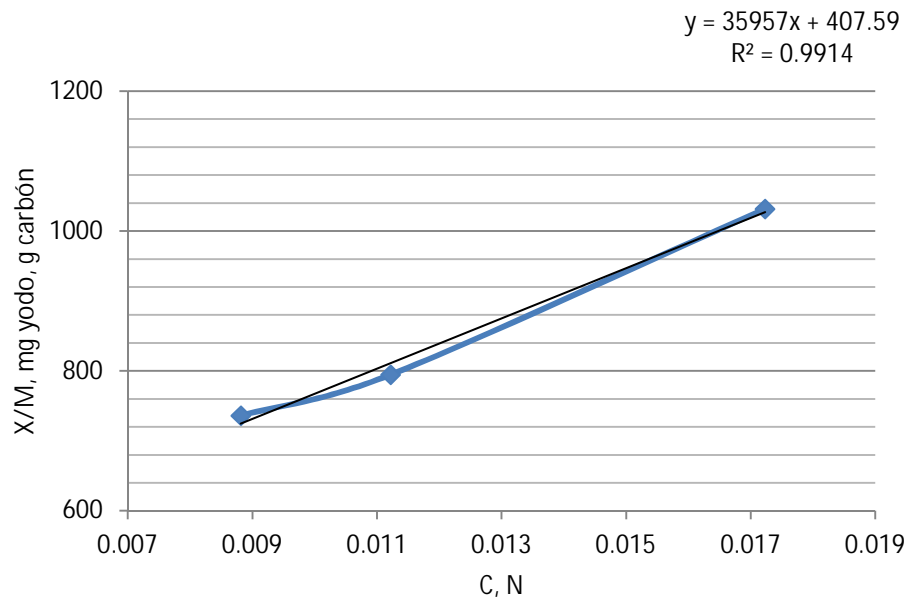


Gráfico No. 7: Número de yodo para carbón activado a partir de pino con activación química

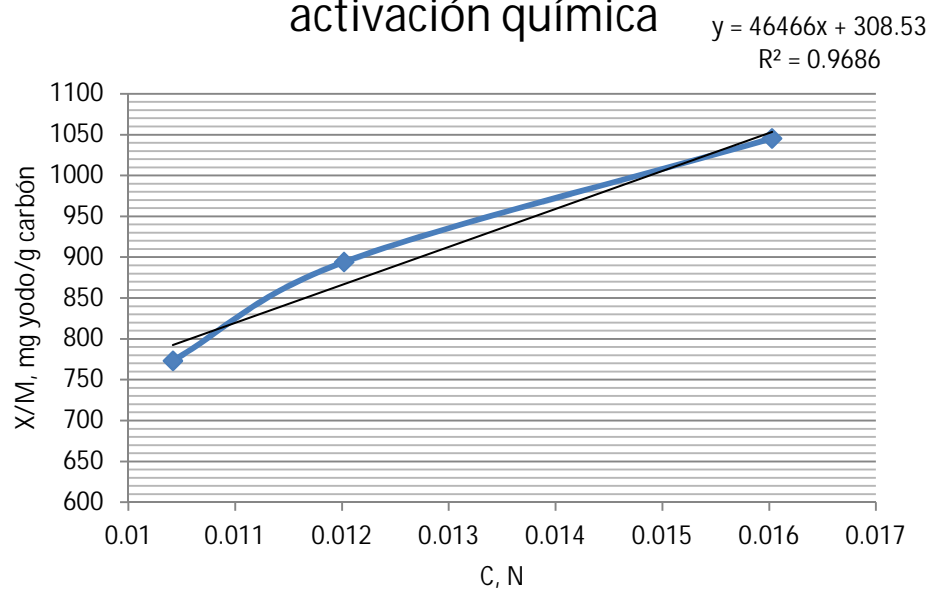


Gráfico No. 8: Número de yodo para
carbón activado a partir de encino
con activación física

