

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



Una Institución Adventista

Caracterización del carbón activado de huesos de Alpaca (*Vicugna pacos*) por activación química con hidróxido de sodio, ácido fosfórico y tiempo de pirólisis

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Por:

Aldair Jose Callo Choquepuma

Nury Dania Flores Quispe

Asesor:

Ing. Juan Eduardo Vigo Rivera

Juliaca, diciembre de 2020

DECLARACIÓN JURADA DE AUTORÍA DEL INFORME DE TESIS

Ing. Juan Eduardo Vigo Rivera, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que el presente informe de investigación titulado: **“CARACTERIZACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO DE HUESOS DE ALPACA (VICUGNA PACOS) POR ACTIVACIÓN QUÍMICA CON HIDRÓXIDO DE SODIO, ÁCIDO FOSFÓRICO Y TIEMPO DE PIRÓLISIS”** constituye la memoria que presenta los Bachilleres **Aldair Jose Callo Choquepuma** y **Nury Dania Flores Quispe** para obtener el título de Profesional de Ingeniero Ambiental, cuya tesis ha sido realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad de los autores, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente declaración en Juliaca, a los 30 días del mes de diciembre del año 2020



Ing. Juan Eduardo Vigo Rivera
Asesor



121

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Puno, Juliaca, Villa Chullunquiari, a 28 día(s) del mes de diciembre del año 2020, siendo las 13:00 horas, se reunieron en el Salón de Grados y Títulos de la Universidad Peruana Unión, Filial Juliaca, bajo la dirección del Señor Presidente del jurado: MSc. Rose Adeline Ballata Bhura, el secretario: Ing. Miguel Angel Salcedo Enriquez y los demás miembros: Ing. Verónica Haydee Pari Mamani y el asesor: Ing. Juan Eduardo Vigo Rivera

con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulada: "Caracterización del carbón activado de huesos de Alpaca (Vicugna pacos) por activación química con hidróxido de sodio, ácido fosfórico y tiempo de pirólisis"

de el(los)/la(las) bachiller(es): a) Aldair Jose Gallo Choquepuma
 b) Nury Dania Flores Ouirpe

conducente a la obtención del título profesional de Ingeniero Ambiental
 (Nombre del Título Profesional)

con mención en

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (los)/a(la)(las) candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por el(los)/la(las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Candidato (a): Aldair Jose Gallo Choquepuma

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>14</u>	<u>C</u>	<u>Aceptable</u>	<u>Bueno</u>

Candidato (b): Nury Dania Flores Ouirpe

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>14</u>	<u>C</u>	<u>Aceptable</u>	<u>Bueno</u>

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al(los)/a(la)(las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

Presidente

 Asesor

Secretario

Miembro

Miembro

Candidato/a (a)

Candidato/a (b)

Dedicatoria

A mis padres, Saturnina Choquepuma Ccapa y Juan Callo Cusi, por su arduo trabajo, dedicación y sacrificio a lo largo de los años y así lograr esta meta tan esperada.

A mis hermanos (Karina, Nelson, Yuli, Nilton y Patricia) por estar conmigo durante todo este proceso de aprendizaje y siempre brindarme su apoyo.

Aldair Jose Callo Choquepuma

A mis queridos padres Luis y Justa, quienes siempre lucharon, me inspiraron y confiaron en mí, brindándome apoyo absoluto día tras día para lograr cada una de las metas establecidas en mi vida.

A mis hermanas Katerin y Nadia que me impulsan a ser una mejor persona y ser el motivo de muchas alegrías y logros.

Nury Dania Flores Quispe

Agradecimiento

A Dios por ser nuestra fuente de inspiración, sabiduría y entendimiento; por sostenernos en sus manos de gracia y brindarnos amor en momentos de dificultad.

A la Universidad Peruana Unión – Filial Juliaca por permitirnos recibir formación profesional en sus aulas.

A nuestros padres por su gran comprensión y apoyo durante todo este proceso.

A la Ing. Amparo que nos abrió sus puertas para poder realizar la parte experimental en las instalaciones del Laboratorio “RH LAB S.A.C.”

Al Ing. Juan Eduardo Vigo Rivera, nuestro asesor, por brindarnos su apoyo continuo desde el principio hasta el fin del proyecto.

Índice General

Dedicatoria	iv
Agradecimiento.....	v
Índice General	vi
Índice de Tablas.....	ix
Índice de Figuras.....	x
Índice de Anexos.....	xi
Símbolos Utilizados	xii
Resumen	xiii
Abstract	xiv
CAPÍTULO I. EL PROBLEMA	15
1.1. Identificación del Problema.....	15
1.2. Justificación de la investigación	18
1.3. Objetivos.....	19
1.3.1. Objetivo General	19
1.3.2. Objetivos Específicos	19
CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LA LITERARURA	20
2.1. La Alpaca.....	20
2.1.1. Características Generales	20
2.1.2. Fenotipos.....	21
2.1.3. Distribución	22
2.2. Carbón Activado	22
2.2.1. Estructura y Propiedades.....	22
2.2.2. Tipos de poros de una partícula de carbón.....	22
2.2.3. Clases de carbón activado	24

2.2.3.1. Carbón Activado Granular	24
2.2.3.2. Carbón activado pulverizado	24
2.2.4. Procesos de Activación	25
2.2.4.1. Activación Física	25
2.2.4.2. Activación Química	25
2.2.5. Propiedades Fisicoquímicas	26
2.2.5.1. Capacidad de adsorción	26
2.2.5.2. Densidad Aparente	27
2.2.5.3. Humedad	27
2.2.5.4. Cenizas	27
2.2.5.5. pH	28
2.2.5.6. Materia volátil	28
2.2.5.7. Carbón fijo	28
2.2.6. Aplicaciones del Carbón Activo	28
2.4. Antecedentes de la Investigación	29
2.4.1. Antecedentes Internacionales	29
2.4.2. Antecedentes Nacionales	32
2.4.3. Antecedente local	32
CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS	33
3.1. Diseño de Investigación	33
3.2. Área de Trabajo	34
3.3. Materiales, Equipos e Insumos	34
3.4. Procedimiento	36
3.4.1. Obtención del Carbón de Huesos de Alpaca	37
3.4.2. Activación del Carbón	37
3.4.3. Caracterización del Carbón Activado	38

CAPITULO VI. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	43
4.1. Obtención del Carbón de Huesos de Alpaca.....	43
4.2. Activación Química y por Pirólisis el Carbón de Huesos de Alpaca.....	44
4.3. Propiedades Fisicoquímicas del Carbón Activado.....	45
4.3.1. Rendimiento	45
4.3.2. Humedad	46
4.3.3. Cenizas.....	47
4.3.4. pH.....	48
4.3.5. Densidad aparente.....	50
4.3.6. Material volátil.....	51
4.3.7. Carbono fijo.....	52
4.4. Evaluación de la Capacidad de Adsorción de Oro Utilizando Carbón Activado de Huesos de Alpaca	54
CAPITULO V. CONSLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	56
5.1. Conclusiones.....	56
5.2. Recomendaciones.....	56
Referencias.....	58
Anexos.....	63

Índice de Tablas

Tabla 1. Diseño experimental de la investigación.....	33
Tabla 2. Material biológico utilizado en la investigación	34
Tabla 3. Insumos utilizados en la investigación	34
Tabla4. Materiales y equipos utilizados en la investigación	35
Tabla 5. Parámetros fisicoquímicos para la caracterización del carbón activado.....	39
Tabla 6. Resultados de la evaluación de los parámetros fisicoquímicos	45
Tabla 7. Prueba de análisis de varianza de rendimiento del carbón activado	46
Tabla 8. Prueba de análisis de varianza de humedad del carbón activado	46
Tabla 9. Prueba de análisis de varianza de cenizas del carbón activado.....	48
Tabla 10. Prueba de análisis de varianza de pH del carbón activado	49
Tabla 11. Prueba de análisis de varianza de densidad aparente del carbón activado..	51
Tabla 12. Prueba de análisis de varianza de material volátil del carbón activado.....	51
Tabla 13. Prueba de análisis de varianza de carbono fijo del carbón activado	53
Tabla 14. Concentración inicial y final de la solución cianurada de oro.....	54
Tabla 15. Prueba de análisis de varianza de adsorción del carbón activado	55

