

UNIVERSIDAD NACIONAL INTERCULTURAL DE LA AMAZONIA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AMBIENTALES

CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL



**EFFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE ÁCIDO FOSFÓRICO, TEMPERATURA Y TIEMPO
DE CARBONIZACIÓN EN LA CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO
DE RAQUIS DE PALMA ACEITERA (*Elaeis guineensis* Jacq)**

Tesis para optar el título de Ingeniero Agroindustrial

Que presentan los bachilleres:

EBER ARMAS QUISPE

LUIS ANTONIO RETIS SILVA

UCAYALI – PERÚ

2019

Agradecimiento

A nuestros padres, por su apoyo incondicional, permitiéndonos culminar con nuestros estudios y el desarrollo de esta tesis.

Al Ing. Alex Zumaeta Rengifo e Ing. Jessy Vargas Flores, por formar parte del equipo de investigación y por el apoyo brindado a lo largo del desarrollo de este trabajo.

Asimismo, al Ing. Vitelio Asencios Tarazona, Ing. Mg. Mirko Chávez Cabellos y Qco. Mg. Lylians Inga Rojas, por las sugerencias proporcionada para el desarrollo de la tesis.

Un agradecimiento especial al Ing. Mg. Edgardo Vicente Santacruz, por todas sus sugerencias y apoyo en el desarrollo de las pruebas de adsorción.

Finalmente, un agradecimiento especial al Técnico de Laboratorio, Sr. Gerardo Arimuya Ihuaquai, por las facilidades en el uso de los materiales e instrumentos del laboratorio de Transformación Química de la Madera de la Universidad Nacional de Ucayali.

INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	1
INDICE GENERAL	2
INDICE DE FIGURAS	4
INDICE DE TABLAS	5
INDICE DE ANEXO	6
RESUMEN	7
ABSTRACT	8
I. INTRODUCCION	9
II. REVISION BIBLIOGRAFIA	10
2.1 Palma aceitera	10
2.1.1 Botánica de la palma aceitera	10
2.1.2 Raquis de palma o tusas	10
2.1.3 Caracterización de raquis de palma aceitera	11
2.2 Carbón activado	12
2.2.1 Clasificación de los diferentes tipos de carbón activado	13
2.2.2 Obtención mediante proceso químico	15
2.2.3 Adsorción con carbón activo	16
2.2.4 Aplicación	17
2.3 Espectrofotometría	18
2.3.1 Espectrofotometría de adsorción molecular	19
2.3.2 Aplicaciones de la espectrofotometría UV-Vis para la determinación de la concentración de especies químicas	21
2.3.3 espectrofotómetro	22
III. METODOS Y MATERIALES	25
3.1 Lugar de ejecución	25
3.2 Muestra de raquis de palma aceitera	25
3.3 Análisis proximal de la muestra de raquis de palma aceitera	25
3.3.1 contenido de humedad	25
3.3.2 contenido de cenizas	26
3.3.3 Contenido de materia volátil	26
3.4 Preparación de carbón activado	27
3.4.1 Preparación de la muestra	27
3.4.2 Impregnación de la muestra	27
3.4.3 Activación y carbonización	28
3.4.4 Lavado del carbón activo	29
3.4.5 Secado y almacenado	30
3.4.6 Diagrama de flujo	31

3.5 Rendimiento de carbón activado.....	32
3.6 Prueba de adsorción del carbón activado en azul de metileno.....	32
3.7 Estudio de efectos de los factores en la capacidad de adsorción	33
3.7.1 Diseño estadístico	33
3.7.2 Modelo matemático	34
3.7.3 Esquema experimental.....	34
3.7.4 Prueba estadística para el estudio de los efectos	35
IV. RESULTADO Y DISCUSIONES	36
4.1 Análisis de la muestra: Determinación de humedad, cenizas y materia volátil.....	36
4.2 Rendimiento de los tratamientos para la obtención de carbón activado.....	36
4.3 Adsorción de azul de metileno	37
4.4 Estudio estadístico del efecto de los factores en la capacidad de adsorción	39
4.4.1 Kruskal Wallis: concentración de ácido fosfórico vs adsorción	40
4.4.2 kruskal Wallis: temperatura de carbonización vs adsorción.....	41
4.4.3 Kruskal Wallis: tiempo de carbonización vs adsorción.....	42
V. CONCLUSIONES	45
VI. RECOMENDACIONES	46
VII. BIBLIOGRAFIA	47
VIII ANEXOS	50

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tusas o raquis de palma aceitera.....	11
Figura 2. Macroporo y mesoporo de granulo de carbón activado.....	13
Figura 3. Diagrama de nombres, frecuencias y longitudes de onda (en vacío) de la radiación electromagnética.....	19
Figura 4. Términos y símbolos.....	20
Figura 5. Atenuación del haz de luz.....	21
Figura 6. Diagrama del espectrofotómetro.....	23
Figura 7. Raquis de palma aceitera lavada y secada.....	25
Figura 8. Raquis de palma aceitera cortado.....	27
Figura 9. Muestra de raquis de palma aceitera en proceso de impregnación.....	28
Figura 10. Envases de carbonización con las muestras listas para el ingreso a la mufla.....	29
Figura 11. Secado del carbón activado de raquis de palma aceitera.....	30
Figura 12. Diagrama de flujo para la obtención del carbón activado de raquis de palma aceitera.....	31
Figura 13. Árbol de la experimentación.....	34
Figura 14. Promedio de adsorción.....	39
Figura 15. Concentración de ácido fosfórico en la capacidad de adsorción.....	41
Figura 16. Temperatura de carbonización en la capacidad de adsorción.....	42
Figura 17. Tiempo de carbonización en la capacidad de adsorción.....	43
Figura 18. Curva de calibración.....	53
Figura 19. Histograma para la concentración de 30 por ciento.....	57
Figura 20. Histograma para la concentración de 60 por ciento.....	58
Figura 21. Histograma para la concentración de 85 por ciento.....	59
Figura 22. Histograma para la temperatura de 300 grados centígrados.....	60
Figura 23. Histograma para la temperatura de 400 grados centígrados.....	61
Figura 24. Histograma para la temperatura de 500 grados centígrados.....	62
Figura 25. Histograma para el tiempo de 1 hora.....	63
Figura 26. Histograma para el tiempo de 2 horas.....	64
Figura 27. Histograma para el tiempo de 3 horas.....	65

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición química del raquis de palma aceitera.....	11
Tabla 2. Análisis próximo y elemental de tusas de palma aceitera.....	12
Tabla 3. Diseño de experimento.....	33
Tabla 4. Análisis próximo de la muestra de raquis de palma aceitera.....	36
Tabla 5. Rendimiento promedio por tratamiento.....	36
Tabla 6. Adsorción promedio del azul de metileno.....	38
Tabla 7. Resultado Kruskal Wallis, concentración de ácido fosfórico vs adsorción.....	40
Tabla 8. Resultado Kruskal Wallis, temperatura de carbonización vs adsorción.....	42
Tabla 9. Resultado Kruskal Wallis, tiempo de carbonización vs adsorción.....	43
Tabla 10. Humedad.....	50
Tabla11. Cenizas.....	50
Tabla12. Materia volátil.....	50
Tabla 13. Rendimiento del carbón activado de raquis de palma aceitera.....	51
Tabla 14. Medidas de absorbancia para la curva de calibración.....	53
Tabla 15. Medidas de absorbancia.....	54
Tabla 16. Adsorción en miligramo de azul de metileno por gramo de carbón activo.....	55
Tabla 17. Normalidad de la concentración de ácido fosfórico.....	57
Tabla 18. Normalidad de la temperatura de carbonización.....	60
Tabla 19. Normalidad del tiempo de carbonización.....	63
Tabla 20. Prueba de Levene.....	66
Tabla 21. Rangos para la concentración de ácido fosfórico.....	67
Tabla 22. Estadístico de prueba para la concentración de ácido fosfórico.....	67
Tabla 23. Rangos para la temperatura de carbonización.....	68
Tabla 24. Estadístico de prueba para la temperatura de carbonización.....	68
Tabla 25. Rangos para el tiempo de carbonización.....	69
Tabla 26. Estadístico de prueba para el tiempo de carbonización.....	69

INDICE DE ANEXO

Anexo 1. Análisis de humedad, cenizas y materia volátil de la muestra de raquis de palma aceitera.....	50
Anexo 2. Carbón activado de raquis de palma aceitera.....	51
Anexo 3. Curva de adsorción para la adsorción de azul de metileno.....	53
Anexo 4. Medidas de adsorción.....	54
Anexo 5. Prueba estadística de normalidad de los datos.....	57
Anexo 6. Prueba estadística de homocedasticidad de los datos.....	66
Anexo 7. Prueba estadística de kruskal Wallis: concentración de ácido fosfórico vs adsorción.....	67
Anexo 8. Prueba estadística de kruskal Wallis: temperatura de carbonización vs adsorción...	68
Anexo 9. Prueba estadística de kruskal Wallis: tiempo de carbonización vs adsorción.....	69
Anexo 10. Fotos del ensayo en laboratorio.....	70

Resumen

En el presente trabajo de investigación se utilizó el raquis de palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq), desecho industrial proveniente de la extracción de aceite que son poco aprovechados, quedando muchos desechos expuestos al ambiente lo cual pueden ser aprovechados en la realización de otros productos como el caso del carbón activado. Se obtuvo carbón activado a partir de raquis de palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq) mediante proceso de activación química, con el objetivo de determinar el efecto de la concentración de ácido fosfórico, temperatura de carbonización y tiempo de carbonización en la capacidad de adsorción del carbón activo en solución de azul de metileno. Para el estudio de factores y variables se realizó el diseño factorial 3^3 completo, para los factores de concentración de ácido fosfórico se estudió concentraciones de 85, 60 y 30 por ciento, las temperaturas de 300, 400, 500 grados centígrados y el tiempo de una, dos y tres horas, este estudio de factores y variables nos determinaría si tienen efecto o no lo tienen en el carbón activado de raquis de palma aceitera. Para estudios del carbón activado de raquis de palma aceitera se determinó la capacidad de adsorción mediante la técnica instrumental de espectrofotometría UV-Vis. Las mediciones de absorbancia se realizaron a 620 nanómetros, los resultados se analizaron mediante la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis, teniendo como resultado que todos los factores tienen efecto sobre la capacidad de adsorción, teniendo como mejores parámetros para el ácido fosfórico a una concentración del 85 por ciento, las temperaturas de carbonización de 300 y 400 grados centígrados y un tiempo de carbonización de una hora. Los mejores rendimientos de estos parámetros no fueron los mejores pero con un 29.976 por ciento destaca más el tratamiento de concentración de ácido fosfórico a 85 por ciento, temperatura de carbonización de 300 y tiempo de una hora.

Palabras claves: raquis de palma, carbón activado, activación química, capacidad de adsorción.

Abstract

In the present research work the oil palm rachis (*Elaeis guineensis* Jacq) was used, industrial waste from the extraction of oil that is little used, leaving many wastes exposed to the environment which can be used in the realization of other products such as the case of activated carbon. Activated carbon was obtained from oil palm rachis (*Elaeis guineensis* Jacq) by chemical activation process, in order to determine the effect of phosphoric acid concentration, carbonization temperature and carbonization time on carbon adsorption capacity active in methylene blue solution. For the study of factors and variables, the complete factorial design 3^3 was performed, for the concentration factors of phosphoric acid, concentrations of 85, 60 and 30 percent, temperatures of 300, 400, 500 degrees Celsius and the time of one, two and three hours, this study of factors and variables would determine if they have an effect or do not have it on activated charcoal oil. For studies of activated carbon from oil palm rachis, adsorption capacity was determined using the UV-Vis spectrophotometry instrument technique. Absorbance measurements were made at 620 nanometers, the results were analyzed by the non-parametric Kruskal Wallis test, resulting in all factors having an effect on adsorption capacity, having as the best parameters for phosphoric acid at a concentration of 85 percent, carbonization temperatures of 300 and 400 degrees Celsius and a carbonization time of one hour. The best yields of these parameters were not the best, but with 29,976 percent, the treatment of phosphoric acid concentration at 85 percent, carbonization temperature of 300 and time of one hour stand out.

Key words: palm rachis, activated carbon, chemical activation, adsorption capacity.

I. Introducción

En el Perú, el cultivo de palma aceitera está en aumento y parte de su extensión geográfica se encuentra en la región de Ucayali, que además en esta se ubican plantas extractoras de aceite de palma, del fruto de la palma aceitera se obtiene el aceite rojo, también llamado aceite crudo. Durante el proceso de obtención del aceite rojo se generan residuos, uno de estos residuos es el raquis de palma. El raquis de palma es utilizado como abono orgánico para las plantas de palma aceitera, pero, no se llega a usar todo, por lo que existe otra cantidad que se queda y al no tener otras formas de uso, son desechados en campos abiertos para su descomposición o son quemados.

El raquis de palma aceitera es un material lignocelulosa (Ramírez *et al.* 2011), se puede aprovecharse en la elaboración de carbón activado. Además, se han reportado estudios de la producción de carbones activados, usando diferentes fuentes de biomasa como hueso de aceituna, cáscara de coco, mazorca de maíz, residuos de té y muchos más. Los carbones activados tienen diversos usos, principalmente como adsorbentes (Ospina *et al.* 2013), entre una de ellas está el tratamiento de agua.

Por otra parte, no se tiene una fuente información sobre el uso de raquis de palma aceitera en elaboración de carbón activado mediante la activación química, por tal motivo, se tiene la necesidad de conocer los efectos de la concentración del agente químico, la temperatura y tiempo en la etapa de carbonización para la obtención de carbón activado. El carbón activado obtenido debe de tener efectos favorables en su capacidad de adsorción.

La presente investigación tiene como objetivo de estudio, determinar el efecto que tiene la concentración de ácido fosfórico, la temperatura de carbonización y tiempo de carbonización, en la capacidad de adsorción del carbón activado de raquis de palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq). Cuyas variables de estudio son cuantitativas y consta de tres factores y cada uno de dos factores tienen tres niveles, para la concentración de ácido fosfórico se tiene los siguientes niveles: 30, 60 y 85 por ciento, para el factor temperatura de carbonización sus niveles son 300°, 400° y 500° grados celsius y para el tercer factor tiempo de carbonización se tiene 1, 2 y 3 horas. Para la realización del objetivo se usó el método de activación química para la obtención del carbón activado y para determinar la capacidad de adsorción se usó el método espectrofotométrico UV-VIS, cuyos resultados de los métodos aplicados determinan si la hipótesis estudio: las concentraciones de 30, 60, 85 %v/v del ácido fosfórico y las temperaturas de 300°C, 400°C, 500°C en un tiempo de carbonización de 1 hora, 2 horas y 3 horas, tienen efectos en la capacidad de adsorción del carbón activado de raquis de palma (*Elaeis guineensis* Jacq), es aceptada o no.

II. Revisión de literatura

2.1 Palma aceitera

2.1.1 Botánica de la Palma Aceitera

El científico Hutchinson ha clasificado la palma aceitera como:

- División = Fanerógamas
- Tipo = Angiosperma
- Clave = Monocotiledóneas
- Orden = Palmales
- Familia = Palmaceae
- Tribu = Coccoinea
- Género = *Elaeis*
- Especie = *guineensis* y *oleífera*

“La palma aceitera es una planta perenne, cultivada para la extracción de aceite. La especie de palma tiene tres variedades: Dura, pisífera y tenera. De ellas la variedad tenera es la que se utiliza comercialmente para la extracción del aceite y es un cruce entre las otras dos variedades (Dura y pisífera)” (Cortez, 2009).

“La palma africana es una especie monoica, que produce inflorescencias masculinas y femeninas por separado (Ciclos femeninos y masculinos alternos evitando autofecundaciones). Una inflorescencia femenina se convierte en un racimo con frutos maduros, de color rojo amarillentos, después de cinco meses a partir de la apertura de las flores. El número de racimos y de hojas producidas por palma por año es variable, de acuerdo a la edad y a los factores genéticos” (Cortez, 2009).

“A la edad de cinco años, se espera que una palma produzca catorce racimos por año, con un peso promedio de 7 kg/racimo y ya a los ocho años se estima que el número de racimos producidos es de ocho con un peso de 22 kg cada uno. El siguiente cuadro muestra los datos generales de producción de una palma africana” (Cortez, 2009).

2.1.2 Raquis de palma o tusas

La tusa o racimo vacío de palma es un material lignocelulósico con 60 a 65% de humedad y 1 a 2,5% de aceite vegetal impregnado, producto de la separación física de los frutos de su soporte natural raquis (Ramírez *et al*, 2011).



Figura 1. Tusa o raquis de palma aceitera (Ramírez *et al*, 2011).

2.1.3 Características del raquis de palma aceitera

La tusa es un material rico en potasio (K) y en menor proporción, en nitrógeno (N), fósforo (P) y magnesio (Mg). Sus principales componentes son polisacáridos, como celulosa, glucano y xilano, en aproximadamente 66%, y polímeros, como la lignina, en 12%. En las figuras 2 y 3 se observa la composición química de la tusa (Ramírez *et al*, 2011).

Tabla 1: Composición química de raquis de palma aceitera,

Parámetros	Rango	Media
Cenizas (%)	4,8 – 8,7	6,3
Aceite (%)	8,1 – 9,4	8,9
Carbono	42 - 43	42,8
P ₂ O ₅ (%)	0,65 – 0,94	0,8
K ₂ O (%)	2,0 – 3,9	2,9
MgO (%)	0,25 – 0,40	0,3
CaO (%)	0,15 – 0,48	0,25
Boro (mg/kg)	9,0 – 11,0	10
Cobre(mg/Kg)	22 - 25	23

Zinc (mg/kg)	49 - 55	51
Hierro (mg/kg)	310 - 595	473
Manganeso (mg/kg)	26 - 71	48
Relación C:N	45 - 64	54

Fuente: Ramírez *et al*, 2011.

Tabla 2: Análisis próximo y elemental de tusas de palma aceitera,

Poder calorífico bruto (Btu/lb)	7.689
Poder calorífico bruto (kJ/Kg)	17.930,7
Humedad residual (% masa)	6,1
Materia volátil (% masa)	69,5
Cenizas (% masa)	6,5
Carbón fijo (calculado, % masa)	17,9
Azufre (%masa)	0,1
Carbono (% masa)	44,8
Hidrogeno (% masa)	6,4
Nitrógeno (% masa)	0,8
Oxigeno (calculado, % masa)	35,8

Fuente: Ramírez *et al*, 2011.