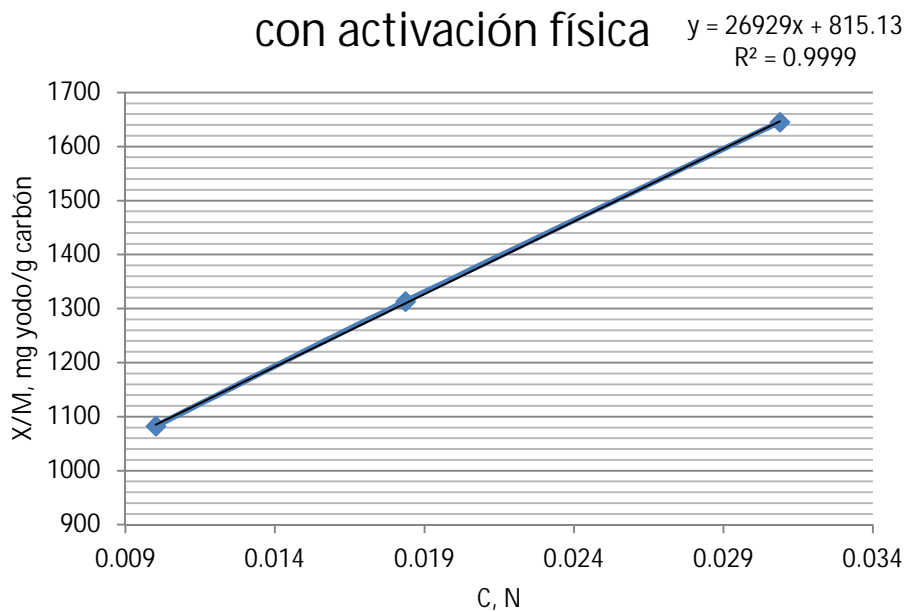
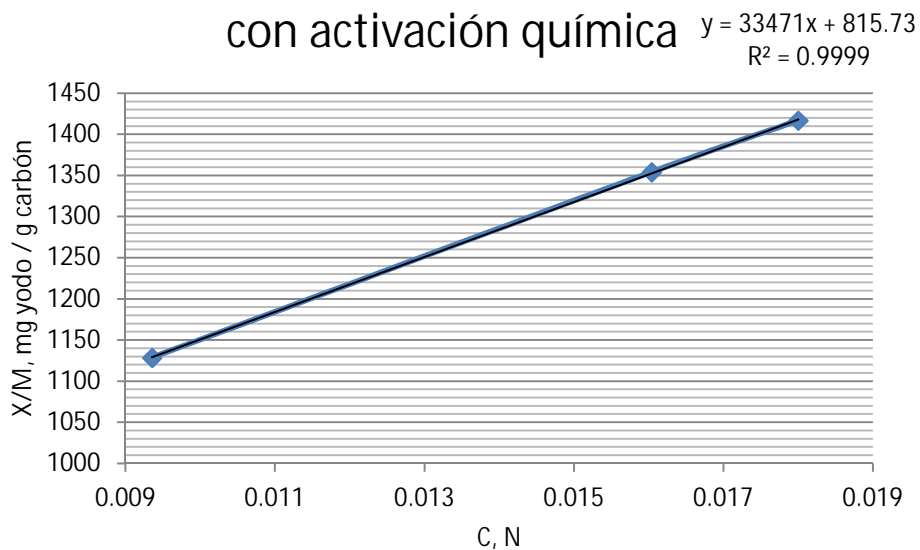


Gráfico No.9: Número de yodo para
carbón activado a partir de encino
con activación química



F. Fotografías

Figura No. 1: Mufla Thermolyne Model FA10525P-1, No. Serial 32501661, 120 V, 14.0 amp, 1680 Watts.



Figura No. 2: Proceso de impregnación por 48 horas con ácido Fosfórico 0.365M con madera pino y encino.



Figura No. 3: Prueba de remoción de color de carbón activado a partir de encino con activación física. Se utilizó un colorante orgánico verde.

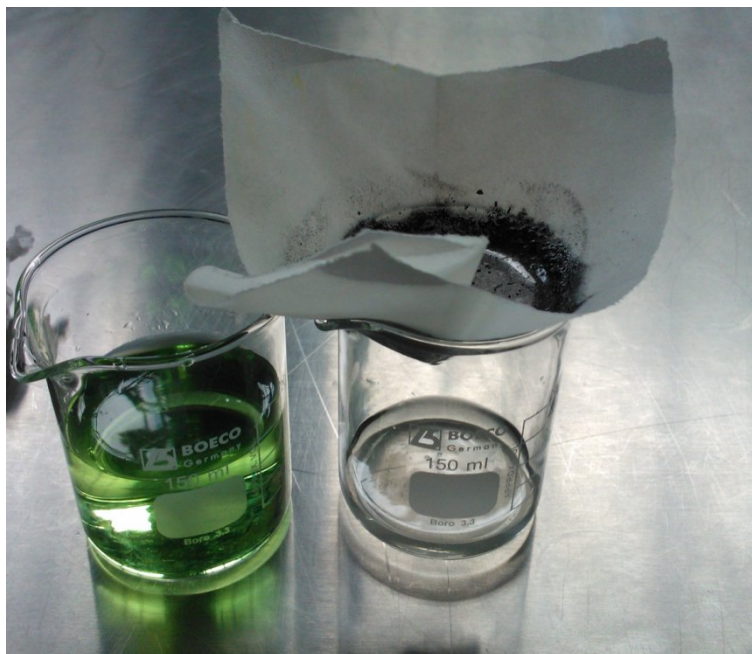


Figura No. 4: Solución de yodo 0.1N, utilizada para la obtención de número de yodo.



Figura No. 5: Carbón activado producido a partir de madera de pino