Índice de Figuras

Figura 1. Población de alpacas a nivel mundial.....	16
Figura 2. Producción de carne de alpaca en el Perú.....	17
Figura 3. Alpaca (<i>Vicugna pacos</i> , L.).....	20
Figura 4. Clasificación de poros del carbón activado.....	23
Figura 5. Diagrama de flujo del proceso para la obtención de carbón activado a partir de huesos de Alpaca.....	36
Figura 6. A. Limpieza de los huesos de alpaca; B. Trituración de los huesos de alpaca..	37
Figura 7. A. Agitación del carbón activado; B. Pirolización de la muestra.....	38
Figura 8. Obtención y pesado del carbón de huesos de alpaca.....	43
Figura 9. Carbón de huesos de alpaca activadas químicamente.....	44
Figura 10. Evaluación del rendimiento del carbón activo.....	45
Figura 11. Evaluación de humedad del carbón activo.....	46
Figura 12. Evaluación del contenido de ceniza del carbón activo.....	47
Figura 13. Evaluación del pH del carbón activo.....	49
Figura 14. Evaluación de la densidad aparente del carbón activo.....	50
Figura 15. Evaluación del contenido de material volátil del carbón activo.....	51
Figura 16. Evaluación de carbono fijo del carbón activo.....	53
Figura 17. Evaluación de la capacidad de adsorción del carbón activo.....	54

Índice de Anexos

Anexo A. Análisis estadístico.	63
Anexo B. Panel fotográfico.	71
Anexo C. Métodos ASTM para el análisis de parámetros fisicoquímicos	86
Anexo D. Norma Peruana y mexicana para la determinación de la calidad de carbón activado.	90

Símbolos Utilizados

ANVA	: Análisis de varianza
ASTM	: American Society for Testing and Materials
DCA	: Diseño Completamente al Azar
g/cm ³	: Gramos por centímetro cúbico
H ₃ PO ₄	: Ácido fosfórico
NaOH	: Hidróxido de sodio
mg/L	: Miligramos por litro
ml	: Miligramos
pH	: Potencial de hidrógeno
rpm	: Revoluciones por minuto
%	: Porcentaje

Resumen

El objetivo de la investigación fue caracterizar el carbón activado de huesos de alpaca. Para el estudio se utilizó el diseño completamente al azar con 2 factores, factor A: Sustancia activante (NaOH, H₃PO₄, Testigo); factor B: tiempo de pirólisis (60 y 75 min) con 3 repeticiones por tratamiento. La muestra se obtuvo del mercado “Las Mercedes” de la ciudad de Juliaca – Puno, estos fueron calcinados a una temperatura de 500°C por 1 h y activados químicamente con NaOH (97%) y H₃PO₄ (86%). Asimismo, se sometió al proceso de pirólisis a una temperatura de 750°C a tiempos de 60 y 75 min. Posterior a ello, se realizó la caracterización fisicoquímica del carbón activo y la evaluación de la capacidad de adsorción en una solución cianurada con concentración de 21.33 mg/l de oro. Como resultado se obtuvo que el carbón activado con H₃PO₄ a un tiempo de pirólisis de 75 min, presentó mejor capacidad de adsorción (89.41%) y características fisicoquímicas de humedad (1.15%), cenizas (25.23%), material volátil (30.85%), carbono fijo (43.92%), pH 6.8 y densidad aparente de 0.73 g/cm³. Por lo tanto se concluye que el carbón activado de huesos de Alpaca fue caracterizado fisicoquímicamente.

Palabras Claves: Adsorción, carbón activado, huesos de alpaca.

Abstract

The objective of the research was to characterize the activated carbon from Alpaca bones. For the study, the Completely Random Design was used with 2 factors, factor A: Activating substance (NaOH, H₃PO₄, Control); Factor B: pyrolyzation time (60 and 75 min) with 3 repetitions per treatment. The sample was obtained from the “Las Mercedes” market in the city of Juliaca - Puno, they were calcined at a temperature of 500 ° C for 1 h and chemically activated with NaOH (97%) and H₃PO₄ (86%). Likewise, it was subjected to the pyrolysis process at a temperature of 750 ° C at times of 60 and 75 min. Subsequently, the physicochemical characterization of the activated carbon and the evaluation of the adsorption capacity in a cyanide solution with a concentration of 21.33 mg / l of gold was carried out. As a result, it was obtained that activated carbon with H₃PO₄ at a pyrolysis time of 75 min, presented a better adsorption capacity of 89.41% and physicochemical characteristics of humidity (1.15%), ash (25.23%), volatile material (30.85%), fixed carbon (43.92%), pH 6.8 and apparent density of 0.73 g / cm³. Therefore, it is concluded that the activated carbon from Alpaca bones was characterized physicochemically.

Keywords: Adsorption, activated carbon, alpaca bones.

CAPÍTULO I

El Problema

1.1. Identificación del problema

A escala mundial uno de los problemas más importantes y preocupantes que enfrenta la tierra, es la contaminación al medio ambiente por los residuos sólidos, los cuales se estima que para el 2050 aumentarán en un 70% con respecto a los niveles actuales (Mundial, 2018).

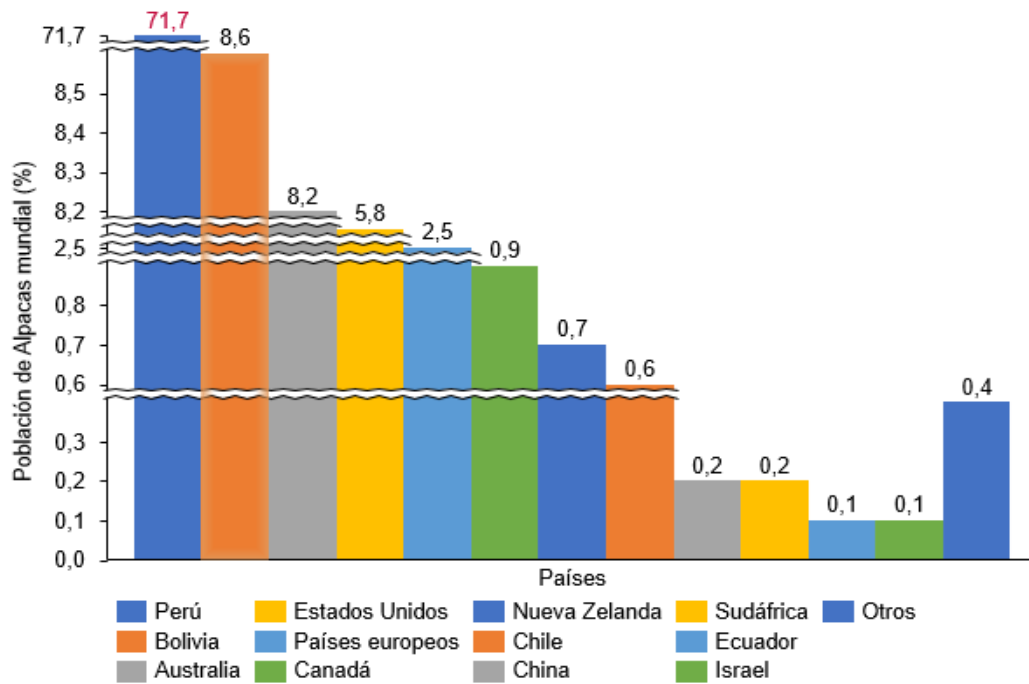
Teniendo en cuenta lo mencionado, Tuck (2018) declaró que la mala gestión de los residuos sólidos daña la salud humana y el medio ambiente, al mismo tiempo que exacerba los desafíos planteados por el cambio climático, que desafortunadamente las personas más pobres de la sociedad se ven afectadas, aunando a esta problemática la mala gestión de los residuos sólidos puesto que los recursos existentes debieran de utilizarse y reutilizarse continuamente para que no acaben en los vertederos.