2.2 Carbón activado

“El carbón activado es un material que, como su nombre lo indica, es materia carbonizada la cual puede ser de origen vegetal o mineral. Se le llama activado debido a que toda la materia carbonizada tiene propiedades adsorbentes, pero el estado de activación que se da a este tipo especial de carbón le confiere propiedades especiales que lo hacen tener una gran capacidad para adsorber ciertas sustancias” (Rocha, 2011).

“La adsorción es diferente a la absorción ya que absorción implica el paso de una sustancia, inicialmente en suspensión, a la parte interna del material absorbente. Por ejemplo: el agua en una esponja. Adsorción es diferente en el sentido de que el material removido se adhiere físicamente o químicamente a la superficie del material adsorbente, sin penetrar en su estructura física” (Rocha, 2011).

La adsorción se cree que implica fuerzas de atracción del tipo dipolo/dipolo, fuerzas de London o fuerzas de Van Der Waals, entre las moléculas de la sustancia adsorbida y de la superficie del material que adsorbe éstas (Rocha, 2011).

“La alta efectividad en remoción o adsorción de compuestos, se debe a que el carbón activado tiene una gran área o superficie disponible para que puedan interactuar las moléculas de la sustancia que se adsorbe” (Rocha, 2011).

“Esta gran superficie se adquiere cuando el material carbonáceo se somete a altas temperaturas y se inyecta súbitamente vapor de agua, nitrógeno, bióxido de carbono, argón o algún otro gas inerte. Este repentino cambio en la estructura interna del material provoca un gran número de huecos de tamaño microscópico, cuya superficie es receptiva a la retención de moléculas con una cierta estructura o estereoquímica” (Rocha, 2011).

2.2.1 Clasificación de los diferentes tipos de carbón activado

“Un carbón activado tiene una superficie activa de 1,000 a 1,200 m²/gr, lo cual significa que un gramo de carbón activado tiene una superficie activa similar al área de un campo de fútbol soccer” (Rocha, 2011).



Figura 2. Macroporos y mesoporos de gránulos de carbón activado (Rocha, 2011).

“También, si el carbón tiene gran afinidad por la adsorción específica de un compuesto, la cantidad que puede remover de éste, es de hasta 60 gramos de contaminante por cada 100 gramos de carbón activado y por estas cualidades se ha dicho que el uso del carbón es la mejor tecnología disponible en este momento para la remoción de contaminantes del aire y del agua” (Rocha, 2011).

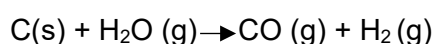
Existen en el mercado una amplia variedad de tipos de carbón activado para usos específicos. Las aplicaciones de los diferentes tipos de carbón pueden ser para aspectos tales como:

- Remoción de color, olores y sabores indeseables en líquidos y bebidas como: refrescos, cerveza, vinos, jugos, vinagre, etc.
- En la clarificación de jarabes y azúcar refinada
- En mejorar las propiedades de diferentes líquidos en la industria de alimentos.

- En la remoción de contaminantes en aguas potables y residuales tratadas y no tratadas.
- En la remoción de contaminantes en emisiones gaseosas.
- En la filtración y acondicionamiento de aire en lugares públicos y cerrados (Rocha, 2011).

“La versatilidad de este tipo de adsorbente, que hace más adaptable un tipo de carbón que otro para un proceso determinado, se debe a sus propiedades internas y la más importante de ellas es el tamaño o diámetro de los capilares del carbón activado” (Rocha, 2011).

El proceso de activación, como ya se ha mencionado, consiste en una reacción térmica en donde la estructura se altera y se forman huecos microscópicos. Por ejemplo: cuando se trata el carbón a 800° C con vapor de agua se efectúa la siguiente reacción:



El carbón que reacciona con el vapor de agua, escapa en forma de hidrógeno y monóxido de carbono dejando una gran porosidad en la estructura del material. La forma, tamaño y naturaleza de la porosidad formada depende de factores como: el pretratamiento químico que se haya dado al material, el origen del material a partir del cual se elabora el carbón activado, temperatura de activación, etc. (Rocha, 2011).

También el carbón puede ser producido a partir de un proceso de activación química. En este tipo de activación, el material a carbonizar (por ejemplo: cáscara de nuez de coco o aserrín de madera) es saturado en una solución de ácido fosfórico y después es carbonizado a 500° C (Rocha, 2011).

El tipo de carbón resultante; dependiendo si es una activación con vapor o con ácido fosfórico, tiene propiedades absorbentes específicas ya que los poros formados y la estructura del carbón producido es diferente y tiene diferentes aplicaciones (Rocha, 2011).

De acuerdo al tamaño de poro; el carbón puede ser catalogado de acuerdo al tamaño de los poros en su estructura. Estos poros se clasifican de acuerdo a su tamaño en:

Microporos: son aquellos que tienen un tamaño promedio menor a 2 nanómetros.

1 nanómetro=1 nm=10⁻⁹ m=10⁻⁷ cm

Mesoporos: Los que tienen un diámetro de 2-50 nm

Macroporos: Los que tienen un diámetro mayor a 50 nm

Los macroporos se encuentran inicialmente en el material antes de su activación. Los microporos y mesoporos son formados en el proceso de activación y son los que le dan propiedades adsorptivas al carbón (Rocha, 2011).

2.2.2 Obtención mediante proceso químico

“Entre las materias primas de origen vegetal se utiliza fundamentalmente aserrín de madera y como agente activante el ácido fosfórico (H_3PO_4). Considerando que el aserrín es un desecho y el activante se puede recuperar, hace al proceso comercialmente viable, aunque también se utilizan otras materias primas como los carbones minerales. El proceso involucra el mezclado de la materia prima original con el agente activante (deshidratante), formando una pasta que luego es secada y carbonizada en un horno, a una temperatura entre (200 y 650) °C, ocurriendo una deshidratación con el resultado final de la creación de una estructura porosa y una ampliación del área superficial. Los parámetros fundamentales que controlan el proceso de activación química y el producto a obtener son: la relación de impregnación, la temperatura de activación y el tiempo de residencia. La dependencia de la estructura del carbón con estas variables puede ser seguida por los cambios en las formas de las isothermas de adsorción” (Fombuena *et al*, 2010).

La activación química se basa en la deshidratación de la muestra mediante sustancias químicas y a una temperatura media (400 – 600) °C. Esta depende de la sustancia química a utilizar para activar el carbón (Fombuena *et al*, 2010).

“En este tipo de activación, el precursor se hace reaccionar con un agente químico activante. En este caso la activación suele tener lugar en una única etapa a temperaturas que pueden variar entre (450 y 900) °C. No obstante, es necesaria una etapa posterior de lavado del carbón activado para eliminar los restos del agente activante” (Fombuena *et al*, 2010).

“Existen numerosos compuestos que pueden usarse como agentes activantes, sin embargo, los más usados industrialmente son el cloruro de zinc ($ZnCl_2$), el ácido fosfórico (H_3PO_4) y el hidróxido de potasio (KOH)” (Fombuena *et al*, 2010).

“La activación química con H_3PO_4 prácticamente ha desplazado al $ZnCl_2$ y los precursores en este tipo de activación son en su mayoría, como en el caso de $ZnCl_2$, residuos forestales (madera, cáscara de coco, hueso de aceituna, etc.)” (Fombuena *et al*, 2010).

La activación con H_3PO_4 implica las siguientes etapas:

- Molienda y clasificación del material de partida.
- Mezcladle precursor con H_3PO_4 (reciclado y fresco).
- Tratamiento térmico en atmósfera inerte entre 100 y 200°C, manteniendo la temperatura aproximadamente 1h, seguido de un nuevo tratamiento térmico hasta 400-500°C, manteniendo esta temperatura en torno a 1h.
- Lavado, secado y clasificación del carbón activado, y reciclado de H_3PO_4 (Fombuena *et al*, 2010).

La proporción H_3PO_4 : precursor más empleada suele ser 1:5 (aunque proporciones diferentes dan lugar a carbones con distintas propiedades), el rendimiento en carbón activado suele ser del 50% (Fombuena *et al*, 2010).

2.2.3 Adsorción con carbón activo

En términos generales el proceso de adsorción consiste en la captación de sustancias solubles presentes en la interfase de una solución, pudiendo constituirse dicha interfase entre un líquido y un gas, un sólido o entre dos líquidos diferentes (Fombuena *et al*, 2010).

El uso del término adsorción se debe a la dificultad de diferenciar la adsorción física de la adsorción química, y se emplea para describir el mecanismo por el cual la materia orgánica se adhiere al CAG. El equilibrio se alcanza cuando se igualan las tasas de adsorción y desorción, momento en el que se agota la capacidad de adsorción del carbón. La capacidad teórica de adsorción de un determinado contaminante por medio de carbón activo se puede determinar calculando su isoterma de adsorción (Fombuena *et al*, 2010).

La cantidad de adsorbato que puede retener un adsorbente es función de las características y de la concentración del adsorbato y de la temperatura. En general, la cantidad de materia adsorbida se determina como función de la concentración a temperatura constante, y la función resultante se conoce con el nombre de isoterma de adsorción (Fombuena *et al*, 2010).

Las moléculas en fase gas o de líquido serán unidas físicamente a una superficie, en este caso la superficie es de carbón activo. El proceso de la adsorción ocurre en tres pasos:

- Macrotransporte: Movimiento del material orgánico a través del sistema de macroporos del carbón activo.
- Microtransporte: Movimiento del material orgánico a través del sistema de microporos del carbón activo.
- Adsorción: Adhesión física del material orgánico a la superficie del carbón activo en los mesoporos y microporos del carbón activo (Fombuena *et al*, 2010).

“El nivel de actividad de la adsorción, depende de la concentración de la sustancia en el agua, la temperatura y la polaridad de la sustancia. Una sustancia polar (o lo que es lo mismo soluble en agua) no puede ser eliminada o es mal eliminada por el carbón activo. Cada clase de carbón tiene su propia isoterma de adsorción” (Fombuena *et al*, 2010).

2.2.4 Aplicación

El carbón activado tiene una amplia gama de aplicaciones tanto en polvo como granular en medio líquido y gaseoso (Fombuena *et al*, 2010).

Sus aplicaciones en medio líquido abarca la decoloración de licores de azúcar, potabilización de aguas (eliminación de olor, color, sustancias químicas, bacterias, tratamientos de aguas residuales, decoloración de aguas para su uso en la fabricación de bebidas refrescantes, decoloración y mejora de bebidas alcohólicas (vinos, rones), purificación de grasas y aceites comestibles, purificación de proteínas, como medicamento en la desintoxicación de personas, purificación de plasma sanguíneo, separación de elementos metálicos (oro, plata), entre otras (Fombuena *et al*, 2010).

Por su parte, en medio gaseoso encuentra sus aplicaciones en el almacenamiento y separación de gases, en máscaras antigás, protección antirradiactiva en plantas nucleares, desodorizante de productos alimenticios (Fombuena *et al*, 2010).

Además hoy tiene amplias perspectivas de aplicación como soporte catalítico y como catalizador (Fombuena *et al*, 2010).

Entre otras aplicaciones, de forma general, se pueden mencionar su utilización en filtros de cigarrillos y plantillas de calzados, entre otros (Fombuena *et al*, 2010).

En general, el carbón pulverizado se aplica en medio líquido mientras el granulado puede ser aplicado en ambos medios (Fombuena *et al*, 2010).

Recopilando las múltiples aplicaciones, destacamos:

- Eliminación de impurezas que causan color, olor y sabor en agua potable (mejora de las propiedades organolépticas en el agua).
- Tratamiento de aguas residuales (Tratamiento terciario de aguas residuales.)
- Tratamiento de agua en procesos industriales.
- Depuración de aguas subterráneas
- Depuración de aguas para piscinas
- Refinamiento de las aguas residuales tratadas
- Tratamiento de emisiones atmosféricas.
- Purificación de aire y gases.
- Decoloración de vinos, zumos y vinagres.
- Decoloración de azúcar y caramelo.
- Mascarillas de gases.
- Eliminación de olores en plantillas de zapatos.
- Potabilización de agua superficial y de pozo.
- Eliminación de cloro libre en agua potable (Fombuena *et al*, 2010).

2.3 Espectrometría

“La medida de la emisión y la absorción de la luz por parte de las sustancias se denominan espectrofotometría, a menudo simplificada como espectrometría. Los términos de absorción y emisión tienen el mismo significado que el de su uso cotidiano: absorción significa tomar, y emisión significa dar” (Rubinson *et al*, 2001).

“Cuando coloquialmente se utiliza el término luz, nos referimos normalmente a la luz visible para nuestros ojos. Sin embargo, la luz visible es únicamente una pequeña parte del espectro electromagnético, que incluye las radiaciones de radio, microondas, infrarrojo, visible, ultravioleta, rayos x y rayos gamma. (Véase la figura 3 para un breve resumen)” (Rubinson *et al*, 2001).

“Los instrumentos específicos utilizados para la espectrometría se denominan espectrofotómetros, espectrorradiómetros o espectrómetros, dependiendo de su construcción. Se puede usar el término espectrómetro para referirse a todos los tipos” (Rubinson *et al*, 2001).

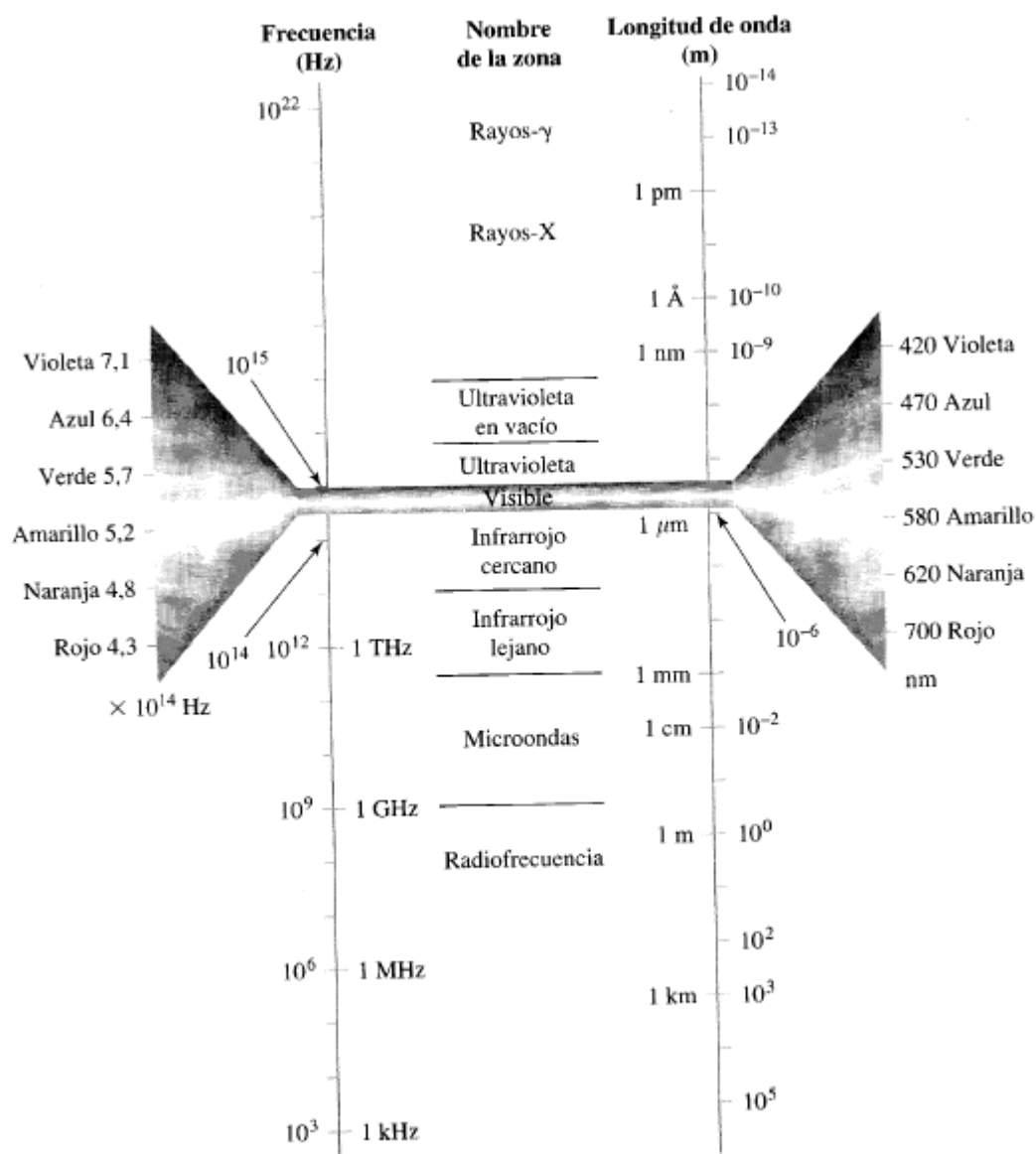


Figura 3. Diagrama de nombres, frecuencias y longitudes de onda (en el vacío) de la radiación electromagnética. Cada región del espectro se utiliza en uno o más métodos analíticos. La luz visible se centra en torno a 500 nanómetros (Rubinson *et al*, 2001).

2.3.1 Espectrofotometría de absorción molecular

Se introducen conceptos que se aplican principalmente a la espectroscopia de absorción de la radiación electromagnética de la región de longitudes comprendidas entre 160 y 780 nm. Parte de estos conceptos, sin embargo, también son aplicables a la espectroscopia infrarroja. Las medidas de absorción de la radiación ultravioleta y visible encuentran una enorme aplicación en la

determinación cuantitativa de una gran variedad de especie tanto inorgánica como orgánica (Skoog *et al*, 1992).

La espectroscopia de absorción molecular se basa en la medida de la transmitancia T o de la absorbancia A de disoluciones que se encuentran en cubetas transparentes que tienen camino óptico; Normalmente, la concentración de un analito absorbente está relacionado linealmente con la absorbancia (Skoog *et al*, 1992).

Normalmente, la transmitancia y la absorbancia, como se define en la figura 6, no pueden medirse en el laboratorio ya que la disolución del analito debe mantenerse en algún tipo de recipiente transparente, o cubeta. Como muestra la figura.....-, en las dos interfases aire/pared de la cubeta, así como las dos interfases pared/disolución tienen lugar reflexiones. (Skoog *et al*, 1992)

Término y símbolo*	Definición	Nombre y símbolo alternativo
Potencia radiante P, P_0	Energía (en ergios) de la radiación que incide en el detector, por cm^2 y por segundo	Intensidad de la radiación I, I_0
Absorbancia A	$\log \frac{P_0}{P}$	Densidad óptica D ; extinción E
Transmitancia T	$\frac{P}{P_0}$	Transmisión T
Camino óptico de la radiación† b	—	l, d
Absortividad‡ a	$\frac{A}{bc}$	Coefficiente de extinción k
Absortividad molar‡ ϵ	$\frac{A}{bc}$	Coefficiente de extinción molar

* Terminología recomendada por la American Chemical Society (*Anal. Chem.*, 1990, 62, 91).