Por otra parte, grandes cantidades de residuos son generados por la industrialización del sacrificio de animales para consumo humano entre los cuales se encuentran: sangre, pelo, plumas, órganos internos y huesos de animales, lo que ha provocado daños ambientales y a la salud humana (Figuroa, 1997).

En esta población encontramos a las alpacas, qué, según estudios han ascendió a más de 6 millones en el 2018, siendo Perú el de mayor población de cabezas de alpaca (Figura 1) (MINAGRI, 2019). En tal sentido se comprende que la crianza de alpacas es la actividad económica principal de las familias peruanas de las zonas altoandinas (Rojas & Castro, 2017).

Figura 1

Población de alpacas a nivel mundial

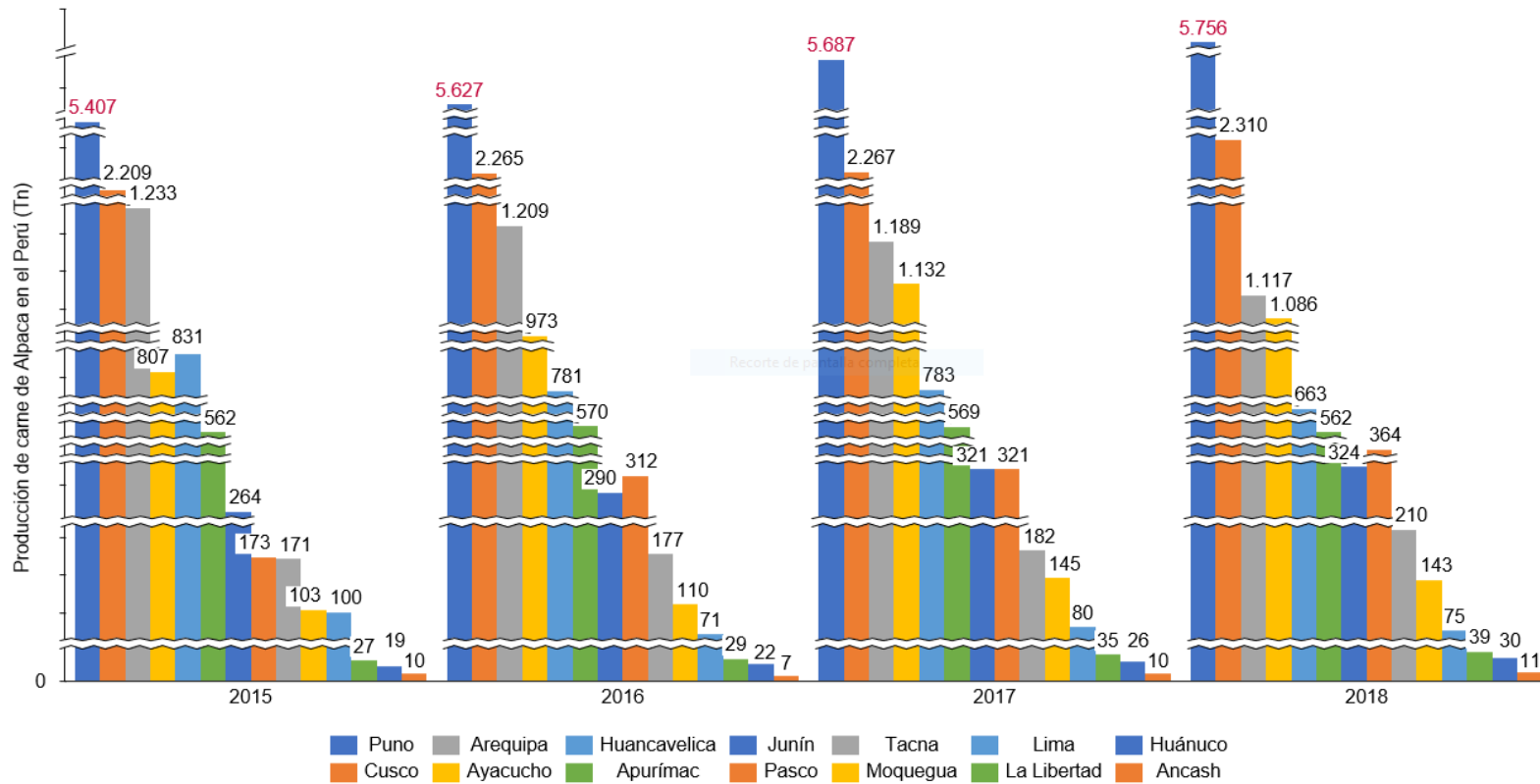


Fuente: MINAGRI-DGPA-DEEIA (2018)

En el 2018 la región de Puno contemplaba la mayor población de alpacas (46.2%) con una producción de carne de 5756 tn/mes (MINAGRI, 2019) (Figura 2). Cabe mencionar que la proporción de huesos de una alpaca con un peso promedio vivo de 45 – 49.8 kg es de 3 – 5.2 kg generando entre 904 a 1567 kg/mes de residuos óseos, lo que vendría a ser 18804 kg/año aproximadamente, haciendo que los métodos de eliminación y gestión inadecuada lleguen a ser perjudiciales para la salud de las personas (Deydier, 2005).

Figura 2

Producción de carne de alpaca en el Perú



Fuente: MINAGRI-DGPA-DEEIA (2018)

Considerando lo expuesto, se conoce que el carbón activado es un adsorbente universal que se puede obtener de origen vegetal o animal, para reducir la contaminación en fase líquida y gaseosa (Moreno & Rivera, 2001). Además, los adsorbentes de carbono pueden obtenerse a partir de diferentes materias primas, en teoría es factible sintetizar adsorbentes con propiedades específicas que dependerán en gran medida de los productos utilizados y de las condiciones del proceso de síntesis (Bonilla, 2016).

Cabe resaltar que el carbón de huesos de animal es un adsorbente que ha ganado una mayor aplicación en el tratamiento y purificación de agua en los últimos años, debido a que sus características son atractivas para adsorber diversos contaminantes (Bonilla, 2016).

En relación con la problemática expuesta en la presente investigación se pretende caracterizar el carbón activo de huesos de alpaca, activado químicamente con hidróxido de sodio y ácido fosfórico a fin de darle un valor agregado y conocer si este residuo tiene la capacidad de ser transformado en un material adsorbente.

1.2. Justificación de la investigación

La industria cárnica genera diversos residuos que muchas veces terminan en el vertedero ocasionando problemas ambientales. Por ello, el aporte del presente trabajo está focalizado en el reaprovechamiento y el otorgar un valor agregado a los huesos de alpaca, obteniendo carbón activado para así disminuir el impacto ambiental que pueda generar este residuo. La producción de carbón activado puede ser utilizado en el tratamiento y depuración de contaminantes tanto líquidos como gaseosos, decoloración de tintes y eliminación de olores. Además, en este estudio se propone una posible solución a la gran demanda de residuos óseos en el Perú, contribuyendo al conocimiento mundial sobre el uso de los huesos de la alpaca como un material de bajo costo para la obtención de carbón activado y por tanto a ingresar a un nuevo campo de investigación.

1.3. Objetivos

1.3.1. *Objetivo general*

Caracterizar el carbón activado de huesos de alpaca (*Vicugna Pacos*) que, por activación química con hidróxido de sodio, ácido fosfórico y tiempo de pirólisis, reporta las mejores características fisicoquímicas.

1.3.2. *Objetivos específicos*

- Obtener el carbón de los huesos de alpaca.
- Activar químicamente y por pirólisis el carbón de huesos de alpaca.
- Determinar las características fisicoquímicas (rendimiento, humedad, cenizas, pH, densidad aparente, carbono fijo y material volátil) del carbón activado.
- Determinar la capacidad de adsorción del carbón activado.

CAPÍTULO II

Revisión de la Literatura

2.1. La alpaca

La alpaca (*Vicugna pacos*) es uno de los camélidos nativos de América del Sur (Figura 3), su hábitat natural se encuentra en la zona altoandina de Bolivia, Perú, Argentina y Chile donde se crían para utilizar primariamente su fibra y carne, tiene un cuerpo delgado con almohadillas planares que le dan su estatus ecológico al no dañar el pasto ni provocar erosión en el suelo (Novoa, 1991).

Figura 3

Alpaca (Vicugna pacos, L.)



Fuente: Notnoisy (2006)

2.1.1. Características generales

El sistema tradicional de producción de estos animales es extensivo y poco especializado, siendo este sistema el más conocido y comúnmente llevado a cabo por las comunidades agrícolas (Aréstegui, 2005). Las alpacas se crían sobre la base de la vegetación

de pastizales nativos en situación de pobreza y zonas altas superiores a los 3800 msnm., zonas caracterizadas por condiciones geográficas difíciles, climas cambiantes, dispersión de casas y falta de caminos, así como comunicación y servicios deficientes (Neely, et al., 2001).

En rebaños formados por machos y hembras, los machos intentan establecer un dominio sobre las hembras, demostrando el comportamiento típico de polígamia territorial de la alpaca (Fernández et al., 1972). Esta especie, tiene un período de gestación de 342 a 345 días y el peso de las crías al nacer varía entre 6 y 7 kilogramos (Novoa, 1991).

Respecto a su alimentación, la alpaca selecciona las partes de la planta más suculentas, dando preferencia a las herbáceas, y en la época seca, el consumo de pasto corto constituye del 29 al 38% de su dieta y el de herbáceas el 35% (San Martín, 1991).

Con relación a la cría de alpacas, los índices técnicos en el Perú son: 45% tasa de natalidad, 30% de mortalidad de la descendencia, 10% de mortalidad de adultos, 12% de peso adulto anual de 50-70 kg, 54% de rendimiento en canal y 1,6% de peso de vellón (CNCSP, 2005).

La mortalidad anual de crías puede alcanzar el 70% en los primeros meses de vida y la mayoría de estas muertes están asociadas con brotes de enterotoxemia causados por *Clostridium perfringens* tipo A, estos brotes están asociados al uso de corrales sucios durante la temporada de lluvias, que coincide con la aparición de la especie (Ramírez, 1991).

2.1.2. Fenotipos

Se encuentra animales de dos razas en los rebaños, la Huacaya y la Suri, que difieren significativamente en sus características fenotípicas; la raza Huacaya, se caracteriza por tener un vellón compacto y esponjoso similar al vellón de la oveja, lo que le da un aspecto más voluminoso con fibras finas, suaves y onduladas; en cuanto a la raza Suri tiene fibras largas dispuestas en rizos caídos, similares a los rizos de la oveja Lincoln, lo que le da al animal un aspecto anguloso (Antonini, 2004).

2.1.3. Distribución

La alpaca fue domesticada hace 6000 años en la sierra central del Perú (Wheeler, 1991). Su crianza tuvo lugar hace unos 3800 años en los valles entre los andes, según los sitios arqueológicos de Kotosh, Huánuco y Cajamarca (Ala, 1972).

La crianza de alpacas en Perú se da principalmente en los departamentos de Puno (39,75%), Cuzco (14,42%), Arequipa (13,3%) y Huancavelica (8,42%), aportando entre 50 y 100 cabezas por rebaño (INEI, 2014).

2.2. Carbón activado

2.2.1. Estructura y propiedades

El carbón activado visto desde un punto de vista estructural puede usarse como un material carbonoso poroso, elaborado a partir de materiales basados en carbón, para aumentar la porosidad se agrega gas o productos químicos durante y después de la carbonización, esta disposición aleatoria de las capas y el entrelazamiento entre ellas evita que la estructura se disponga para producir grafito, es así como esta característica del carbón activado contribuye a su porosidad, la compleja estructura porosa interna también se puede utilizar para el proceso de adsorción, por ello la superficie del carbono es no polar, por lo que se forman absorbentes no polares, como sustancias orgánicas, es por esta razón que la adsorción es un fenómeno de superficie en el que el absorbente permanece en la superficie del carbono debido a las fuerzas de Van Der Waals (Reinoso, 2005).

2.2.2. Tipos de poros de una partícula de carbón

El carbón activado tiene una gran cantidad de poros, que se pueden dividir en poros de adsorción y poros de transmisión según su función; el primero consiste en el espacio entre las placas de grafito, cuya distancia es de 1 a 5 veces el diámetro de la molécula a retener, en estos casos, las dos placas de carbono están lo suficientemente cerca para ejercer una fuerza de atracción sobre el adsorbato y retenerlo con mayor fuerza (Groso, 1997).

Los poros más grandes que los poros de adsorción son los poros de transporte y tienen un rango de tamaño muy grande, que se extiende hasta las grietas que se encuentran en los bordes visualmente identificables, equivalente a 0,1 mm; para este tipo de poro, solo

una placa ejerce una fuerza de atracción sobre el objeto adsorbido, por lo que se utiliza una pequeña fuerza para completar la fuerza de adsorción, que es incluso insuficiente para mantenerla, así mismo, otra clasificación de poros es la IUPAC basada en su diámetro, como se muestra a continuación (Figura 4).

- Microporos: menores a 2 nm.
- Mesoporos: entre 2 y 50 nm.
- Macroporos: mayores de 50 nm.

El tamaño de los microporos puede retener moléculas pequeñas, que corresponden aproximadamente a compuestos que son más volátiles que el agua, como olores, sabores y muchos disolventes (Groso, 1997).

Por lo tanto, la capacidad del carbón activado para retener una sustancia depende no solo de su superficie, sino también de la proporción de poros del tamaño apropiado: de 1 a 5 veces el diámetro molecular de la sustancia (Sotelo & Martínez, 2004).

Figura 4

Clasificación de poros del carbón activado



Fuente: Carbotecnia (2010)

2.2.3. Clases de carbón activado

2.2.3.1. Carbón activado granular. Salas y Garrido (2007) definen el carbón activado granular como un carbón amorfo producido al calentar madera u otros materiales orgánicos en ausencia de aire con estructura microporosa, lo que permite la adsorción de moléculas orgánicas en forma gaseosa y líquida, es así como en el proceso de tratamiento del agua, se utiliza para eliminar la materia orgánica disuelta que produce olor y color. El carbón activado granular tiene posteriores procesos físicos y químicos: lavado con vapor sobrecalentado para extraer compuestos solubles, lavado con solvente para remover grasa y lavado ácido para disolver metales y otros elementos insolubles como metales pesados, hierro y calcio, que se recalienta en ausencia de oxígeno para eliminar los residuos de detergente volátil que quedan en los orificios; por lo general, podemos encontrar en el mercado, granulados de carbón activado de diferentes marcas, aunque todos proceden de los principales fabricantes de carbón activado, los cuales venden principalmente a la industria química y a las relacionadas al agua potable, aunque básicamente, hay dos tipos de carbón activado granular: lignito, que es una fibra sintética sintetizada a partir de sustancias bituminosas, y coco, que está hecho de madera de coco, por otro lado, la forma del carbón activado granular debe ser, lo suficientemente grande como para dificultar la salida del filtro, por ello, el tamaño correcto, es de al menos 4 mm de diámetro, adoptando la forma de tapones cilíndricos de polvo de carbón moldeado por compresión, otras formas son irregulares porque son el resultado de procesos de trituración y tamizado necesarios para diversos fines (Groso, 1997).

2.2.3.2. Carbón activado pulverizado. Rodríguez (2006) indica que el carbón activado en polvo debe poseer un tamaño de partícula en el rango de 140 a 200 mallas ASTM, el tamaño no debe ser demasiado pequeño para no interferir con otras etapas del proceso por ello deben ser muy porosos y relativamente blandos con poros dilatados de modo que el carbón pulverizado de alta calidad se puede utilizar como agente decolorante porque carece de una estructura definida, especialmente cuando se utilizan en fase líquida.