† c puede expresarse en g/L o en otras unidades de concentración; b puede expresarse en cm o en otras unidades de longitud.

‡ c se expresa en mol/L ; b se expresa en cm .

Figura 4. Términos y símbolos, Fuente: Skoog *et al*, 1992.

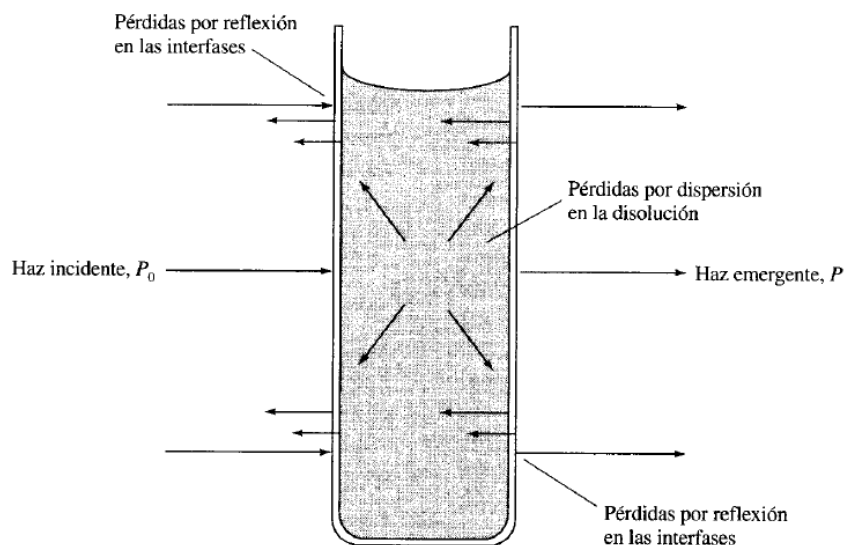


Figura 5. Atenuación del haz de luz, Fuente: Skoog *et al*, 1992.

La atenuación del haz resultante es primordial, porque se muestra que aproximadamente el 8.5 por 100 de un haz de luz amarilla se pierde por reflexión en su paso a través de una cubeta de vidrio rellena de agua. Además, la atenuación del haz puede ocurrir como consecuencia de la dispersión causada por moléculas grandes y, a veces, de la absorción por las paredes del recipiente. Para compensar todo estos efectos, la potencia del haz transmitido por la disolución del analito se compara, generalmente, con la potencia del haz transmitido por una cubeta idéntica que solo contiene disolvente. Con las siguientes ecuaciones se obtienen la transmitancia y absorbancia experimentales que se aproximan estrechamente a la transmitancia y absorbancia verdaderas (Skoog *et al*, 1992).

2.3.2 Aplicación de la Espectrofotometría Uv-Vis para la determinación de la concentración

“Para las determinaciones analíticas es solamente necesario disponer de un espectrofotómetro UV-VIS, un equipo económico y accesible para la mayoría de laboratorios, y con este equipo medir el cambio de la absorbancia de un compuesto a diferentes concentraciones de analito por un método estandarizado para la especie en cuestión. Generalmente, se realiza una curva de calibración de la cual se puede obtener el coeficiente de absorción molar” (Litter *et al*, 2009).

“La espectrometría UV-VIS se emplea generalmente en la determinación cuantitativa de la concentración en solución de especie química como iones

metálicos de transición y compuestos orgánicos muy conjugados. Muchas de las determinaciones incluyen un paso de reacción entre la especie y el compuesto que origine un derivado coloreado o absorbente en el UV-Vis. En particular, las soluciones de iones metálicos de transición son generalmente coloreadas y absorben luz visible debido a la excitación desde un estado electrónico a otro de los electrones de los átomos del metal. Los compuestos orgánicos, especialmente aquellos con un alto grado de conjugación, también absorben luz en las regiones visibles o ultravioleta del espectro electromagnético, con coeficiente de absorción bastante elevado” (Litter *et al*, 2009).

Por lo general, se usa el agua como disolvente para compuestos inorgánicos y etanol para compuesto orgánico, porque este alcohol absorbe muy débilmente a la mayoría de las longitudes de onda. Como ya se ha dicho, la polaridad y el pH pueden afectar también la absorción de un compuesto (Litter *et al*, 2009).

2.3.3 Espectrofotómetro

“El instrumento usado en la espectrofotometría ultravioleta-visible se denomina espectrofotómetro UV-Vis, y permite comparar la radiación absorbida o transmitida por una solución que contiene una cantidad desconocida de soluto con una que contiene una cantidad conocida de la misma sustancia. Se mide la transmitancia de la muestra que se expresa habitualmente como porcentaje (%T), o bien la absorbancia (A°)” (Litter *et al*, 2009).

En esencia todos los tipos de espectrofotómetro están diseñados para permitir que la energía radiante seleccionada por longitudes de onda pueda ser absorbida a través de la sustancia de ensayo, en una forma adecuada, y permitir la medición de la energía que se transmite. El espectrofotómetro comprende una fuente de energía, un dispositivo de dispersión con ranuras para la selección de las longitudes de onda, una celda o la porta sustancia de ensayo, un detector de energía radiante, amplificadores y dispositivos de medición o grabación. Algunos instrumentos son operados manualmente, mientras que otros están equipados para el funcionamiento automático. Los instrumentos están disponibles para su uso, unos en la región visible del espectro, por lo general 380 nm a aproximadamente 700 nm, y otros en las regiones visible y ultravioleta del espectro, por lo general 190 nm a aproximadamente 700 nm. Instrumentos tanto de doble haz y los de un solo haz están disponibles comercialmente. Dependiendo del tipo de aparato utilizado, los resultados se pueden mostrar en una escala, en un contador digital, un computador o en una impresora. El equipo debe mantenerse en buenas condiciones de funcionamiento, la carcasa del sistema

óptico debe minimizar cualquier posibilidad de errores debido a la luz dispersa; lo cual es particularmente relevante en la región de onda corta del espectro. Las celdas normalmente utilizadas en el rango espectral discutido son celdas de absorción de 1cm, fabricadas con ventanas de vidrio o sílice. Las celdas utilizadas para la solución de ensayo y el blanco deben ser iguales y tener la misma transmitancia espectral cuando contiene sólo el solvente. Si este no es el caso, debe realizarse una corrección adecuada (Fernández, *et al*, 2015).

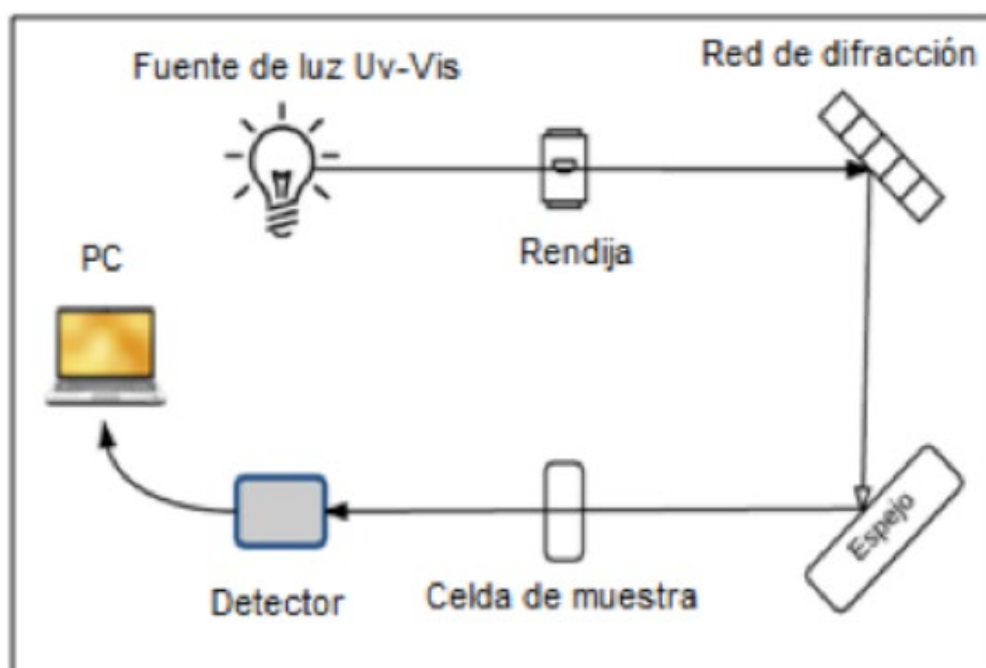


Figura 6. Diagrama de espectrofotómetro, Fuente: Fernández *et al*, 2015.

a. Calibración del espectrofotómetro

La exactitud de los espectrofotómetros se debe revisar periódicamente. Cuando se usa una fuente continua de energía radiante, tanto la longitud de onda y las escalas fotométricas deben ser calibradas. Si el equipo tiene una fuente de línea espectral, sólo es necesario controlar la escala fotométrica. La mayoría de las fuentes de energía radiante tienen líneas espectrales de intensidad adecuada, apropiadamente espaciadas a lo largo de la gama espectral seleccionada. Para evaluar la exactitud fotométrica también se utilizan las siguientes soluciones certificadas: para 340 nm, dicromato de potasio disuelto en HClO_4 0,001 mol L⁻¹; para 405 nm, soluciones de p-nitrofenol en NaOH 0,1 mol L⁻¹. Se miden las absorbancias de las soluciones y se comparan con las que se encuentran en los certificados (astm, 1994, National Bureau of Standard, 2000). Para la calibración de la longitud de onda se usa una fuente de arco de cuarzo-mercurio porque tiene

los valores exactos de las líneas características, los cuales son 253.7, 302.25, 313.16, 334.15, 365.48, 404.66 y 435.83 nanómetros. La escala de longitud de onda también puede ser calibrada por medio de filtros de vidrio preparados para ello, que tienen bandas de absorción útiles a través de las regiones visible y ultravioleta. El rendimiento de un filtro no certificado deberá cotejarse con uno que ha sido debidamente certificado. Un método sugerido es la determinación del punto isobéstico usando rojo congo, el cual tiene la cualidad que, a la misma concentración, los espectros de las formas ácida y básica presentan igual absorbancia a una determinada longitud de onda, denominado Punto Isobéstico (PI). Si hay diferencias entre el PI experimental y el teórico por encima del valor de aceptabilidad de ± 3 nm, indica que hay un corrimiento de la longitud de onda (Fernández, *et al*, 2015).

b. Funcionamiento de espectrofotómetros

“Las instrucciones detalladas para espectrofotómetros operativos son suministradas por los fabricantes. Para lograr resultados significativos y válidos, el operador de un espectrofotómetro debe ser consciente de sus limitaciones y de las posibles fuentes de error y variación. El manual de instrucciones debe ser seguido de cerca en asuntos tales como el cuidado, la limpieza, y la calibración del instrumento, y las instrucciones para la operación. Cuando se utilizan instrumentos de registro de doble haz la celda que contiene disolvente solamente se coloca en el haz de referencia. La limpieza de las celdas de absorción debe recibir una atención especial. Por lo general, después del tratamiento con un solvente adecuado, deben ser enjuagadas con agua destilada y luego con un disolvente orgánico volátil para promover el secado. Las soluciones de ensayo no se deben dejar en las celdas más tiempo del necesario para llevar a cabo la medición. Cuando se manipulan las celdas, se debe tomar especial cuidado para no tocar las superficies externas por las que pasa el haz de luz. Cuando el disolvente y la solución de ensayo se transfieren a las celdas, la atención se debe enfocar en que los líquidos no contaminen las superficies exteriores” (Fernández, *et al*, 2015).

III. Métodos

3.1 Lugar de ejecución

La ejecución del presente trabajo de investigación se llevó a cabo en las instalaciones de la facultad de ciencias forestales y ambientales de la universidad nacional de Ucayali:

- Laboratorio de química general
- Laboratorio de transformación química de la madera

3.2 Muestra de raquis de palma aceitera

La muestra de raquis de palma aceitera es proveniente de la planta extractora de aceite OLAMSA y son aquellos que recién salieron del proceso. La cantidad de la muestra fue tomada a conveniencia de la investigación.

3.3 Análisis proximal de la muestra raquis de palma aceitera

Para para la realización de los análisis de humedad, cenizas y materia volátil se utilizaron 210 gramos de muestra de raquis de palma aceitera.



Figura 7. Raquis de palma aceitera, lavado y secado (Elaboración propia).

3.3.1 Contenido de humedad

Se pesó 100 gramos de raquis de palma aceitera en una balanza semi-analítica marca: RADWAG modelo: PS 360/ C/ 1 y se envolvió en papel kraf. La muestra se colocó en la estufa a 110° grados Celsius por un tiempo de 24 horas; inmediatamente después, se dejó enfriar a temperatura ambiente y se introdujo en el desecador antes de ser pesado en la balanza semi-analítica. Los ensayos se hicieron por duplicado. El porcentaje de humedad se determinó mediante la siguiente fórmula:

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

Dónde:

A= peso del material precursor inicial, en gramos.

B= peso seco del material precursor, en gramos.

(Formula adaptada de Obregón, 2012).

3.3.2 Contenido de ceniza

Se utilizó dos gramos de la muestra, previamente antes del pesado se cortó en partículas más pequeñas. La muestra fue colocada en una cápsula de porcelana previamente pesada, luego fue introducida en una mufla a una temperatura de 700° grados Celsius durante 60 minutos. Finalizado el tiempo, la muestra fue retirada del horno y enfriada dentro de un desecador antes de ser pesada en una balanza semi-analítica, los ensayos se hicieron por duplicado. El porcentaje de ceniza se calculó de la siguiente manera:

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

Dónde:

A = peso de la cápsula y residuo de ceniza, en gramos.

B = peso de la cápsula vacía, en gramos.

C = peso inicial del material precursor usado para el análisis, en gramos.

(Formula adaptada de Obregón, 2012).

3.3.3 Contenido de material volátil

Para el análisis del contenido de material volátil se utilizó dos gramos de la muestra seca al que se realizó el análisis de humedad. La muestra fue colocada en una cápsula de porcelana y colocada en una mufla a 700° grados Celsius durante 15 minutos. Luego fue extraída la capsula de porcelana de la mufla y fue colocada en el desecador, una vez enfriada se pesó en una balanza semi-analítica. El porcentaje de material volátil se calculó mediante la siguiente fórmula:

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

Donde:

A = masa de la muestra inicial en gramos.

B = masa de la muestra luego de calcinar en gramos.

$$\text{Contenido de material volátil, (\%)} = C - D$$

Donde:

C = masa perdida en porcentaje.

D = humedad en porcentaje.

(Formula adaptada de Obregón, 2012).

3.4 Preparación del carbón activado

3.4.1 Preparación de la muestra.

La muestra fresca de raquis de palma se lavó con agua destilada a temperatura ambiente con la finalidad de eliminar por completo la suciedad que esta pueda contener; luego se dejó escurrir el agua y se fracciono, es decir, el raquis de palma se cortar en varios pedazos con ayuda de un cuchillo para luego realizar un pre secado a temperatura de ambiente. Para el pre secado, se colocaron los pedazos de raquis en láminas de metal y se expusieron al sol.

Los pedazos de muestra pre secada se cortaron con unas tijeras con la finalidad de obtener partículas pequeñas, seguido se secaron a 70° grados Celsius en la estufa marca: ESCO modelo: OFA – 32 – 8, por un tiempo de 24 horas. La muestra limpia, seca y con corte fino se pasó por tamiz con malla de 4.750 milímetros; Marca: Retsch, así obtuvimos partículas pequeñas de un mismo tamaño de raquis de palma.



Figura 8. Raquis de palma aceitera cortado (Elaboración propia).

3.4.2 Impregnación de la muestra.

En esta etapa se usó como agente activante al ácido fosfórico (H_3PO_4) de grado técnico con 30, 60 y 85 por ciento de concentración volumen/volumen. La relación de impregnación que se utilizo es de 100 mililitros de ácido fosfórico por cada 50 gramos de muestra (proporción de 1:2), la cantidad de ácido fosfórico a utilizar se midió con una probeta de vidrio de 250 mililitros, para esto también se usó embudo de vidrio. Se colocó el embudo en la probeta y se empezó a agregar el ácido fosfórico a utilizar, teniendo cuidado de no sobrepasar la medida correspondiente.

La impregnación se realiza por un tiempo de 16 horas a temperatura del ambiente, la muestra y el ácido se contiene en un vaso de precipitado de vidrio de 800 mililitros. La muestra de raquis que fue pesada para el ensayo se coloca en el vaso precipitado, seguido a esto se agrega el ácido fosfórico con la cantidad indicada para el ensayo, se mezcla bien la muestra con el ácido con ayuda de una espátula metálica, ya mezclado se cubre el vaso de precipitado con papel aluminio y se realizó el conteo del tiempo de impregnación; transcurrido el tiempo se separa del ácido restante con ayuda de un colador fino de material plástico.



Figura 9. Muestra de raquis de palma aceitera en proceso de impregnación (Elaboración propia).

3.4.3 Activación y carbonización.

La muestra impregnada se coloca en un vaso precipitado de material de vidrio de 500 mililitros, luego el vaso con la muestra impregnada se colocó en la estufa que previamente se graduó a 104° grados Celsius, la estufa debe de estar en los grados celsius indicado antes de introducir el vaso con la muestra y se mantiene durante tres horas para un secado previo. Las muestras impregnadas y pre-secadas se retiró del vaso precipitado y se colocaron en los envases metálicos de carbonización, se hizo el cerrado hermético del envase poniendo papel vitorite entre la tapa del envase y ajustado con pernos y tuercas número 10, el cerrado se debe de efectuar bien para no tener pérdidas de carbón por el ingreso de aire, ya que el aire ayuda a la combustión y esto ocasiona cenizas; luego esto son introducidos a la mufla.

Para la carbonización se utilizaron dos muflas, la primera es de marca Shiar, modelo PLB, aquí solo se colocaron aquellas muestras con tratamientos de

temperaturas de 300° y 400° grados Celsius, las muestras con tratamientos de temperaturas con 500° grados Celsius se introducen en la segunda mufla de marca Nabertherm, modelo LE 2; los tiempos de carbonización fueron determinados de acuerdo al tratamiento que se esté realizando, estos tiempos de permanencia en la mufa serán de 1, 2 y 3 horas y se inicia el conteo del tiempo desde que llega a la temperatura de carbonización para cada tratamiento. Culminado la carbonización la muestra se deja en los envases de carbonización sin abrir hasta que se encuentre fría. En el proceso de carbonización se trabajó con cuatro envases de carbonización.



Figura 10. Envases de carbonización con las muestras listas para el ingreso a la mufla (Elaboración propia).