2.2.4. Procesos de Activación

Clarimex (2000) señala que existen básicamente dos tipos de procesos para producir carbón activado: activación física (también llamada activación térmica) y activación química.

2.2.4.1. Activación física. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO, (1983)] señaló que la activación física del carbón vegetal se suele dividir en dos etapas:

- Durante la carbonización, el material lignocelulósico se calienta a una temperatura por debajo de 600 ° C en ausencia de aire para eliminar los productos volátiles, formando así una estructura que contiene carbono con una estructura sustancialmente porosa.
- El proceso de activación incluye el tratamiento con gas oxidante, la gasificación controlada del carbón en una atmósfera oxidante como dióxido de carbono, vapor de agua u oxígeno. Por ende, se eliminan selectivamente más átomos reactivos de la estructura carbonosa, aumentando así el volumen de poros y el área superficial específica, ambos procesos se suelen realizar a una temperatura de 600 a 900°C.

2.2.4.2. Activación química. El segundo método es la activación química, que consiste en proporcionar un activador para el material que contiene carbono y luego realizar un tratamiento térmico de 400 a 800°C en una atmósfera inerte para crear poros, generalmente los reactivos más utilizados son: cloruro de zinc ($ZnCl_2$), hidróxido de potasio (KOH), ácido fosfórico (H_3PO_4) y sulfuro de potasio (Clarimex, 2000).

Un procedimiento típico implica mezclar varias partes de solución concentrada de zinc con una parte de material carbonoso, calentar la mezcla durante varias horas en un horno rotatorio a 600-700 ° C sin aire y luego lavar el producto para eliminar el zinc para utilizarlo nuevamente, mientras tanto, el otro método consiste en saturar la materia prima con ácido fosfórico concentrado y calentarla a 500 ° C durante varias horas (Clarimex, 2000).

En estos dos procesos, la superficie específica del carbón activado obtenido depende de la pérdida de peso del material en la etapa de activación, y suele alcanzar el máximo cuando la pérdida de peso se sitúa entre el 30% y el 70% (Clarimex, 2000).

En comparación con la activación química, la principal desventaja de la activación física es un menor rendimiento, ya que generalmente se lleva a cabo a una temperatura más alta; no obstante, la principal desventaja de la activación química es la necesidad de proceso de tratamiento térmico y la agresividad de los reactivos químicos utilizados, lo que limita su aplicación industrial desde un punto de vista ambiental (Gonzales, 2013), por otra parte el carbón activado de alta calidad para la venta debe contener significativamente menos del 1% de impurezas solubles (Clarimex, 2000).

2.2.5. Propiedades fisicoquímicas

2.2.5.1. Capacidad de adsorción. La capacidad de adsorción puede expresarse como el número de mililitros o miligramos de la solución estándar de azul de metileno que puede decolorarse por completo, de acuerdo con el tipo de carbono, las diferentes materias primas y procesos, el grado de adsorción es diferente para todos (Molina & Reinoso, 2004).

Según el Manual de carbón activo (2010), a continuación, se mencionan los factores que afectan la adsorción de compuestos por el carbón activado en el agua.

- El tipo de conexión que desea eliminar, los compuestos de alto peso molecular con baja solubilidad son más fáciles de absorber.
- La concentración del compuesto que se va a eliminar infiere que, a mayor concentración, más carbono se requiere.
- Presencia de otros compuestos orgánicos que compiten con otros compuestos por los sitios de adsorción disponibles.
- El pH del agua, dado que, los compuestos ácidos son más fáciles de eliminar a pH bajo.

2.2.5.2. Densidad aparente. Definido como el peso de carbón activado por unidad de volumen (bajo ciertas condiciones), la densidad aparente del carbón activado debe tener en cuenta, que al seleccionar el carbón activado la alta densidad puede ser ventajosa, por lo que habrá más gramos de carbón vegetal en un espacio más pequeño, lo que facilita el almacenamiento del filtro (Molina & Reinoso, 2004).

2.2.5.3. Humedad. El contenido de humedad no afecta la capacidad de adsorción, pero el carbón activado almacenado en condiciones húmedas puede absorber del 25% al 30% de la humedad en un plazo de 3 a 6 meses, de manera que a medida que disminuye el tamaño de las partículas de carbono, aumenta la humedad de la superficie, es por tal motivo que se recomienda utilizar carbón activado con una humedad máxima del 8% (Hovanec, Spotte, Adams, 1998).

2.2.5.4. Cenizas. Son el residuo que queda tras la calcinación a una temperatura de 650 ° C., hasta que se alcanza un peso constante y se expresa en porcentaje en base seca de modo que la cantidad y composición de estos pueden afectar la adsorción y ciertas propiedades del carbón activado, que a su vez, puede reducir mediante el decapado, que se lleva a cabo durante el proceso de su influencia; un ejemplo es el carbón activado granular, que se utiliza para recuperar disolventes del aire, de ahí que el contenido de cenizas determina la temperatura de ignición, los valores de potasio y otros óxidos metálicos, los valores de chispa y la ignición del lecho de sensación saturada, mientras que, en el tratamiento del agua, la obstrucción del acceso a la ceniza es simplemente la cantidad y la condición de comportamiento a la que corresponde la pérdida de esta (Hovanec, Spotte, Adams, 1998).

2.2.5.5. pH. Los que son solubles en agua pueden ser ácidos o alcalinos, en caso de que el carbón sea activado por el ácido fosfórico, el producto durante el proceso de producción contiene fosfato en cuanto este se disuelve en agua, el fosfato se volverá ácido de esta manera disminuyendo el pH, mientras que el carbón activado de cáscara de coco se activa con vapor, y no necesita agentes químicos, sus formas de sodio y potasio son óxidos derivados de la misma materia prima por esta razón se disuelven en agua, forman hidróxidos que aumentan el pH (Bansal R et al., 1990).

Si el pH del extracto de agua es el mismo que el pH del agua a tratar, este último no cambia, por el contrario, si es diferente, solo cambia el pH del pretratamiento; en algunas aplicaciones, sin embargo, esta desviación no es aceptable, siendo así que, algunos fabricantes ofrecen carbones con valores de pH similares al líquido a tratar; de lo contrario, el usuario puede agregar un ácido o alcalino e inundar el carbón activado granular con agua hasta que se alcance el pH requerido, o puede lavar el carbón hasta que se eliminen los solubles que alteran el pH, por ende, este último método puede requerir grandes cantidades de agua (Molina & Reinoso, 2004).

2.2.5.6. Materia volátil. Las sustancias volátiles son compuestos no deseados en el carbón activado porque afecta su estructura interna y hace que disminuya su capacidad de adsorción (Zamora, 2010). De manera que, cuando se usa una concentración más alta de reactivos químicos en la activación, las sustancias volátiles en el carbón activado no disminuirán (Shangai, 2010).

2.2.5.7. Carbón fijo. El valor de carbono fijo está directamente relacionado con la capacidad de adsorción, por lo que se espera que cuanto mayor sea el porcentaje de carbono fijo, mayor será la capacidad de adsorción que se obtenga, por esta razón no es nada económico operar bajo la alta concentración de activador (Coronado Martínez, 2016).

2.2.6. Aplicaciones del carbón activo

Sus aplicaciones en medios líquidos incluye la decoloración de líquidos que contienen azúcar, purificación de agua (eliminación de olores, colores, productos químicos, bacterias, tratamiento de aguas residuales, decoloración del agua utilizada en la producción de

refrescos, decoloración y mejora de bebidas alcohólicas (licor, vino caliente), purificación de aceites comestibles, limpieza de proteínas (como fármaco detox), limpieza de plasma, separación de elementos metálicos (oro y plata) (Solum, 1995). En medio gaseoso, se utiliza para almacenar y separar gas en máscaras de gas, prevenir materiales radiactivos en plantas de energía nuclear y desodorizar alimentos, actualmente, tiene una amplia gama de aplicaciones y se puede utilizar como transportador catalítico y catalizador (Solum, 1995).