3.4.4 Lavado.

La muestra carbonizada es retirada del envases de carbonización con sumo cuidado y el carbón se colocó en un vaso de precipitado de vidrio de 500 mililitros, seguido se inició el lavado de la muestra carbonizada, se realizaron varios enjuagues con agua destilada caliente a una temperatura de 80° grados Celsius aproximadamente, esto se realizó con el fin retirar los residuos del ácido fosfórico y así poder llegar a un pH próximo a la neutralidad ($\text{pH} \leq 7$), medida de pH se controló en un rango de 6.2 a 6.4 respectivamente, la cual se midió con el pHmetro marca: HANNA Modelo: HI 2213; para realizar la medida del pH, se dejó reposar el carbón activado en agua destilada por un tiempo de 15 minutos, seguido se encendió el pHmetro previamente calibrado y se colocan los electrodos del pHmetro en el agua y realizar la lectura. En referencia al agua destilada usada en

el lavado del carbón activado de raquis de palma, se colocó el agua destilada en un matraz de vidrio de 1000 mililitros y fue calentado en una hornilla eléctrica marca: PRACTIKA modelo: HP102 – D4.

3.4.5 Secado y almacenado.

La muestra de carbón activado lavado y con el pH próximo a la neutralidad, fueron colocados en un vaso de precipitado de vidrio de 500 mililitros y se introdujeron a la estufa que fue programada a una temperatura de 104° grados Celsius por un tiempo de 24 horas, teniendo en cuenta que la temperatura debe ser la programada antes de introducir el vaso de precipitado. Luego se retiró de la estufa se dejó enfriar en el desecador, seguidamente se pesó el carbón activado en la balanza semi-analítica para la obtención del rendimiento en gramos por cada tratamiento realizado. El carbón activado fue almacenado en envases de vidrio de 299 mililitros con tapa metálica tipo twist, se cerraron herméticamente colocando el envase con la muestra en la estufa a 100° grados celsius por un tiempo de 30 minutos y sin exponer el envase afuera de la estufa se colocó la tapa y se cerró. El carbón activado permanecerá en este envase hasta realizar las pruebas de adsorción con el azul de metileno. A cada envase se colocó su rotulado correspondiente al tratamiento al que pertenece.



Figura 11. Secado del carbón activado de raquis de palma aceitera (Elaboración propia).

3.4.6 Diagrama de flujo

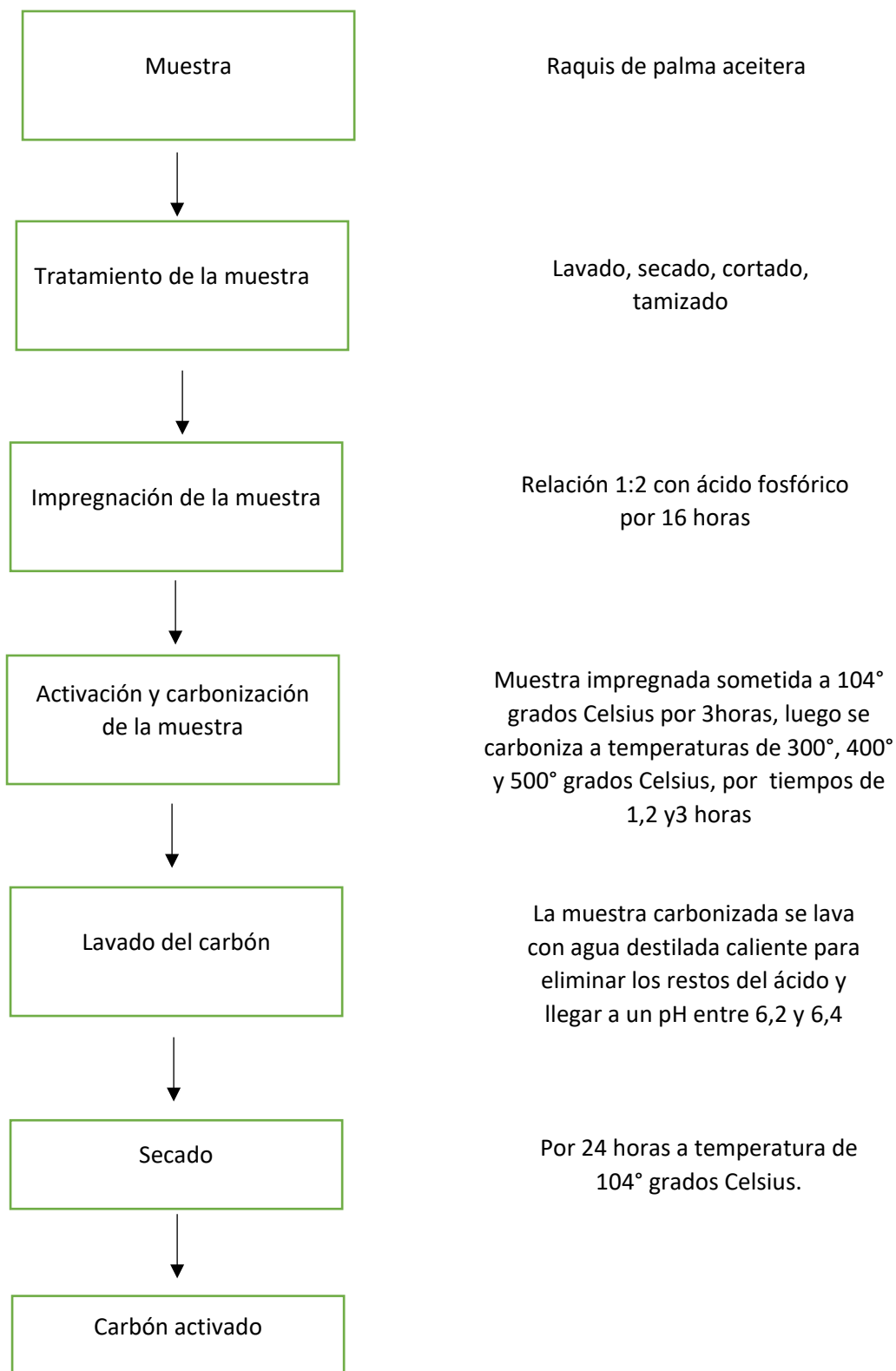


Figura 12. Diagrama de flujo para la obtención del carbón activado de raquis de palma aceitera (Adaptado de Obregón, 2012).

3.5 Rendimiento del carbón activado

Para determinar la cantidad del carbón activado obtenido con el proceso usamos el cálculo de rendimiento.

La masa inicial y final promedio indica el peso de la muestra antes y después de la carbonización. Se utiliza la siguiente fórmula para determinar el rendimiento:

$$\text{Rendimiento (\%)} = B/A \times 100$$

Donde:

A: representa la masa de la muestra para el tratamiento (g).

B: representa la masa del carbón activado después de lavado y secado (g).

Los resultados del rendimiento se expresan en porcentaje.

3.6 Prueba de adsorción del carbón activado en azul de metileno

Para la realización de la prueba se preparó cuatro litros de solución de azul de metileno a concentración de 1200 miligramos/Litro de solución al cinco por ciento de ácido acético en fioles de vidrio de 2000 mililitros cada uno, llegando a usarse dos fioles.

Luego se pesó 100 miligramos de cada muestra de carbón activado en la balanza semi-analítica y se agregó a un vaso de precipitado con 80 mililitros de capacidad, seguidamente se agregaron 25 mililitros de la solución de azul de metileno de 1200 miligramos/Litro de concentración en solución al cinco por ciento de ácido acético, la cual fue medida en una probeta de 50 mililitros. Los vasos de precipitados de 80 mililitros que contienen al carbón activado y la solución de azul de metileno, fueron agitados por 24 horas en un agitador marca MS-H-Pro. También se preparó un blanco con 25 mililitros de solución de azul de metileno sin carbón activado en un vaso de precipitado de 50 mililitros, para la medida con el espectrofotómetro.

Cumplido las 24 horas de agitación, se toma un mililitro del sobrenadante de cada uno de las muestras con una pipeta de dos mililitros, se agregó a un matraz de 250 mililitros y se diluyó con 100 mililitros de solución 0.25 por ciento de ácido acético que se midieron con una probeta de vidrio de 250 mililitros, luego se extrae un mililitro aproximadamente de la solución con pipeta de dos mililitros y se agregaron a las celdas plásticas desechables para espectrofotómetro y realizar su respectiva medición de absorbancia, se determinó su concentración en medida de absorbancia en el espectrofotómetro UV-Vis marca Hanon de modelo I3, que encendida se debe de esperar un tiempo de 15 minutos, luego es programada en medida de absorbancia a 620 nanómetros de longitud de onda.

La cantidad del azul de metileno adsorbido se obtiene por diferencia con el blanco.

Para la cuantificación fue necesario aplicar el método de la curva de calibración, para lo cual se prepararon soluciones con concentraciones de 1200, 800, 600, 400, 200, 100 miligramos de azul de metileno/Litro de concentración en solución al cinco por ciento de ácido acético en fiola de 100 mililitros, seguidamente se extrajo un mililitro de cada una de ellas y de agrego en las celdas plásticas para su respectiva medición de absorbancia, teniendo las medidas de absorbancia y concentraciones respectivas determinamos la curva de calibración con ayuda del software Excel 2013, los resultados se aprecian en el anexo 3. Una curva de calibración es la representación gráfica de una señal (absorbancia) que se mide en función de la concentración de un analito. “Los resultados obtenidos son expresados en miligramos del azul de metileno adsorbido por cada gramo de carbón activado” (Valdez, 2011).

3.7 Estudio de efectos de los factores en la capacidad de adsorción

3.7.1 Diseño estadístico

Para el presente estudio es adecuado aplicar el diseño factorial 3^3 ; porque considera tres factores y cada uno de ellos con tres niveles, en total contiene veinte y siete combinaciones entre niveles y factores, además se realizaron cinco réplicas de cada tratamiento.

El proceso de adsorción del azul de metileno por el carbón activado de raquis de palma aceitera se considera las siguientes variables independientes:

- El primer factor de estudio es la concentración de ácido fosfórico con tres niveles: 30,60 y 85 por ciento.
- El segundo factor es la temperatura de carbonización con tres niveles: 300,400 y 500 grados centígrados.
- El tercer factor es tiempo de carbonización con tres niveles: 1, 2 y 3 horas.

Tabla 3: diseño de experimento.

	CONCENTRACION DE ACIDO FOSFORICO (en %)(A)								
	30 (a1)			60 (a2)			85 (a3)		
	TEMPERATURA (en °C)(B)								
	Tiempo (Horas), (C)	300° (b1)	400° (b2)	500° (b3)	300° (b1)	400° (b2)	500° (b3)	300° (b1)	400° (b2)
1 (c1)	a1,b1,c1	a1,b2,c1	a1,b3,c1	a2,b1,c1	a2,b2,c1	a2,b3,c1	a3,b1,c1	a3,b2,c1	a3,b3,c1
2 (c2)	a1,b1,c2	a1,b2,c2	a1,b3,c2	a2,b1,c2	a2,b2,c2	a2,b3,c2	a3,b1,c2	a3,b2,c2	a3,b3,c2
3 (c3)	a1,b1,c3	a1,b2,c3	a1,b3,c3	a2,b1,c3	a2,b2,c3	a2,b3,c3	a3,b1,c3	a3,b2,c3	a3,b3,c3

Fuente: Elaboración propia.

3.7.2 Modelo matemático

$$Y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}$$

$i=1,2,3; j=1,2,3; k=1,2,3; l=1,2,3,4,5.$

- donde μ es la media general, α_i es el efecto del nivel i -ésimo del factor A, β_j es el efecto del nivel j del factor B y γ_k es el efecto del nivel k en el factor C.
- $(\alpha\beta)_{ij}, (\alpha\gamma)_{ik}$ y $(\beta\gamma)_{jk}$, representan efectos de interacción dobles (de dos factores) en los niveles ij, ik, jk , respectivamente.
- $(\alpha\beta\gamma)_{ijk}$ es el efecto de interacción triple en la combinación o punto ijk .
- ε_{ijkl} , representa el error aleatorio en la combinación $ijkl$, donde l es el número de repeticiones o réplicas del experimento.

3.7.3 Esquema experimental

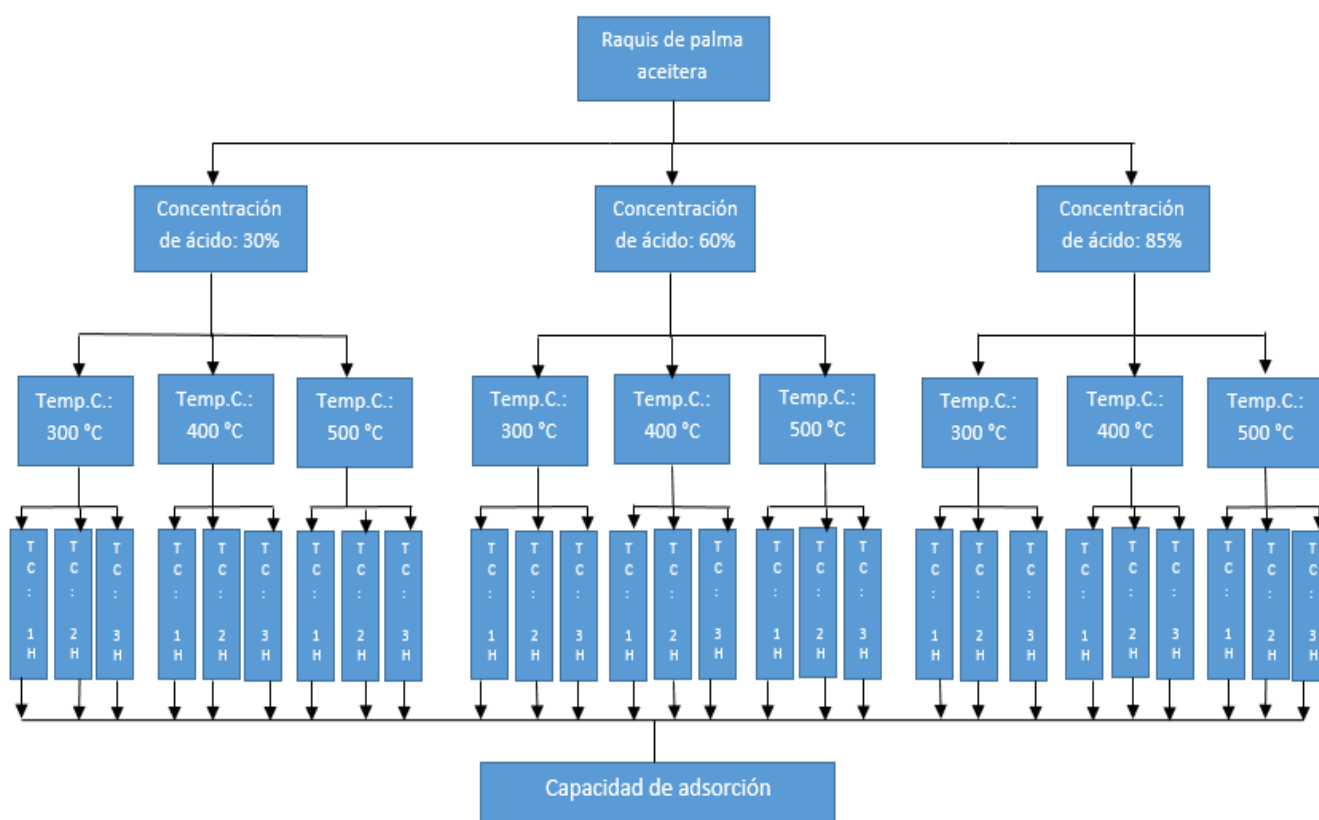


Figura 13. Árbol de la experimentación. Se muestra el orden y efecto las variables dependientes con sus respectivos niveles en la respuesta. (Temp.C.: temperatura de carbonización; TC: tiempo de carbonización; H: Hora) sobre la capacidad de adsorción (Fuente propia).

3.7.4 Pruebas estadísticas para el estudio de factores

Para el análisis estadístico de la investigación se utilizó el paquete estadístico SPSS versión 23 en el entorno visual de Windows. El diseño experimental aplicado (diseño factorial 3^3 completo) corresponde a la ejecución de un análisis de varianza factorial univariado; este análisis es parte de las pruebas paramétricas y que antes de ejecutarse deberá cumplir con ciertas condiciones de validez de los datos, de modo que los resultados de la prueba paramétrica sean fiables deberán ajustarse a una distribución normal y varianzas homogénea.

En el paquete estadístico SPSS se realizan las pre pruebas paramétricas de normalidad y homogeneidad de varianzas, en el caso de cumplir con las pre pruebas paramétricas, se deberá realizar el análisis del estudio estadístico de los factores con las prueba no paramétrica. Para el análisis de varianza existe un equivalente no paramétrico, lo cual se deberá de utilizar.

La prueba de Kruskal-Wallis es el equivalente no paramétrico de la prueba de igualdad de K medidas de análisis de varianza para clasificación simple. En su aplicación no se requiere verificar que se cumple con los requisitos necesarios para la validez de las pruebas paramétricas correspondientes (Córdova, M. 2006).

IV. Resultados y discusiones

4.1 Análisis de la muestra: Determinación de humedad, cenizas y materia volátil

El análisis de la muestra del raquis de palma aceitera el ensayo se realizó por duplicado. Los valores promedios obtenidos de los resultados obtenidos de humedad, cenizas y materia volátil se calcularon según la formula dada en el capítulo de métodos para cada uno de ellas y se podrá ver los resultados de forma detallada en el anexo 1.

Tabla 4: análisis próximo de muestra de raquis de palma aceitera

Muestra	Humedad (%)	Ceniza (%)	Materia volátil (%)
Raquis de palma	49.20	3	45.81

Fuente: Elaboración propia.

El raquis de palma aceitera muestra un promedio de humedad del 49.20 por ciento, cenizas de 3 por ciento y materia volátil del 45.81 por ciento, resultados que difieren con lo que menciona Ramírez *et al* (2011), en el análisis de muestra de raquis de palma aceitera, cuyos resultados del análisis menciona que son para la humedad de 60 a 65 por ciento, cenizas 6.3 por ciento y de materia volátil es de 69.5 por ciento.

4.2 Rendimiento de los tratamientos para la obtención del carbón activado

Por cada tratamiento aplicado se obtuvo una cierta cantidad (gramos) de carbón activado de raquis de palma aceitera. A cada cantidad obtenida se aplica la formula indicada en el sub título 3.5, los resultados se expresa en porcentaje de rendimiento. En la siguiente tabla 3, se muestran los rendimientos promedios del carbón activado de raquis de palma obtenido por cada tratamiento. La tabla completa y detallada se encuentra en el anexo 2.