Entre otras aplicaciones, se puede mencionar habitualmente el uso en filtros de cigarrillos y forros de zapatos, generalmente el carbón en polvo se usa en medios líquidos, mientras que los gránulos se pueden usar en ambos medios (Reinoso, 2005).

2.4. Antecedentes de la Investigación

2.4.1. Antecedentes Internacionales

Rojas (2013) afirmó sobre la optimización de las condiciones de pirólisis y propiedades de adsorción de carbón óseo para la eliminación de fluoruro del agua, que la temperatura de pirólisis debe ser superior a 700° C para sintetizar el carbón óseo, debido a que esto provoca la deshidroxilación de la hidroxiapatita del hueso, el cual va reduciendo la capacidad de adsorción de fluoruro, cuya capacidad máxima de adsorción obtenida fue de 7.32 mg/g. Esto indica que la optimización de condiciones de pirólisis de carbón óseo es útil para obtener un adsorbente eficaz.

Smičiklas (2010) realizó una investigación para carbonizar y reportó como resultado que la adsorción de cobalto empleando carbón de huesos en el proceso de carbonización se planteó un rango de temperaturas entre 400°C y 1000°C en presencia de aire, cuyos resultados obtenidos varían entre 4 y 30 mg/g en la capacidad de absorción.

Hyder (2016) desarrolló un estudio en la adsorción de cromo hexavalente en solución acuosa empleando carbón de huesos, los resultados indicaron que el adsorbente empleado es efectivo en remoción de cromo hexavalente (Cr6), con capacidades de adsorción son muy cercanas a 5.0 mg/g.

Cazetta (2014) informó en su investigación sobre la optimización de carbón activado a partir de huesos bovino que las condiciones óptimas encontradas fueron; temperatura de

450°C con un tiempo de flujo de N a 110 min, de 100 cm³ g⁻¹ lo que resulta con un área de superficie de 128 m² g⁻¹, el volumen de mesoporo fue de 0.331 cm³ g con un diámetro de 10.32 nm, los análisis indicaron que la estructura cristalina de hidroxiapatita en los materiales mostraron un cambio significativo en comparación con hueso de bovino.

Rojas Mayorga, Silvestre Albero, Aguayo Villarreal, Mendoza Castillo, & Bonilla Petriciolet (2015) realizaron un estudio sobre la nueva ruta de síntesis de características óseas utilizando una atmósfera de CO₂ y comportamiento como adsorbente para la eliminación de flúor; consideraron diferentes condiciones de carbonización, siendo así que, los resultados experimentales muestran que la naturaleza de la atmósfera de gas y temperatura en el proceso de la carbonización juegan un papel importante para lograr un carbón efectivo, las mejores muestras sintetizadas a 700°C bajo atmósfera de CO, causa la deshidroxilación de la hidroxiapatita.

Hassan, Awwad, & Aboterika (2008) mencionaron que el carbón de huesos de camello se usa como adsorbente para la eliminación de Hg (II) de afluentes de aguas residuales; la capacidad de absorción fue de 28,24 mg de Hg (II)/g de adsorbente, las condiciones óptimas de eliminación son pH 2, tiempo de contacto 30 min y temperatura 25°C, en comparación con diferentes adsorbentes, el carbón de huesos de camellos claramente se observó su notable eficacia.

Según Moreno Piraján, Gómez Cruz, García Cuello, & Giraldo (2010) informaron que mediante el proceso de pirólisis se obtuvo carbón activado a partir de huesos de vaca, para soluciones monocomponentes de iones metálicos, se investigó el equilibrio de absorción para soluciones de iones metálicos monocomponentes, uno de estos adsorbentes se obtuvo en una atmósfera inerte y el otro con presencia de oxígeno, teniendo en cuenta que las propiedades pueden influir en la capacidad de absorción. En definitiva, el estudio enfatiza la capacidad de adsorción entre esos iones metálicos y se observa una disminución en las capacidades de adsorción, cuyo valor está relacionado con la cinética de adsorción de los iones metálicos.

Hyder, Begum, & Egiebor (2015), en el estudio de isoterma de adsorción y estudios cinéticos de la eliminación de cromo hexavalente de una solución acuosa en pruebas discontinuas, demostraron que las concentraciones iniciales variaron entre 5 y 800 mg/l, y que se eliminó a un pH inicial de 1.0 de la concentración inicial de Cr (VI) de mg/l utilizando 2 g de carbón. La capacidad de adsorción máxima fue de 4.8 mg/g para una concentración inicial de Cr (VI) de 800 mg/l, la isoterma de adsorción siguió el modelo de Langmuir, los resultados demostraron al carbón activado como un eficaz absorbente para la eliminación de Cr (VI) de una solución acuosa.

Shahid, Kim, & Choi (2019) mencionaron que el carbón óseo se obtuvo mediante el proceso de la pirólisis térmica de los huesos de ganado, el cual fue expuesto a diferentes temperaturas que oscilan entre los 350°C y 700 °C, y se seleccionó el carbono óseo sintetizado a los 350 °C, para el análisis se empleó el FTIR, donde también significó espectros en longitud de onda, los análisis fueron observados con un examen morfológico con SEM, mostrando el volumen total de poros y el diámetro promedio de poros, se encontraron $79.34 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$, $0.041 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ y 2.09 nm ., finalmente se reveló una relación entre Ca/P de 1.71 aproximadamente 10.56 mg de fluoruro se adsorbieron en 1 g de BC. Concluyendo que el carbón óseo se sintetiza con éxito y se logró la mayor capacidad de adsorción de fluoruro en comparación con estudios anteriores.”

Piccirillo (2017) afirmó que se obtuvo carbón a partir de huesos de pescado de bacalao, en este estudio se evaluó la adsorción de contaminantes orgánicos persistentes y metales pesados (Pb (II)), por tal razón, se pirolizó las muestras a distintas temperaturas (200 - 1000 °C), como resultado se obtuvieron resultados significativos en las características y composiciones de los materiales, hasta los 800 °C, el apatito de carbonato $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{CO}_3)$ fue el componente principal, mientras que, para las temperaturas más altas, oxyapatite $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{O}$ esta fue la fase dominante, de manera que, de acuerdo con las condiciones de pirólisis, se pueden obtener polvos eficaces para la eliminación de metales orgánicos o pesados, así mismo cabe mencionar que, con la pirólisis a temperaturas

intermedias, se pueden producir materiales capaces de adsorber ambos tipos de contaminantes, aunque sean menos eficientes.

2.4.2. Antecedentes nacionales

En un estudio preliminar de carbón activado; situación en el Perú, de Gonzales & Teruya (2004) indicaron que el carbón granular, en fase líquida o en polvo con una superficie específica de hasta 1000m²/g; obtenidas a partir de huesos, madera, turba, lignito, residuos de papel pueden ser utilizados para la decoloración y refinación de azúcar, purificación de agua, clarificador de disolventes.

Talledo (2013) indicó que existen diferentes métodos para la obtención de carbón activado, en la investigación que realizó utilizó como materia prima huesos de aceituna de la empresa Montefiori, al carbonizado se determinaron las propiedades de humedad, cenizas y absorción del carbón activo por el número de Yodo concluyendo que el producto obtenido tiene una rentabilidad aceptable.

2.4.3. Antecedente local

Barrantes (2017) realizó una investigación cuyo objetivo fue determinar la cinética de adsorción del Mn 2⁺ de las aguas residuales de la mina Lunar de Oro, mediante el uso de residuos orgánicos generados de las actividades acuícolas. Para la adsorción se trabajó con carbón activado de huesos de trucha, estos fueron obtenidos por el método de activación ácida (ácido sulfúrico 3%) utilizando diferentes dosis de agente activante, tiempos de pirólisis y una agitación de 23 min a 200 rpm. Se obtuvo como mejor muestra con pH 5.55 con una dosis de 1.6 gramos. El modelo cinético al que más se ajustó fue al de pseudo segundo orden con un factor de correlación de $r^2 = 0.9984$, con una constante de velocidad de adsorción máxima de 1.8169 min⁻¹.