Tabla 5. Rendimiento promedio por tratamiento.

Número de tratamiento	Concentración (%)	Temperatura (°C)	Tiempo (hora)	Promedio (%)
1	30	300	1	30.832
2	30	300	2	27.452
3	30	300	3	29.16
4	30	400	1	26.088
5	30	400	2	29.464
6	30	400	3	28.784
7	30	500	1	28.344

8	30	500	2	25.636
9	30	500	3	27.648
10	60	300	1	31.772
11	60	300	2	29.116
12	60	300	3	29.196
13	60	400	1	25.804
14	60	400	2	26.84
15	60	400	3	26.152
16	60	500	1	26.436
17	60	500	2	24.96
18	60	500	3	24.388
19	85	300	1	29.976
20	85	300	2	27.6
21	85	300	3	24.696
22	85	400	1	24.736
23	85	400	2	28.84
24	85	400	3	26.076
25	85	500	1	27.88
26	85	500	2	28.284
27	85	500	3	27.492

Fuente: elaboración propia.

El mejor rendimiento de carbón activado de raquis de palma aceitera que se obtuvo es de 31,772 por ciento, cuyo tratamiento es de ácido fosfórico al 30 por ciento, temperatura de carbonización con 300° grados Celsius y una hora de tiempo de carbonización. Mientras que el mínimo rendimiento con el 24,388 por ciento se obtuvo con el tratamiento de 60 por ciento de ácido fosfórico, 500° grados Celsius de temperatura y con un tiempo de carbonización de tres horas.

Gloria Ana delgadillo gamboa (2009) menciona que los rendimientos de los carbones activados disminuyen con el incremento de la temperatura y la razón de Impregnación trabajo realizado en carbón activado a partir de las pepas de níspero de palo.

4.3 Adsorción del azul de metileno

Para la cuantificación de la adsorción del azul de metileno por el carbón activado se realizó la curva de calibración para concentraciones conocidas (1200, 800, 600, 400, 200, 100 miligramos de azul de metileno/Litro concentrado de solución al cinco por ciento de ácido acético); Las cuales se pueden observar en el anexo 3, así como también en este anexo se observa la gráfica de la curva de calibración (figura 20), de la cual se determinó la siguiente ecuación de la recta: $Y = 0.0004x + 0.0004$.

Esta ecuación se aplicó para la cuantificación de la medida de absorbancia obtenida por el espectrofotómetro y se expresa en miligramos del azul de metileno adsorbidos por cada gramo de carbón activado.

En la tabla 4, se observa el promedio de la adsorción de azul de metileno expresado en miligramos de azul de metileno por cada gramo de carbón activado. Los resultados completos se pueden observar en el anexo 4.

Tabla 6. Adsorción promedio del azul de metileno.

Número de tratamiento	Concentración de ácido fosfórico (por ciento)	Temperatura (grados Celsius)	Tiempo (hora)	Promedio de adsorción (miligramo. de azul de metileno/gramo de carbón activado)
1	30	300	1	221.50
2	30	300	2	124.50
3	30	300	3	104.00
4	30	400	1	164.00
5	30	400	2	73.00
6	30	400	3	80.50
7	30	500	1	154.00
8	30	500	2	217.00
9	30	500	3	45.00
10	60	300	1	321.00
11	60	300	2	96.00
12	60	300	3	15.50
13	60	400	1	101.50
14	60	400	2	54.50
15	60	400	3	66.00
16	60	500	1	56.50
17	60	500	2	51.50
18	60	500	3	63.50
19	85	300	1	253.00
20	85	300	2	253.50
21	85	300	3	45.50
22	85	400	1	416.50
23	85	400	2	258.00
24	85	400	3	118.50
25	85	500	1	35.00
26	85	500	2	76.50
27	85	500	3	419.50

Fuente: elaboración propia.

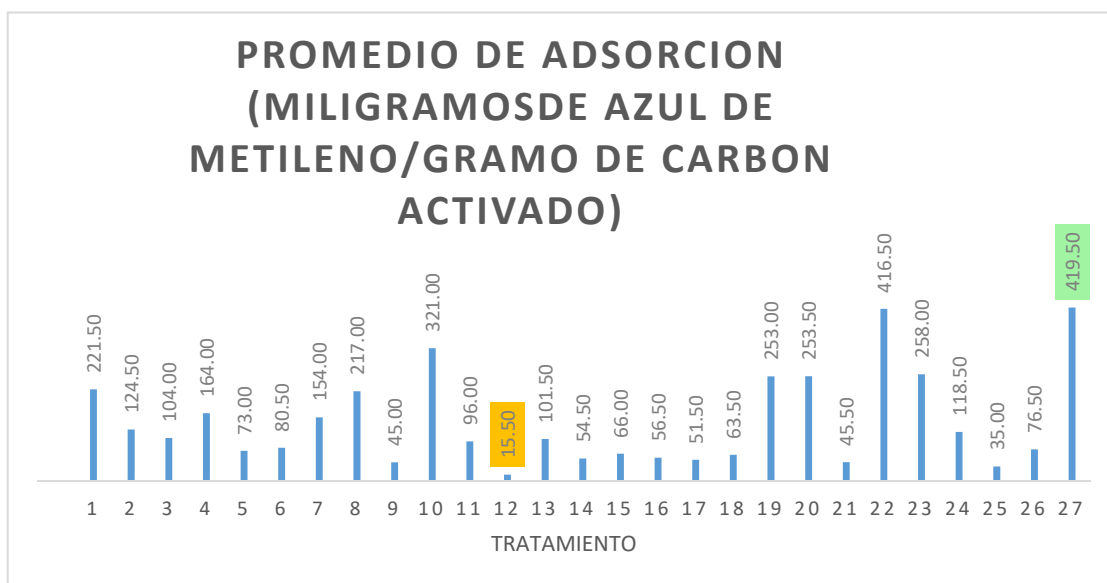


Figura 14. Promedio de adsorción (Elaboración propia).

La máxima capacidad promedio de adsorción del azul de metileno se obtuvo con el tratamiento de 85 por ciento de ácido fosfórico, 500° grados Celsius de temperatura de carbonización y tres horas para la carbonización, seguido del tratamiento de 85 por ciento de ácido fosfórico, 400° grados Celsius de temperatura de carbonización y un tiempo carbonización de una hora. La mínima capacidad de adsorción se obtuvo con el tratamiento de 60 por ciento de ácido fosfórico, temperatura de carbonización de 300° grados Celsius y tiempo de carbonización de tres horas. De esto se puede mencionar que el factor de concentración de ácido fosfórico al 85 por ciento, tiene efecto en la capacidad de adsorción y los factores de temperatura y el tiempo de carbonización son muy variables con respecto a la capacidad de adsorción.

4.4 Estudio estadístico del efecto de los factores en la capacidad de adsorción.

Para el estudio estadístico del efecto de los factores en la capacidad de adsorción del carbón activado de raquis de palma aceitera, lo cual le corresponde un análisis factorial univariado. Para esto se realizaron las pre-pruebas paramétricas correspondientes para un análisis de varianza, cuyos resultados para la prueba de normalidad indican que los datos de las variables dependientes no cumplen con esta prueba, como se puede ver en el anexo 5 los grados de significancia difieren mucho, ya que para ser validos los resultados de significación deben ser mayor a 0,05. Como se tiene más de cincuenta datos, se tomó en cuenta el resultado de la prueba de Kolmogorov-Smirnov, aunque algunos resultados si son mayor al nivel de 0,05, como es el de la concentración de

ácido fosfórico al 30 por ciento con una significancia de 0,20 y el tiempo de carbonización a una hora con una significancia de 0,02, pero aun así no se puede aceptar, porque la representación en el histograma no se muestra la curva normal que debería de existir para su aceptación para este tipo de prueba.

Así como también no llega a cumplir con homocedasticidad lo cual también son requisitos para pruebas paramétricas y la aplicación de ANOVA, los resultados de las pruebas mencionadas se detallan en el anexo 6, en el SPSS se aplicó la prueba de Levene, donde el resultado de significancia es cero, con lo que se concluye que las varianzas no son iguales ya que para esta prueba la hipótesis nula indica que la varianza de error de la variable dependiente es igual entre grupo, por lo que se aceptaría la hipótesis H_1 , que menciona que las variables dependientes no son iguales entre grupos. Se llegó a aplicar la transformación de datos de tipo exponencial y logarítmico, lo cual debería de adecuarse a un resultado más ajustado, pero tampoco se obtuvieron los resultados apropiados que se necesita para seguir con la prueba paramétrica.

Teniendo en cuenta lo mencionado, para este caso se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis con un nivel de significación del 5%, teniendo como objetivo de determinar el efecto de la concentración del ácido fosfórico, temperatura y el tiempo de carbonización en la capacidad de adsorción del carbón activado de raquis de palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq). Se debe de tener en cuenta que la prueba de no paramétrica de Kruskal Wallis es el equivalente al ANOVA. Además, las pruebas no paramétricas son muy robustas aunque no potentes estadísticamente, en nuestro estudio si otorga una fiabilidad de aplicación para poder concretar nuestro objetivo.

4.4.1 Prueba Kruskal Wallis: Concentración de ácido fosfórico vs adsorción.

Hipótesis para la prueba de kruskal Wallis

H_0 : la concentración de ácido fosfórico no tiene efecto en la capacidad de adsorción del carbón activado de raquis de palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq).

H_1 : la concentración de ácido fosfórico tiene efecto en la capacidad de adsorción del carbón activado de raquis de palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq).

Tabla 7. Resultado kruskal Wallis, concentración de ácido fosfórico vs adsorción.

	Adsorción
Gl.	2
Sig. Asintótica	,000

Fuente: Elaboración propia.

Según los resultados de la tabla 5, se acepta H_1 y se concluye que la concentración de ácido fosfórico (H_3PO_4) tiene efecto en la capacidad de adsorción del carbón activado del raquis de palma aceitera, ya que la Sig. Asintótica es 0,000. Para que no se acepte la hipótesis H_1 la Sig. Asintótica debe ser mayor a 0,05.

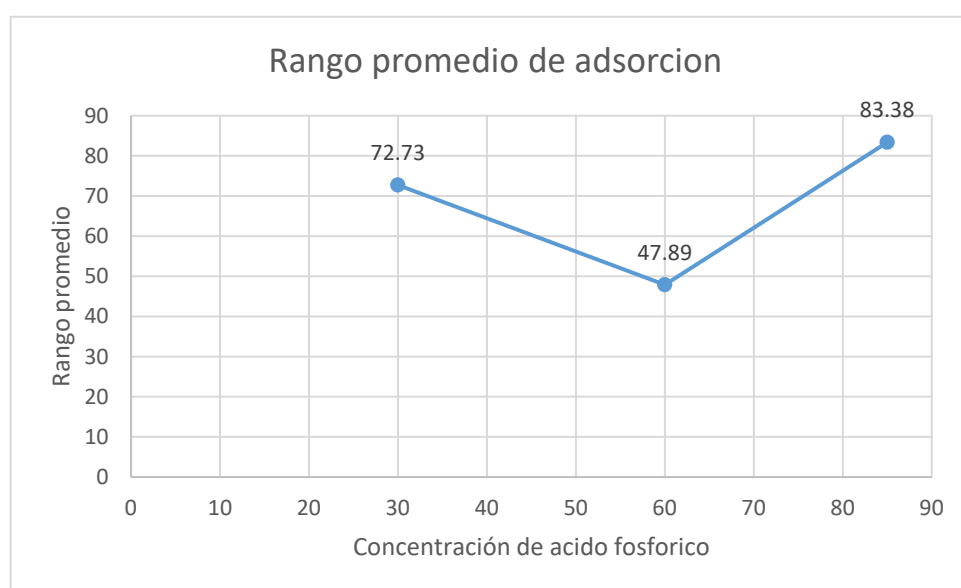


Figura 15. Concentración de ácido fosfórico en la capacidad de adsorción
(Elaboración propia).

En la figura 17 se puede observar los rangos de las variables de concentración del ácido fosfórico (H_3PO_4), el rango promedio de la variable de concentración de ácido fosfórico del 85 por ciento (83.38) se muestra con mejor resultado en capacidad de adsorción a diferencia de las concentraciones de 30 (72.73) y 60 por ciento (47.89). Estos resultados se pueden visualizar en la tabla 19 del anexo 7.

4.4.2 Prueba Kruskal Wallis: Temperatura de carbonización vs adsorción.

Hipótesis para la prueba de kruskal Wallis

H_0 : la temperatura de carbonización no tiene efecto en la capacidad de adsorción del carbón activado de raquis de palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq).

H_1 : la temperatura de carbonización tiene efecto en la capacidad de adsorción del carbón activado de raquis de palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq).

Tabla 8. Resultado Kruskal Wallis, temperatura de carbonización vs adsorción

	Adsorción
Gl.	2
Sig. Asintótica	,033

Fuente: Elaboración propia.

Según la tabla 6, se acepta H_1 y se concluye que la temperatura de carbonización tiene efecto en la capacidad de adsorción del carbón activado de raquis de palma aceitera ($0,033 < 0,05$).

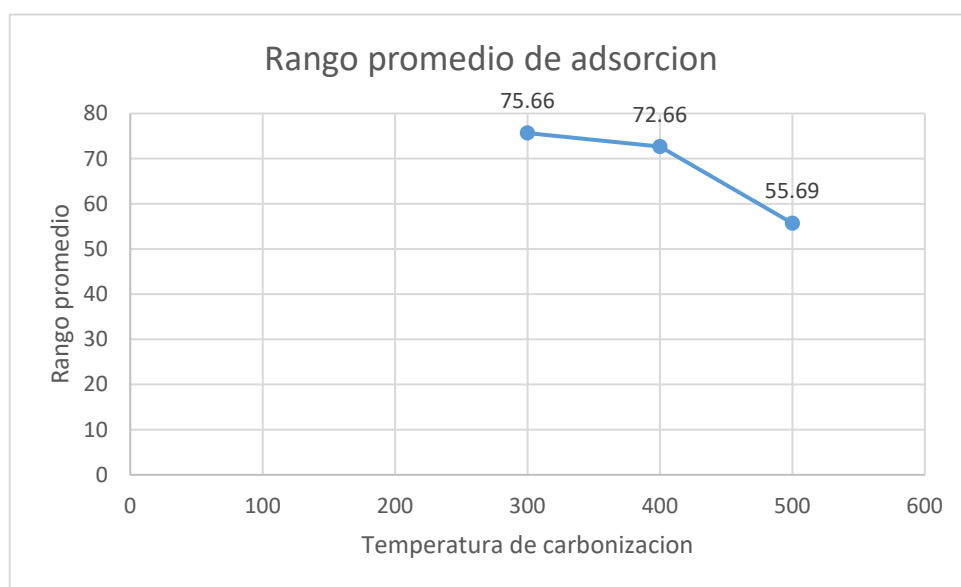


Figura 16. Temperatura de carbonización en la capacidad de adsorción (Elaboración propia).

Según la figura 18, la temperatura de carbonización de 300° (75,66) y de 400° (72,66) grados Celsius tienen mejor resultado en la capacidad de adsorción que el de 500° (55,69) grados Celsius, estos resultados se pueden visualizar en la tabla 21 del anexo 8.

4.4.3 Prueba Kruskal Wallis: Tiempo de carbonización vs adsorción.

Hipótesis para la prueba de kruskal Wallis

H_0 : El tiempo de carbonización no tiene efecto en la capacidad de adsorción del carbón activado de raquis de palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq).

H₁: El tiempo de carbonización tiene efecto en la capacidad de adsorción del carbón activado de raquis de palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq).

Tabla 9. Resultado Kruskal Wallis tiempo de carbonización vs adsorción

	Adsorción
Gl.	2
Sig. Asintótica	,000

Fuente: Elaboración propia.

Según la tabla 9, se acepta H₁ y se concluye que el tiempo de carbonización tiene efecto en la capacidad de adsorción del carbón activado de raquis de palma aceitera ($0,000 < 0,05$).

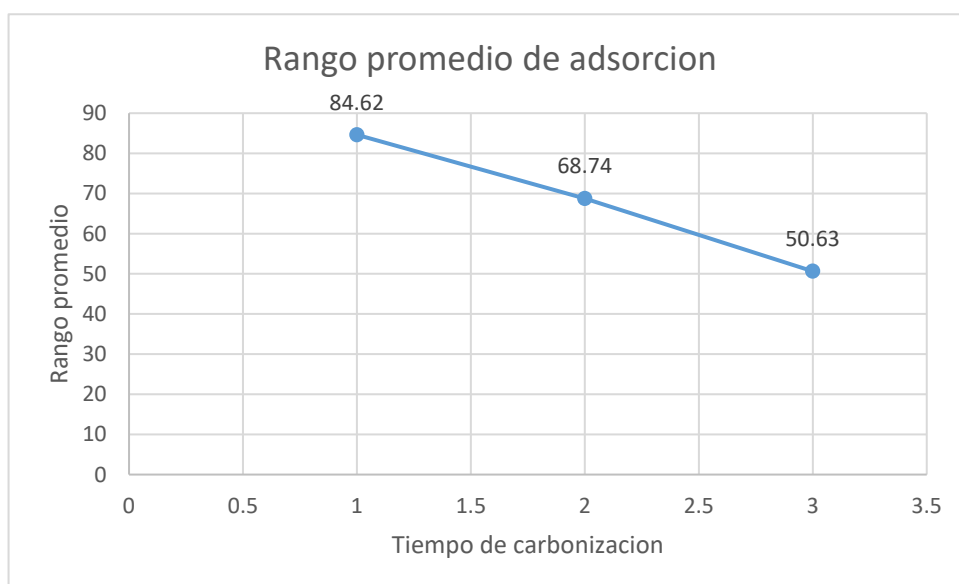


Figura 17. Tiempo de carbonización en la capacidad de adsorción (Elaboración propia).

Según la figura 19, con el tiempo de carbonización de una hora (84.62) se obtuvo mejores resultados de adsorción a diferencia de los de dos horas (68.74) y de tres horas (50.63), estos resultados se pueden visualizar en la tabla 23 del anexo 9.

La prueba de Kruskal Wallis nos dio como resultado que todos los factores con sus respectivas variables tienen influencia en la capacidad de adsorción del carbón activado de raquis de palma aceitera. De estos resultados se puede determinar que los parámetros que mejores resultados para la obtención de carbón activado de raquis de palma mediante la activación química es: concentración del ácido

fosfórico al 85 por ciento, temperaturas de carbonización a 300° y 400° grados Celsius y con un tiempo para la carbonización de una hora. Con respecto a la temperatura de carbonización de 400° grados Celsius, Mojica *et al* (2011), menciona que este parámetro tuvieron mayor capacidad de adsorción en carbones activados químicamente en comparación con muestras activadas físicamente, su trabajo lo realizó en semillas de eucalipto.