CAPÍTULO III

Materiales y Métodos

3.1. Diseño de investigación

La investigación es de tipo experimental con un DCA con dos factores.

a) Número de tratamientos es: $3 \times 2 = 6$

- **Factor A:** Sustancia activante (H_3PO_4 , NaOH, Testigo)

- **Factor B:** Tiempo (60 y 75 min). Con temperatura de pirólisis de $750^\circ C$.

b) Número de unidades experimentales: $3 \times 6 = 18$

- **Repeticiones:** Se tendrá 3 repeticiones por tratamiento.

- **Número de tratamientos:** $3 \times 2 = 6$

Cada unidad experimental estará constituida por 20 gr de muestra de huesos de Alpaca, serán sometidos al proceso de activación y pirolización según los tratamientos que a continuación indica la tabla 1.

Tabla 1

Diseño experimental de la investigación

Sustancia activante (A)	Tiempo de pirolización (B)					
	60 min			75 min		
H_3PO_4	A-60-1	A-60-2	A-60-3	A-75-1	A-75-2	A-75-3
NaOH	A-60-2	A-60-3	A-60-4	A-75-2	A-75-3	A-75-4
Testigo	A-60-3	A-60-4	A-60-5	A-75-3	A-75-4	A-75-5

Variable respuesta: Son las características fisicoquímicas (rendimiento, humedad, cenizas, pH, densidad aparente, material volátil, carbono fijo, adsorción) que se medirán en el carbón activado.

El análisis de los datos consistió en evaluar los supuestos del modelo, análisis de varianza y comparaciones múltiples de promedios (Duncan o Tukey) para cada una de las respuestas variables respuesta.

3.2. Área de trabajo

El proceso para obtener carbón activado y las pruebas de ensayo se realizaron en las instalaciones de "RHLAB S.A.C.", la cual se encuentra en la ciudad de Juliaca - Puno.

3.3. Materiales, equipos e insumos

Los materiales, equipos e insumos utilizados en la obtención del carbón, activación del carbón y la determinación de las propiedades fisicoquímicos del carbón activado se describen a continuación (tabla 2, 3 y 4).

Tabla 2

Material biológico utilizado en la investigación

Material biológico	Cantidad	Unidad
Hueso de Alpaca	2	kg

Tabla 3

Insumos utilizados en la investigación

Insumos	Cantidad	Unidad
Hidróxido de sodio (97%).	40	cm ³
Ácido fosfórico (86%).	40	cm ³
Agua destilada.	5	litro
Solución cianurada con una concentración de 21.33 mg/l de oro	50	ml

Tabla 4*Materiales y equipos utilizados en la investigación*

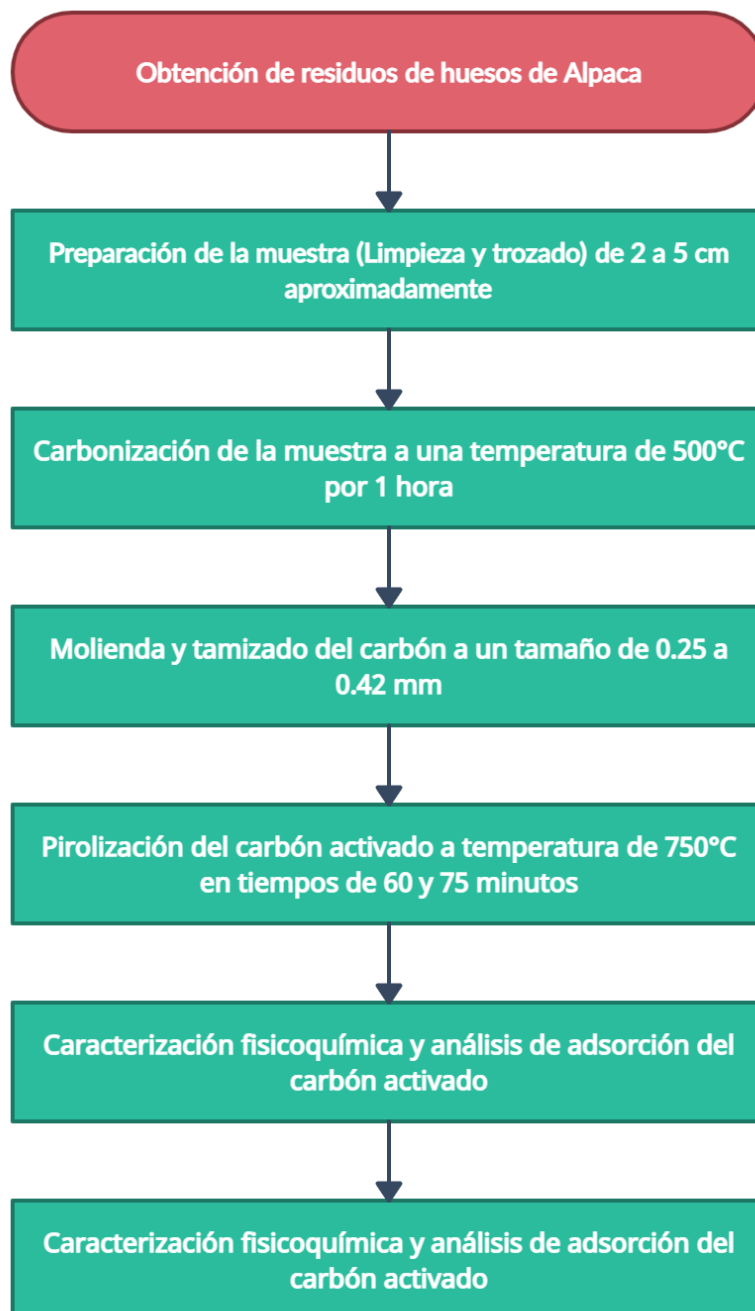
Materiales y equipos	Cantidad	Unidad
Comba de 8 lbr	1	Und
Papel filtro	32	Und
Bolsa ziploc	40	Und
Bandeja de aluminio	4	Und
Horno de 1200°C	1	Und
Balanza marca BOECO	1	Und
Mortero de porcelana	1	Und
Fiola de 100 ml	10	Und
Vaso precipitado de 250 ml	4	Und
Bagueta de vidrio	2	Und
Embudo de vidrio	10	Und
Crisol de porcelana de 50 ml	18	Und
Blanaza analítica marca BOECO	1	Und
Agitador marca LABTRON	1	Und
Tamiz ASTM N°40 Y 60	2	Und
Horno industrial marca Rational	1	Und
Estufa Samsung	1	Und
Espectofotómetro marca Aanalyst 100	1	Und
Termómetro digital BOECO	1	Und

3.4. Procedimiento

El procedimiento de la investigación se realizó de la siguiente manera como muestra la figura 5.

Figura 5

Diagrama de flujo del proceso para la obtención de carbón activado a partir de huesos de Alpaca



3.4.1. Obtención del Carbón de Huesos de Alpaca

Según el procedimiento de Murillo et al., (2012), se recolectó 5 kg de huesos de alpaca, luego se lavó y limpió respectivamente (figura 6A), se trituró en pedazos pequeños de 2 – 5 cm (figura 6B). Se carbonizó a 500° C, para eliminar restos de carne y grasa (Deydier et al., 2005). La temperatura permaneció constante durante 1 h. Las muestras pre carbonizadas se enfriaron bajo temperatura ambiente.

Figura 6

A. Limpieza de los huesos de alpaca; B. Trituración de los huesos de alpaca



3.4.2. Activación del Carbón

El carbón se tamizó en tamaños de 0.25 a 0.42 mm., y se dividió en tres partes. La primera muestra se impregnó con NaOH 97% (97%), la segunda con H₃PO₄ 86%(86%) y el último no tuvo la impregnación de ningún reactivo químico.