V. Conclusiones

1. Se obtuvo carbón activado a partir del raquis de palma aceitera, mediante activación química con ácido fosfórico.
2. La concentración del 85 % v/v de ácido fosfórico tiene mejor efecto en la capacidad de adsorción.
3. La temperatura de carbonización de 300° grados Celsius tiene mejor efecto en la capacidad de adsorción.
4. El tiempo de carbonización de 1 hora tiene mejor efecto en la capacidad de adsorción.

VI. Recomendaciones

- Hacer un estudio de caracterización físico-químico del carbón activado de raquis de palma aceitera.
- Ampliar el estudio para los efectos de la relación de impregnación de ácido fosfórico y temperatura de impregnación en la capacidad de adsorción del carbón activado de raquis de palma aceitera.
- Realizar otros estudios de la capacidad de adsorción del carbón activado de raquis de palma aceitera en otros compuestos.
- Realizar el estudio de adsorción de carbón activado de raquis de palma aceitera a diferentes niveles de pH.

VII. Bibliografía

- Bastidas, M.; Buelvas, L.; Márquez, M.; Rodríguez, K. 2009. Producción de carbón activado a partir de precursores carbonosos del departamento del Cesar, Colombia. Centro de investigación y desarrollo tecnológico del carbón, Universidad Popular del Cesar, Cesar-Colombia. Consultado 22 may. 2017. Disponible en <http://www.scielo.cl/pdf/infotec/v21n3/art10.pdf>.
- Córdova, M.; 2006. K muestras independientes: La prueba H de Kruskal Wallis, Estadística Inferencial, Moshera SRL (ed), segunda edición, Perú, 393-396 p.
- Cortez. 2009. Manual técnico de palma africana (en línea). Soluciones empresariales para la pobreza rural, Technoserve, San Pedro Sula-Honduras. Consultado 18 ago. 2017. Disponible en <http://palma.webcindario.com/manualpalma.pdf>.
- Fombuena, M.; Valentín, A. 2010. Manual de Carbón Activado (en línea). Aguapedia. U. Sevilla, España. 89 p. Consultado 12 jun. 2016. Disponible en [http://www.elaguapotable.com/Manual% 20del% 20carb%C3 %B3n% 20activo. pdf](http://www.elaguapotable.com/Manual%20del%20carb%C3%B3n%20activo.pdf).
- Fernández, F., rojas, L., Iapo, B. 2015. Espectrofotómetro UV-VIS. Desarrollo Experimentales en Análisis Instrumental. Utmach (Ed), primera edición, Ecuador. 17-19 p.
- Gamboa, G.; Sun Kou, M. 2009. Adsorción de fenol con carbones activados preparados a partir de pepas de nispero de palo por activación química (en línea). Revista de sociedad química del Perú. Facultad de Ingeniería pesquera y de alimentos, Universidad Nacional del Callao, Perú. Consultado 24 nov. 2016. Disponible en <http://www.scielo.org.pe/pdf/rsqp/v75n1/a09v75n1.pdf>.
- Hernández, R.; Fernández, C.; Baptista, M. 2010. Metodología de la investigación. Quinta edición. México, D.F. McGRAW-HILL. 607 p.

- Litte, M.; Castro, M.; Wong, M.; Mori, V. 2009. Métodos espectrofotométricos UV-Vis. Metodologías analíticas para la determinación y especiación de arsénico en aguas y suelos. Litter, Armienta, Farias (eds.), Argentina, Cap. 3: 43-62 p.
- Márquez, F.; Zanzi, R.; Birbas, D.; Aguiar, L.; Ramos, B. 2012. Carbón activado de semilla de tomate para la absorción de vapores de amoníaco, benceno y gasolina (en línea). Ingeniería mecánica 16(2): 83-90. Consultado 17 jun. 2017. Disponible en <http://scielo.sld.cu/pdf/im/v16n2/im01213.pdf>.
- Mojica, L.; Ramírez, W.; Rincón, N.; Blanco, D.; Giraldo, L.; Moreno, J. 2011. Síntesis de carbón activado proveniente de semillas de eucalipto por activación física y química (en línea). Grupo de investigación de sólidos porosos y calorimetría, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Consultado 14 jul. 2017. Disponible en <http://www.raco.cat/index.php/afinidad/article/viewFile/268459/356011>.
- Montgomery, D. 2004. Diseño factorial 3^k , Diseño y análisis de experimentos, Limusa (ed.), México, 363-372 p.
- Obregón, D. 2012. Estudio comparativo de la capacidad de adsorción de cadmio utilizando carbones activados preparados a partir de semillas de aguaje y de aceituna (en línea). Pontificia Universidad Católica del Perú. Consultado 22 de may. 2018. Disponible en: tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/5717
- Ospina, V.; Buitrago, R.; López, D. 2013. Preparación y caracterización de carbón activado a partir de torta de higuera-Colombia (en línea). Tecnológicas 17(32): 75-84. Consultado 15 ago. 2017. Disponible en <http://www.scielo.org.co/pdf/teclo/v17n32/v17n32a08.pdf>.
- Peña K.; Giraldo, L.; Moreno, J. 2012. Preparación de carbón activado a partir de cascara de naranja por activación química- Caracterización física y química (en línea). Revista colombiana de química, Universidad Nacional de Colombia 41(2). Consultado 17 jun. 2017. Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/3090/309028756010.pdf>.
- Ramírez, N.; Silvia, A.; Garzón, E.; Yáñez, E. 2011. Caracterización y manejo de subproductos del beneficio del fruto de palma de aceite (en línea). Centro de

Investigación en Palma de Aceite- CENIPALMA, Bogotá. Consultado 24 jul. 2017. Disponible en <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/boletines/article/download/.../10492>.

Rocha, C. 2011. Ingeniería de tratamiento y acondicionamiento de agua. Absorción con carbón activado, Capítulo 9: 239p. Consultado 08 ago. 2017 Disponible en <http://www.oocities.org/edrochac/sanitaria/carbon6.pdf>.

Rubinson, K.; Robinson, J. 2001. Introducción a la espectrometría, Análisis instrumental. Prentice Hall (ed.), Madrid-España, 282-356 p.

Skoog, D.; Holler, F.; Nieman, T. 1992. Espectroscopia molecular, Principios de análisis instrumental. Mc. Graw Hill (ed.), Quinta edición, España, 321-435 p.

Solís, J.; Morales, M.; Ayala, R.; Duran, M. 2012. Obtención de carbón activado a partir de residuos agroindustriales y su evaluación en la remoción de color del jugo de caña (en línea). Instituto mexicano de ingenieros químicos. Tecnología, ciencia, educación 27(1): 38-48. Consultado 17 may. 2017. Disponible en <http://www.redalyc.org/pdf/482/48224413006.pdf>.

Valdez, H.; Sánchez, M.; Zaror, C. 2011. Impacto del tratamiento con ozono sobre las propiedades superficiales del carbón activado (en línea). Revista chilena de ingeniería 19(2). Consultado 22 oct. 2016. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=77219647003>.

VIII. Anexos

Anexo 1: Análisis de humedad, cenizas y materia volátil de la muestra de raquis de palma aceitera.

Tabla 10: Humedad

Muestra	Peso inicial	Peso seco	Porcentaje	Promedio
1	100	45.40	54.60	49.20
2	100	56.21	43.79	

Tabla 11. Cenizas

Muestra	Peso inicial	Peso crisol	Peso cenizas +crisol	Porcentaje	Promedio
1	2	25.25	25.31	3.0	3
2	2	25.67	25.73	3.0	

Tabla 12. Materia volátil

Muestra	Peso inicial	Peso crisol	Peso calcinado +crisol	Peso calcinado	Peso perdido (%)	Porcentaje	Promedio
1	2	23.22	23.32	0.1	95	40.40	45.81
2	2	25.00	25.10	0.1	95	51.21	

Anexo 2: carbón activado de raquis de palma aceitera

Tabla 13.: Rendimiento del carbón activado de raquis de palma aceitera

Numero de tratamiento	Concentración (%)	temperatura (°C)	tiempo (hora)	rendimiento M1 (gr)	rendimiento M2 (gr)	rendimiento M3 (gr)	rendimiento M4 (gr)	rendimiento M5 (gr)	Promedio
1	30	300	1	14.70	15.03	16.88	14.07	16.40	15.42
2	30	300	2	10.19	14.23	16.07	14.15	13.99	13.73
3	30	300	3	14.73	14.81	14.32	14.63	14.41	14.58
4	30	400	1	13.26	12.89	12.56	13.10	13.41	13.04
5	30	400	2	15.56	14.82	14.34	14.81	14.13	14.73
6	30	400	3	14.77	13.89	14.03	14.56	14.71	14.39
7	30	500	1	13.04	14.36	12.61	14.26	16.59	14.17
8	30	500	2	13.16	12.73	13.34	12.06	12.80	12.82
9	30	500	3	13.84	13.67	13.70	14.01	13.90	13.82
10	60	300	1	14.92	16.00	16.22	16.91	15.38	15.89
11	60	300	2	14.80	14.72	14.54	14.05	14.68	14.56
12	60	300	3	15.78	14.83	14.23	13.65	14.50	14.60
13	60	400	1	12.76	13.04	12.67	12.81	13.23	12.90
14	60	400	2	13.99	13.72	13.56	12.76	13.07	13.42
15	60	400	3	13.70	12.56	12.82	13.00	13.30	13.08
16	60	500	1	13.48	12.65	13.99	12.89	13.08	13.22
17	60	500	2	12.48	10.58	13.56	12.73	13.05	12.48
18	60	500	3	12.34	12.03	12.56	12.15	11.89	12.19
19	85	300	1	14.71	14.44	15.86	14.81	15.12	14.99
20	85	300	2	14.26	14.32	12.76	14.10	13.56	13.80
21	85	300	3	12.61	12.38	11.99	12.67	12.09	12.35
22	85	400	1	12.61	12.09	12.48	12.53	12.13	12.37
23	85	400	2	15.27	14.84	14.12	13.68	14.19	14.42
24	85	400	3	13.04	12.31	12.79	13.84	13.21	13.04

25	85	500	1	13.78	14.10	14.25	13.45	14.12	13.94
26	85	500	2	14.36	14.08	14.56	13.71	14.00	14.14
27	85	500	3	13.26	14.05	13.78	13.63	14.01	13.75

Anexo 3: curva de calibración para la adsorción de azul de metileno

Tabla 14. Medidas de absorción para la curva de calibración

X (mg/L)	Y (abs)
100	0.032
200	0.083
400	0.185
600	0.273
800	0.365
1000	0.407
1200	0.525

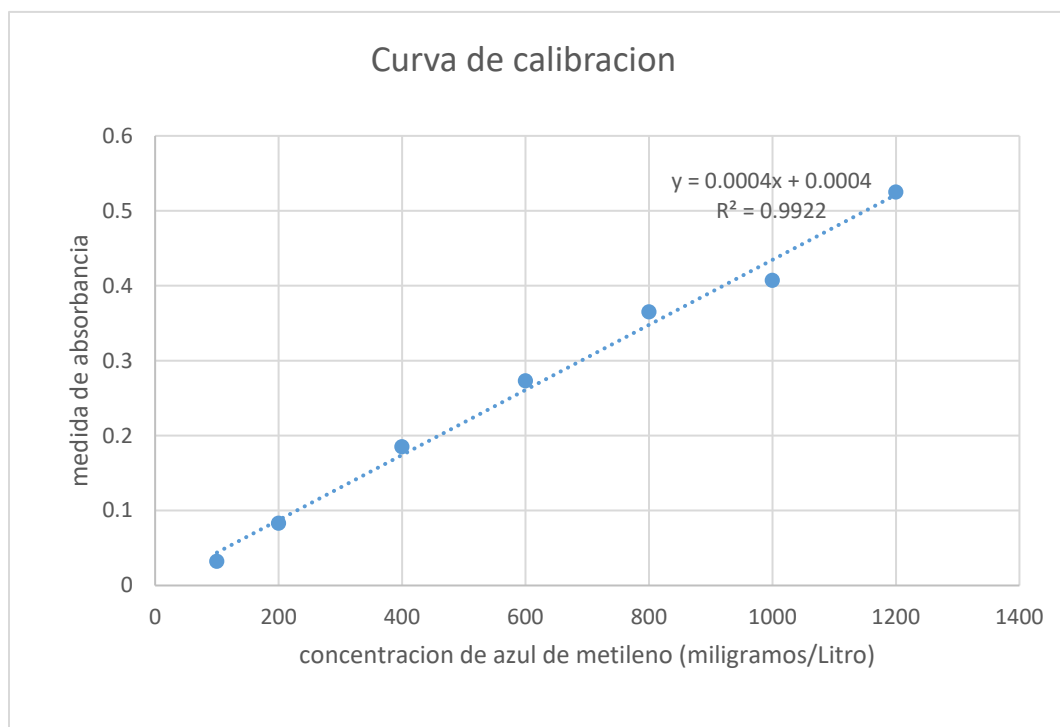


Figura 18. Curva de calibración.

Anexo 4: Medidas de adsorción

Tabla 15. Medidas de absorbancia

tratamiento	Concentración (%)	temperatura (°C)	tiempo (horas)	absorbancia 1	absorbancia 2	absorbancia 3	absorbancia 4	absorbancia 5
1	30	300	1	0.101	0.072	0.101	0.073	0.098
2	30	300	2	0.043	0.060	0.043	0.055	0.050
3	30	300	3	0.038	0.046	0.041	0.036	0.049
4	30	400	1	0.064	0.072	0.055	0.074	0.065
5	30	400	2	0.024	0.026	0.041	0.034	0.023
6	30	400	3	0.024	0.043	0.024	0.034	0.038
7	30	500	1	0.066	0.055	0.052	0.058	0.079
8	30	500	2	0.072	0.096	0.080	0.093	0.095
9	30	500	3	0.015	0.016	0.023	0.024	0.014
10	60	300	1	0.137	0.120	0.117	0.131	0.139
11	60	300	2	0.023	0.042	0.030	0.046	0.053
12	60	300	3	0.003	0.007	0.004	0.011	0.008
13	60	400	1	0.036	0.049	0.034	0.040	0.046
14	60	400	2	0.024	0.016	0.026	0.023	0.022
15	60	400	3	0.024	0.027	0.034	0.023	0.026
16	60	500	1	0.018	0.027	0.018	0.028	0.024
17	60	500	2	0.020	0.024	0.027	0.019	0.015
18	60	500	3	0.023	0.032	0.031	0.019	0.024
19	85	300	1	0.099	0.096	0.106	0.107	0.100
20	85	300	2	0.084	0.096	0.104	0.114	0.111
21	85	300	3	0.021	0.022	0.021	0.016	0.013
22	85	400	1	0.151	0.179	0.167	0.178	0.160
23	85	400	2	0.107	0.111	0.099	0.104	0.097
24	85	400	3	0.053	0.044	0.049	0.045	0.048

25	85	500	1	0.013	0.016	0.013	0.020	0.010
26	85	500	2	0.040	0.034	0.023	0.036	0.022
27	85	500	3	0.139	0.158	0.186	0.184	0.174

Tabla 16. Adsorción en miligramos de azul de metileno por gramo de carbón activo

Numero de tratamiento	Factores de estudio			Adsorción (miligramos de azul de metileno por gramo de carbon activado)					
	Concentración de acido	Temperatura (grados centígrados)	Tiempo (hora)	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Promedio
1	30	300	1	251.50	179.00	251.50	181.50	244.00	221.50
2	30	300	2	106.50	149.00	106.50	136.50	124.00	124.50
3	30	300	3	94.00	114.00	101.50	89.00	121.50	104.00
4	30	400	1	159.00	179.00	136.50	184.00	161.50	164.00
5	30	400	2	59.00	64.00	101.50	84.00	56.50	73.00
6	30	400	3	59.00	106.50	59.00	84.00	94.00	80.50
7	30	500	1	164.00	136.50	129.00	144.00	196.50	154.00
8	30	500	2	179.00	239.00	199.00	231.50	236.50	217.00
9	30	500	3	36.50	39.00	56.50	59.00	34.00	45.00
10	60	300	1	341.50	299.00	291.50	326.50	346.50	321.00
11	60	300	2	56.50	104.00	74.00	114.00	131.50	96.00
12	60	300	3	6.50	16.50	9.00	26.50	19.00	15.50
13	60	400	1	89.00	121.50	84.00	99.00	114.00	101.50
14	60	400	2	59.00	39.00	64.00	56.50	54.00	54.50
15	60	400	3	59.00	66.50	84.00	56.50	64.00	66.00

16	60	500	1	44.00	66.50	44.00	69.00	59.00	56.50
17	60	500	2	49.00	59.00	66.50	46.50	36.50	51.50
18	60	500	3	56.50	79.00	76.50	46.50	59.00	63.50
19	85	300	1	246.50	239.00	264.00	266.50	249.00	253.00
20	85	300	2	209.00	239.00	259.00	284.00	276.50	253.50
21	85	300	3	51.50	54.00	51.50	39.00	31.50	45.50
22	85	400	1	376.50	446.50	416.50	444.00	399.00	416.50
23	85	400	2	266.50	276.50	246.50	259.00	241.50	258.00
24	85	400	3	131.50	109.00	121.50	111.50	119.00	118.50
25	85	500	1	31.50	39.00	31.50	49.00	24.00	35.00
26	85	500	2	99.00	84.00	56.50	89.00	54.00	76.50
27	85	500	3	346.50	394.00	464.00	459.00	434.00	419.50

Anexo 5: Pruebas estadísticas de normalidad de los datos

Tabla 17. Normalidad de la concentración de ácido fosfórico

Pruebas de normalidad						
Concentración	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Adsorción 30	,098	45	,200*	,951	45	,055
60	,269	45	,000	,672	45	,000
85	,150	45	,012	,903	45	,001

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors

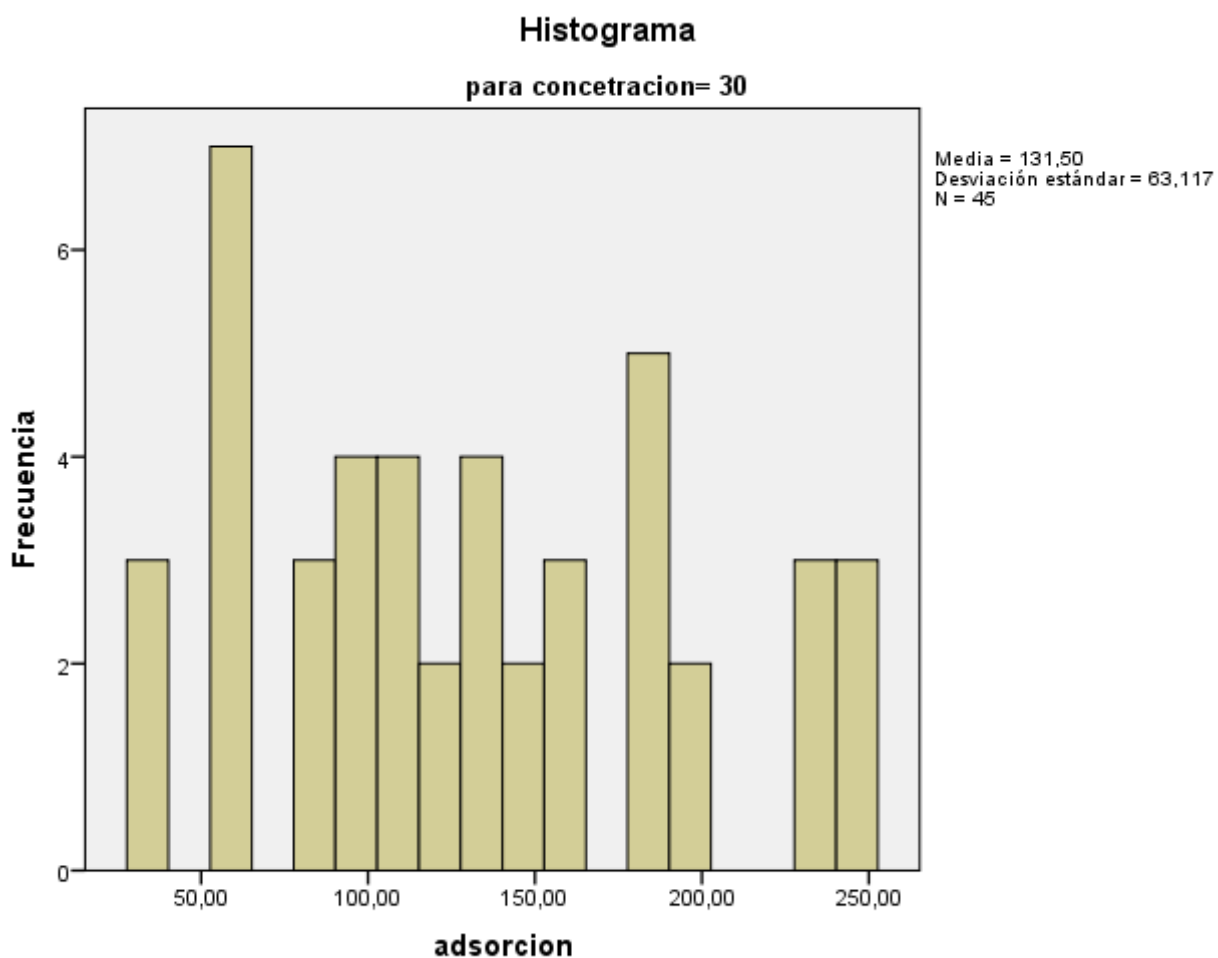


Figura 19. Histograma para la concentración de 30 por ciento.

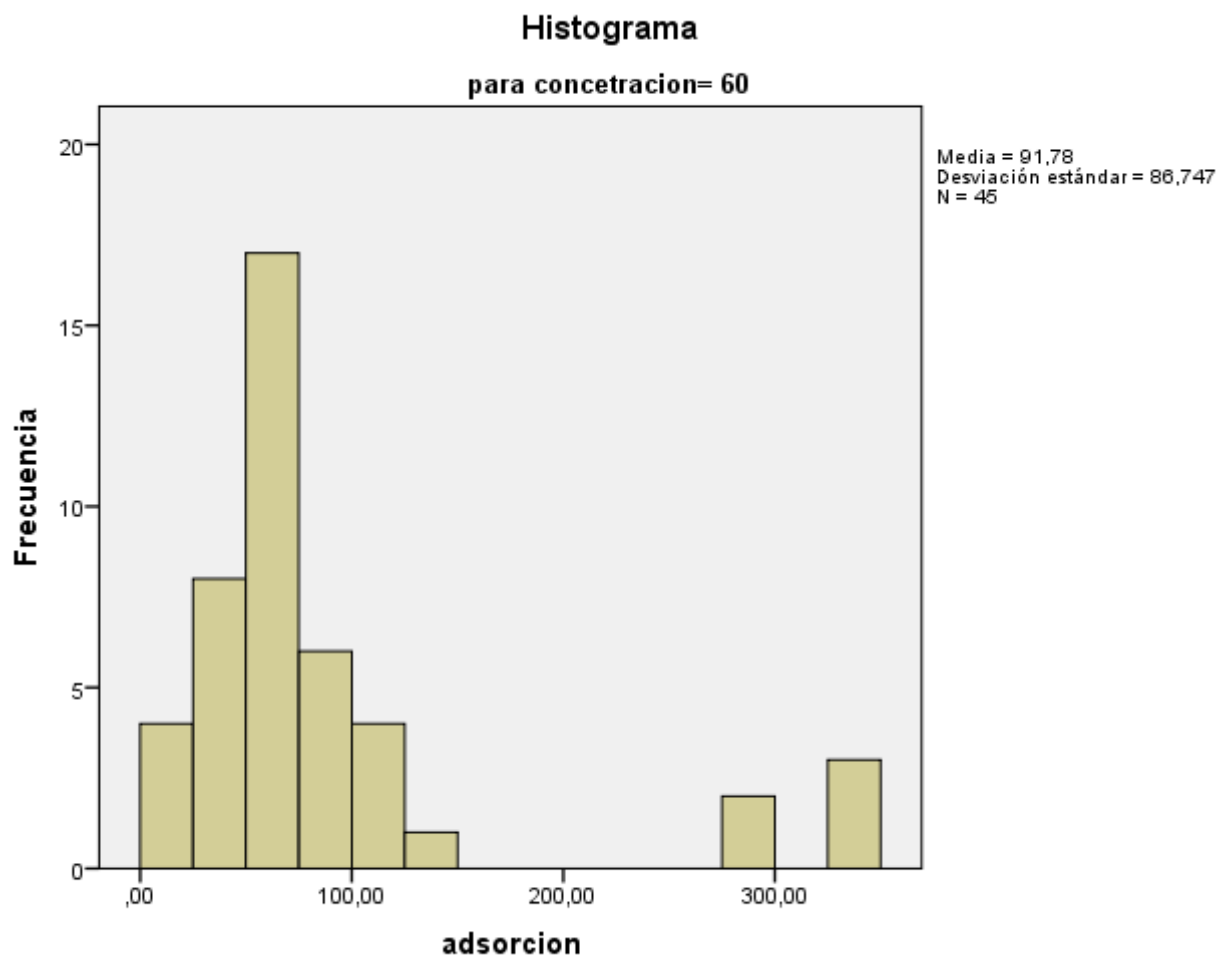


Figura 20. Histograma para la concentración de 60 por ciento.

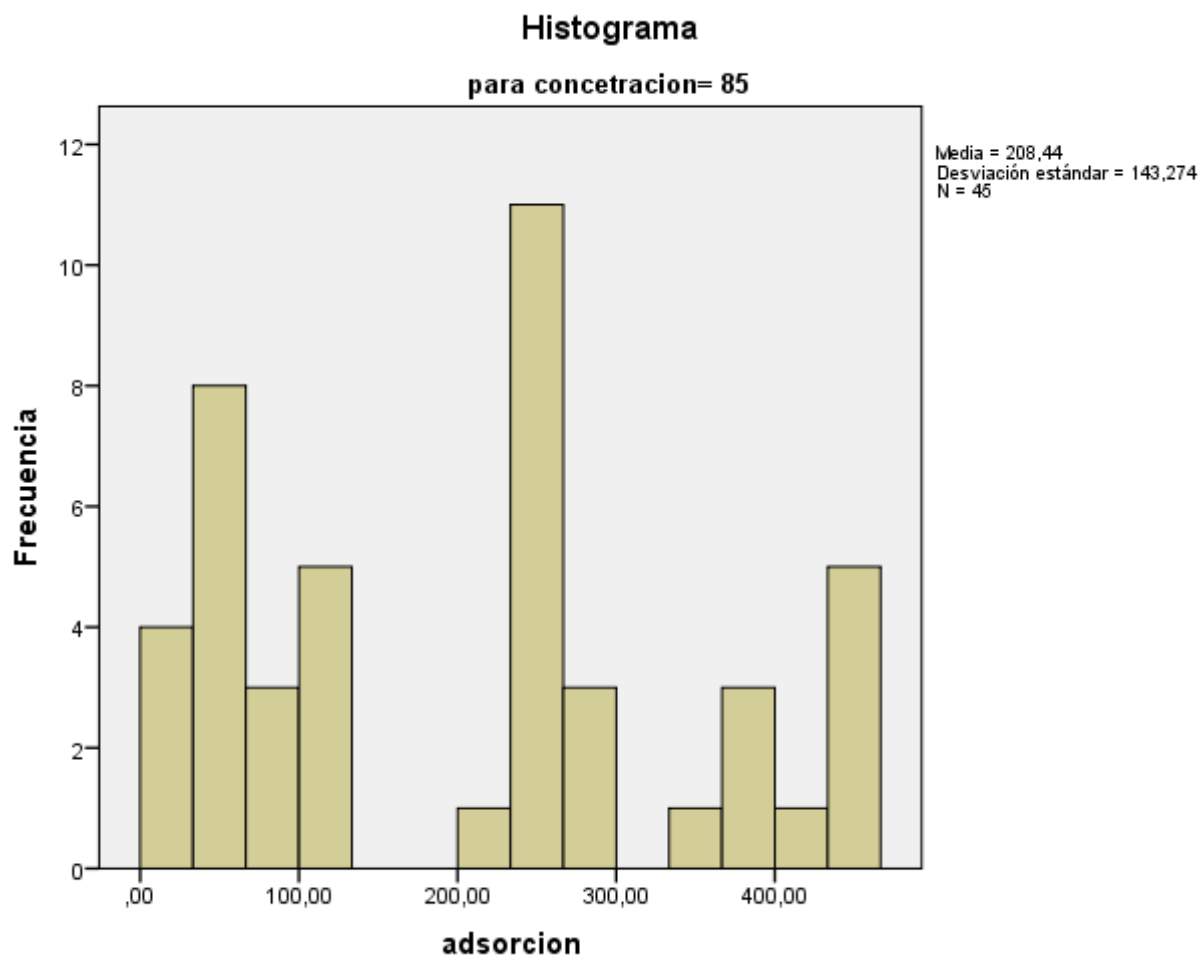


Figura 21. Histograma para la concentración de 85 por ciento.

Tabla 18. Normalidad de la temperatura de carbonización.

Pruebas de normalidad						
Temperatura	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Adsorción 300	,158	45	,007	,931	45	,010
400	,236	45	,000	,778	45	,000
500	,258	45	,000	,732	45	,000

a. Corrección de significación de Lilliefors

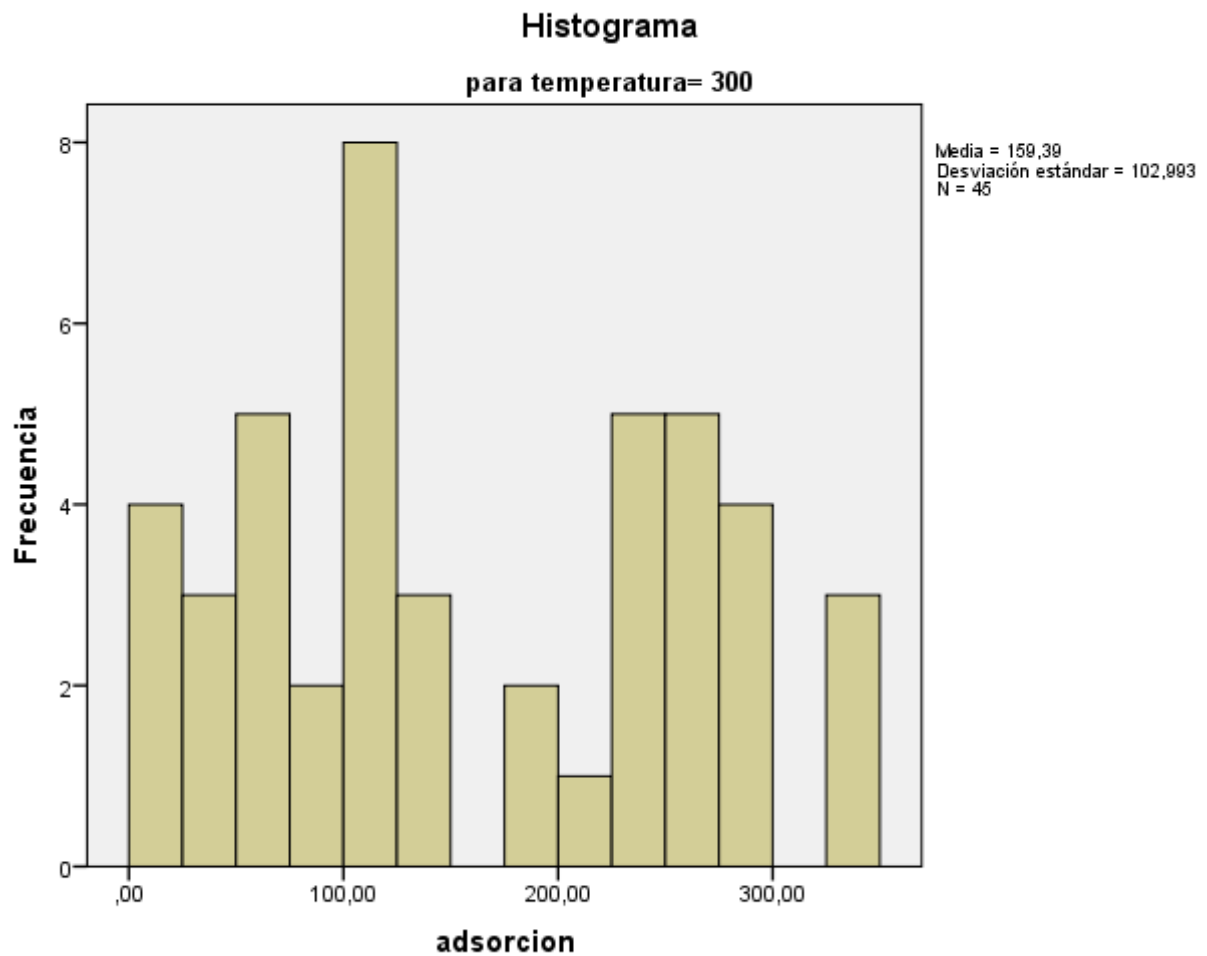


Figura 22. Histograma para la temperatura de 300 grados centígrados.

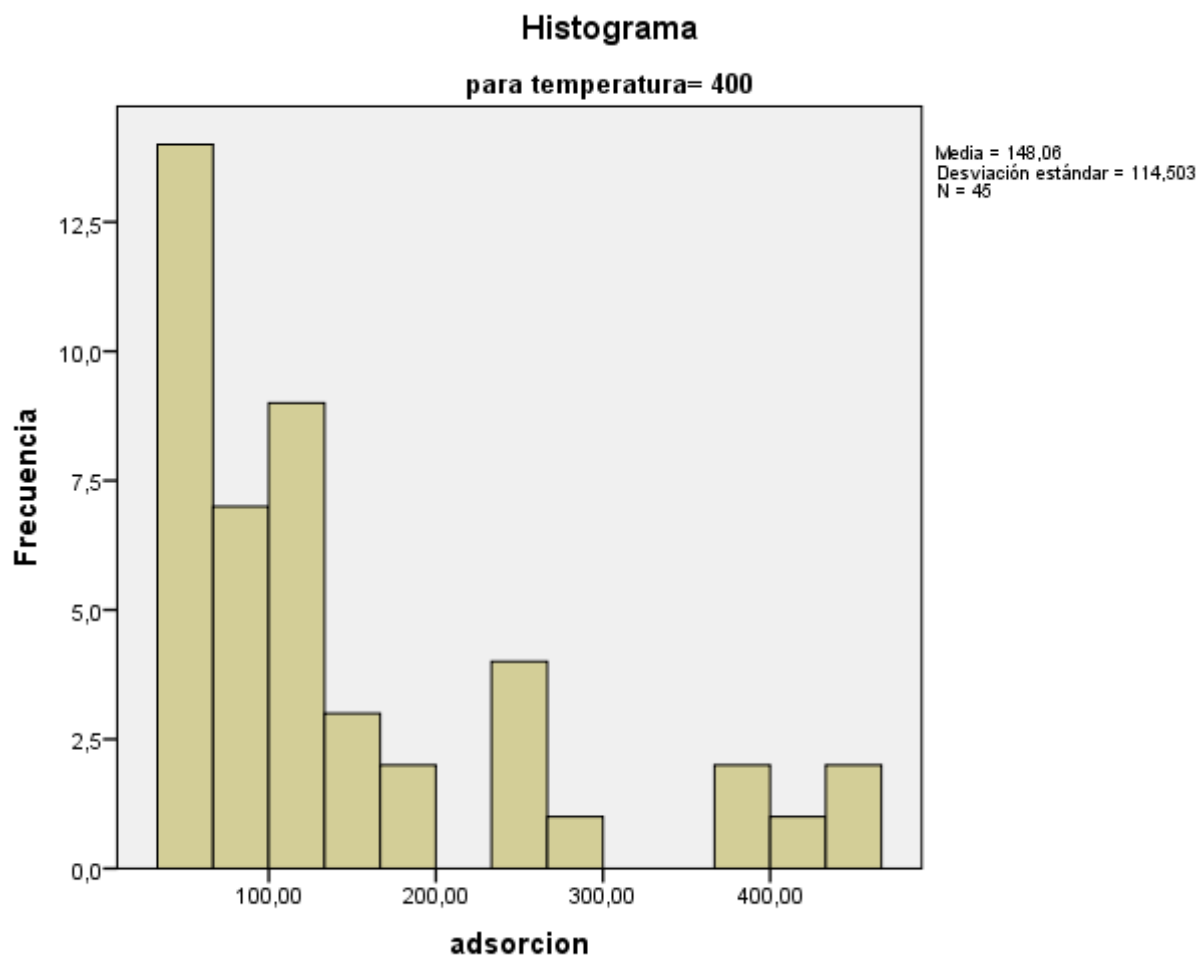


Figura 23. Histograma para temperatura de 400 grados centígrados.

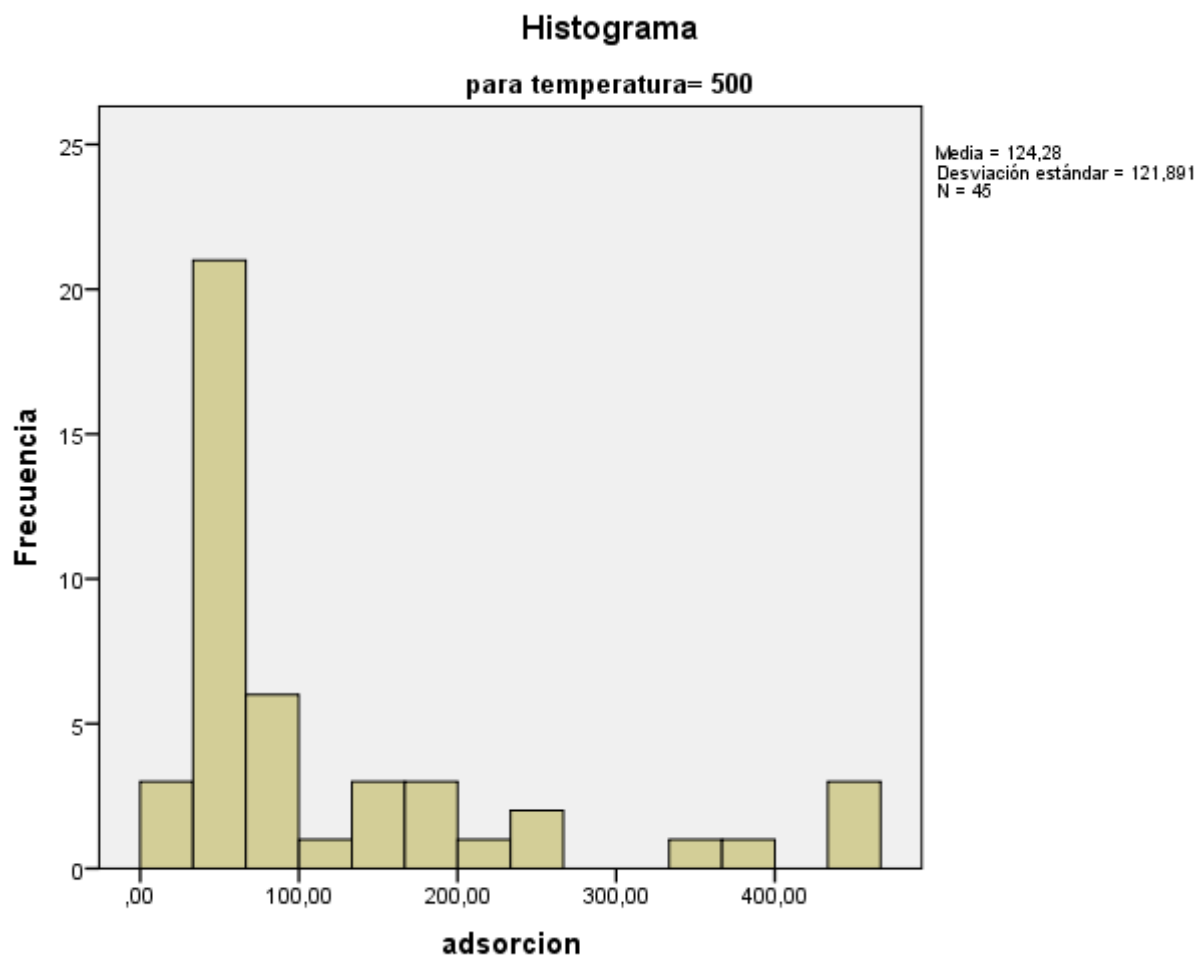


Figura 24. Histograma para la temperatura de 500 grados centígrados.

Tabla 19. Normalidad del tiempo de carbonización

Pruebas de normalidad						
Tiempo	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Adsorción 1	,102	45	,200*	,944	45	,031
2	,184	45	,001	,851	45	,000
3	,316	45	,000	,637	45	,000

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors

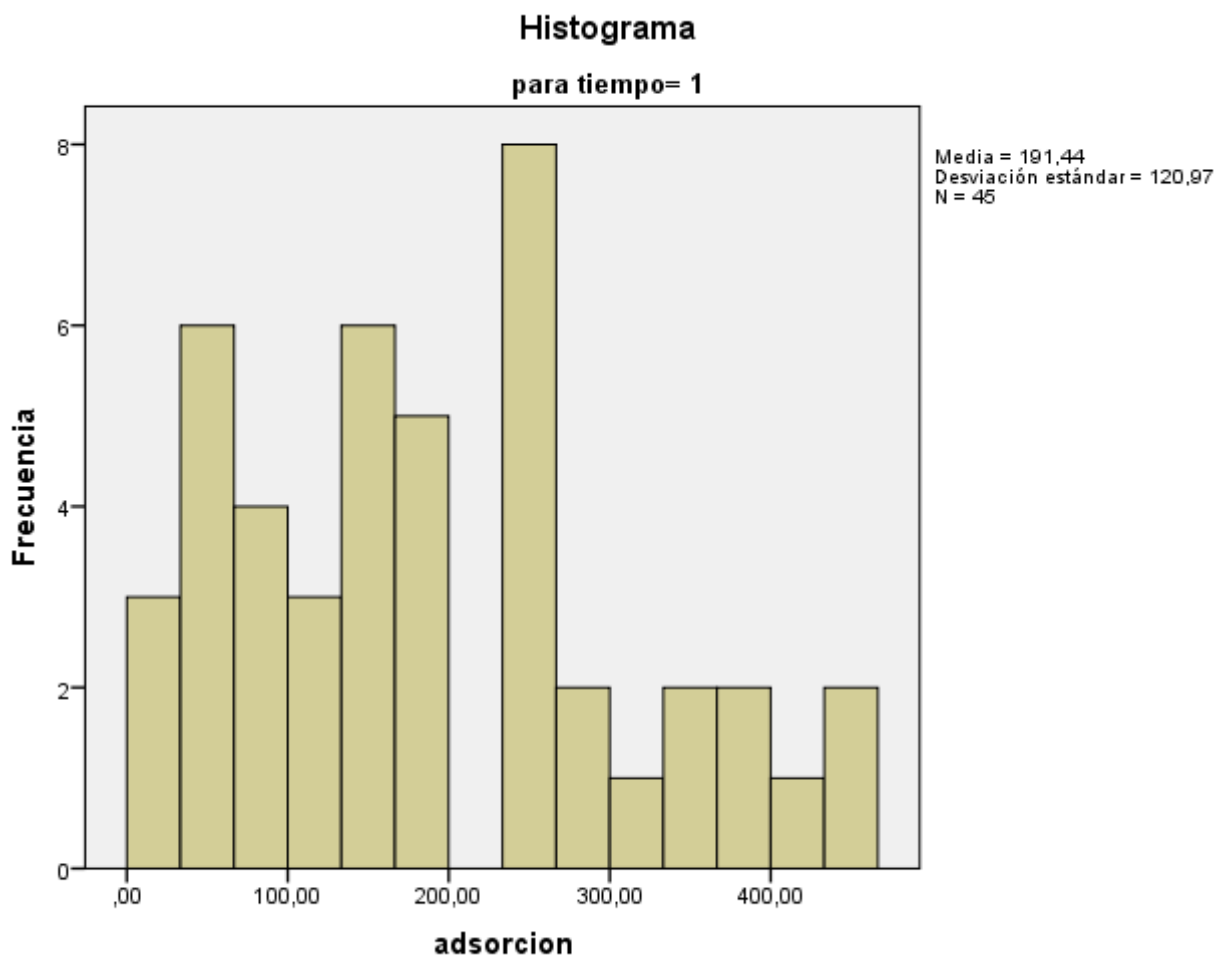


Figura 25. Histograma para el tiempo de 1 hora.

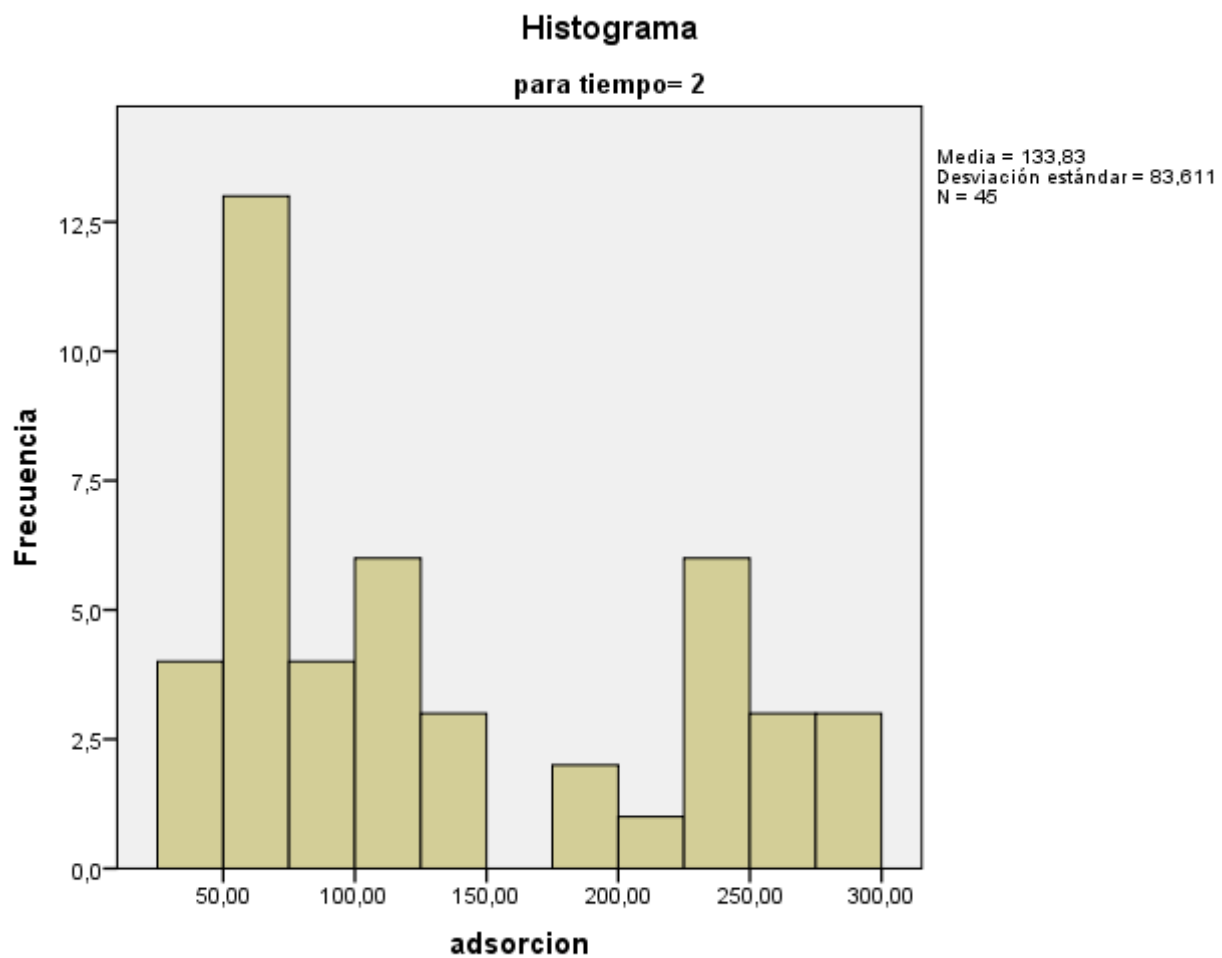


Figura 26. Histograma para el tiempo de 2 horas.

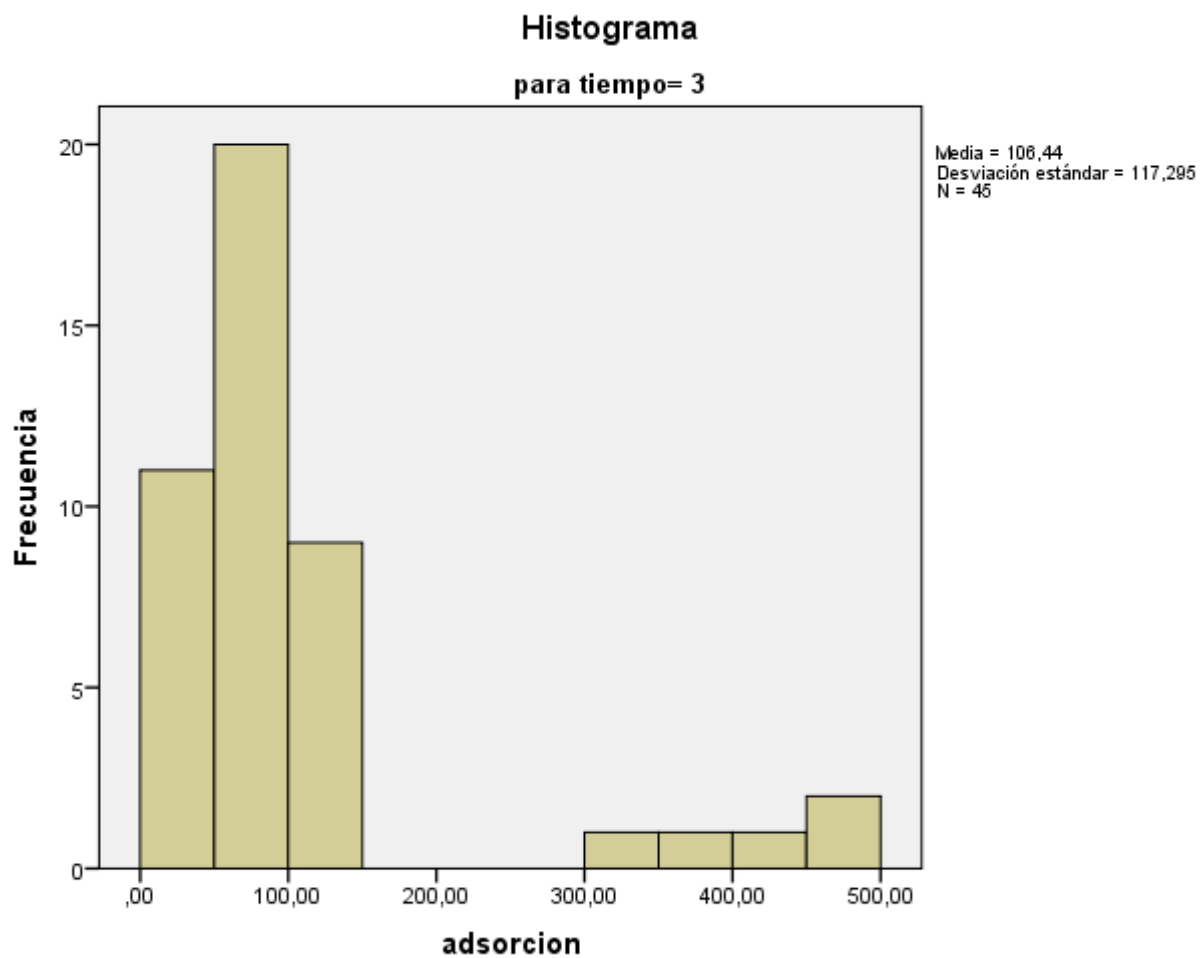


Figura 27. Histograma para el tiempo de 3 horas.

Anexo 6: Prueba estadística de Homocedasticidad de los datos.

Tabla 20. Prueba de levene

**Prueba de igualdad de Levene de
varianzas de error^a**

Variable dependiente: capacidad de
adsorción

F	df1	df2	Sig.
4,118	26	108	,000

Prueba la hipótesis nula que la varianza
de error de la variable dependiente es
igual entre grupos.

a. Diseño : Intersección + concentración
+ temperatura + tiempo + concentración
* temperatura + concentración * tiempo
+ temperatura * tiempo + concentración
* temperatura * tiempo

Anexo 7: Prueba estadística de Kruskal Wallis: Concertación de ácido fosfórico vs adsorción

Tabla 21. Rangos para la concentración de ácido fosfórico.

Rangos		
Concentración	N	Rango promedio
Adsorción 30	45	72,73
60	45	47,89
85	45	83,38
Total	135	

Tabla 22. Estadístico de prueba para la concentración de ácido fosfórico

Estadísticos de prueba^{a,b}	
	Adsorción
Chi-cuadrado	19,523
Gl	2
Sig. asintótica	,000

a. Prueba de Kruskal Wallis

b. Variable de agrupación: concentración

Anexo 8: Prueba estadística de Kruskal Wallis: Temperatura de carbonización vs adsorción

Tabla 23. Rango para la temperatura de carbonización.

Rangos		
Temperatura	N	Rango promedio
Adsorción 300	45	75,66
400	45	72,66
500	45	55,69
Total	135	

Tabla 24. Estadístico de prueba para la temperatura de carbonización.

Estadísticos de prueba ^{a,b}	
	Adsorción
Chi-cuadrado	6,823
Gl	2
Sig. asintótica	,033

a. Prueba de Kruskal Wallis

b. Variable de agrupación: temperatura

Anexo 9: Prueba estadística de Kruskal Wallis: Tiempo de carbonización vs adsorción

Tabla 25. Rangos para el tiempo de carbonización

Rangos		
tiempo	N	Rango promedio
Adsorción 1	45	84,62
2	45	68,74
3	45	50,63
Total	135	

Tabla 26. Estadístico de prueba para el tiempo de carbonización.

Estadísticos de prueba ^{a,b}	
	Adsorción
Chi-cuadrado	17,024
Gl	2
Sig. asintótica	,000

a. Prueba de Kruskal Wallis

b. Variable de agrupación: tiempo

Anexo 10: fotos del ensayo en laboratorio



Limpieza y pre secado de raquis de palma aceitera





Muestra de raquis de palma aceitera listo para los ensayos



Impregnación de la muestra de raquis de palma aceitera con el ácido fosfórico



Impregnación de la muestra de raquis de palma aceitera con el ácido fosfórico



Impregnación de la muestra de raquis de palma aceitera con el ácido fosfórico



Lavado de carbón activado de raquis de palma aceitera



Colocación de la muestra y sellado de los envases de carbonización



Colocación de los envases de carbonización en la mufla.



Carbón activado de raquis de palma aceitera listos para en secado



Carbón activado de raquis de palma aceitera



Reactivos para la prueba de adsorción del carbón activado de raquis de palma aceitera



Muestras de carbón activado de palma aceitera realizando prueba con azul de metileno



Verificando las muestras para la realización de la medida de absorbancia en el espectrofotómetro.



Preparando las celdas de espectrofotómetro para la medida de absorbancia.



Preparando las celdas de espectrofotómetro para la medida de absorbancia.



Colocación de las cubetas en el espectrofotómetro



Colocación de las cubetas en el espectrofotómetro



Equipo calibrado para la realización de las medidas de absorbancia.



Medida de absorbancia de las muestras