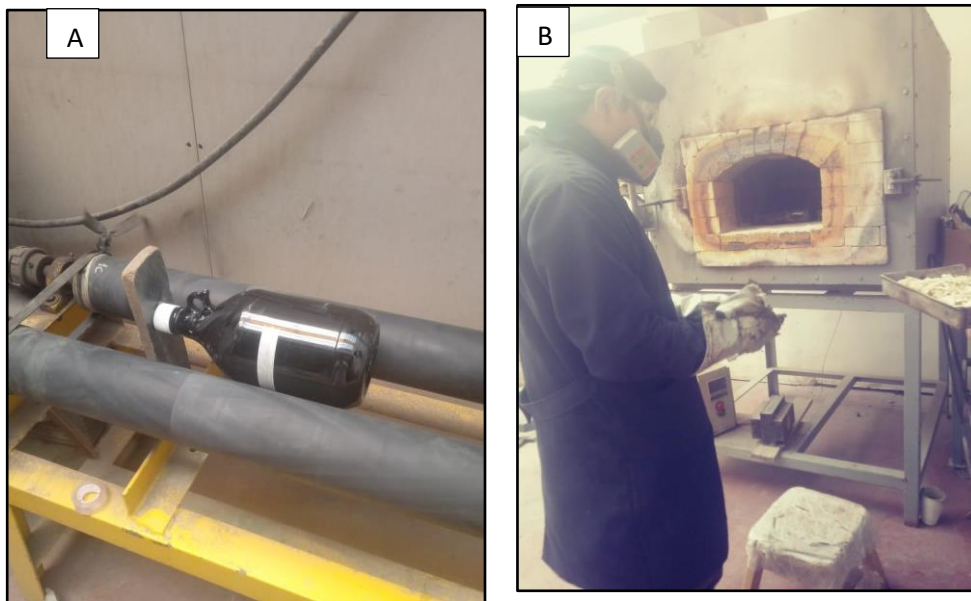
Se impregnó con una relación de 2 g de carbón con 40 cm³ de solución que contenía 1 mol / L de NaOH 97% y H₃PO₄ 86%. Esta relación fué considerada dentro del rango normal en la activación química de otros materiales de bajo costo (Lillo Ródenas et al., 2003). Las soluciones se colocaron en recipientes de 50 ml y se agitó a 115 rpm., a temperatura ambiente por 24 horas, para garantizar el acceso del agente activador al interior de las partículas (figura

7^a). Se realizó la filtración de las muestras, se trasladó a un horno y se realizó el secado a 80 ° C por 24 horas.

Finalmente se pirolizó a 750°C en tiempos de 60 y 75 minutos (figura 7B) y se realizó el lavado con agua destilada. El total de las muestras se sometió al secado en una estufa a 105°C por 24 horas.

Figura 7

A. *Agitación del carbón activado*; B. *Pirolización de la muestra*



3.4.3. *Caracterización del carbón activado*

Para la caracterización del carbón activado se realizó las pruebas fisicoquímicas siguiendo las normas técnicas estipuladas para cada parámetro según la tabla 5.

Tabla 5*Parámetros fisicoquímicos para la caracterización del carbón activado*

Parámetro	Unidad de medida	Norma	Método
Rendimiento	%	Según Zamora (2010)	Según fórmula: $Rca (\%) = \frac{\text{masa del carbón activado (g)} \times 100}{\text{masa del carbón (g)}}$
Humedad	%	Norma ASTM D 2867	Método de secado en horno
Cenizas	%	Norma ASTM D 2866	Método de prueba estándar para el contenido total de cenizas de carbón activado
pH	-	Norma ASTM 3838-05	Método de prueba estándar para pH del carbón activado
Densidad aparente	g/cm ³	Norma ASTM 2854	Método de prueba estándar para la densidad aparente del carbón activado
Material volátil	%	Norma ASTM D 5832	Método de prueba estándar para el contenido de materia volátil
Carbono fijo	%	Según Sánchez (2018)	Según la fórmula: $\text{Carbono fijo } (\%) = 100 - (\% \text{ cenizas} + \% \text{ material volátil})$
Adsorción	%	-	Método por espectroscopía de adsorción atómica

a. Análisis de rendimiento

Se determinó el rendimiento según lo señalado por Valdivieso, 2012; Zamora (2010).

Se añadió 20 gramos del carbón en un crisol y se pesó el crisol. Después de la activación química y pirolización se realizó el pesado del crisol.

Para el porcentaje de rendimiento se empleó la ecuación 1 según (Valdivieso, 2012; Zamora, 2010).

$$Y(\%) = (M_{CA} \times M_p) \times 100 \quad (1)$$

Donde:

M_{CA} : Masa del carbón activado (g)

M_p : Masa del carbón (g)

b. Humedad

Se determinó la humedad según las especificaciones de la Norma ASTM D – 2867 citado por Carbajal (2012).

Se pesó el crisol en una balanza analítica. Asimismo, se pesó un gramo de carbón activado. Seguidamente, se colocó el crisol sin tapa en la estufa a 105 ° C. por dos horas, se retiró y se colocó en un desecador por una hora y finalmente se pesó.

El porcentaje de humedad se determinó bajo el control de la ecuación 2. Según Carbajal (2012).

$$\text{Humedad (\%)} = [(A - B)/A]x100 \quad (2)$$

Donde:

A: Peso inicial del carbón activado (g)

B: Peso seco del carbón activado (g)

c. Cenizas

Se encendió el horno a una temperatura de 750 ° C., cuando alcanzó la temperatura indicada, se colocó los crisoles. Cada crisol fué pesado previamente con un contenido de 1 gramo de carbón activado. Luego de 6 horas, se retiró el crisol, se colocó en el desecador por una hora y se pesó el crisol.

El porcentaje de cenizas se determinó de acuerdo con la norma ASTM D - 2866

$$\text{Cenizas (\%)} = (A/B)x100 \quad (3)$$

Donde:

A: Peso inicial (g)

B: Peso final (g)

d. pH

Se calculó el pH según la norma ASTM 3838 - 05

Se pesó 1 g de carbón activado, se colocó en un vaso precipitado de 250 ml. Se agregó y mezcló con 100 ml de agua destilada. Luego se colocó el vaso en baño María a 80°C por dos minutos. Se filtró con papel filtro rápido. Finalmente se esperó a que el agua destilada se enfríe para luego medir el pH.

e. Densidad aparente

Se determinó según la Norma ASTM D 2854.

Se pesó una probeta graduada de 10 ml., y se llenó con cinco gramos de carbón activado. Se golpeó lentamente hasta obtener un volumen constante. Finalmente se pesó para la determinación de la densidad.

f. Materia volátil

Se determinó el contenido de materia volátil según la norma ASTM D – 5832.

Se procedió al tareo del crisol, se pesó y colocó 5 g de carbón. El crisol tapado se llevó a la mufla a 950°C por 7 minutos, transcurrido ese tiempo se llevó rápidamente a un desecador. Se calculó la diferencia de peso inicial y el peso final (ecuación 4). Según la norma ASTM D – 5832.

$$\text{Peso perdido (\%)} = [(A - B)/A] \times 100 \quad (4)$$

Donde:

A: Peso seco de la muestra inicial (g)

B: Peso de la muestra luego de calcinar (g)

$$\text{Contenido de material volátil, (\%)} = C - D \quad (5)$$

Donde:

C = Peso perdido (%)

D = Humedad (%)

g. Carbono fijo

Se calculó con la ecuación 6 según Sánchez (2018).

$$\% \text{ Carbono Fijo} = 100 - (\% \text{ contenido de cenizas} + \% \text{ materia volátil}) \quad (6)$$

h. Capacidad de adsorción

- Se pesó 5 g de carbón activado y se agregó 50 ml de solución cianurada con concentración de Au (21.33 mg/L)
- Se llevó al agitador (115 rpm) por un tiempo de 24 horas
- Se preparó el espectrofotómetro y se midió la absorbancia de cada muestra.

Se utilizó la ecuación 7 para la determinación de la capacidad del porcentaje de adsorción (como se cito en Lazo, 2015).

$$\text{Adsorción (\%)} = (B-A) / B * 100 \quad (7)$$

Donde:

A: Concentración inicial

B: Concentración final

CAPÍTULO VI

Resultados y Discusiones

4.1. Obtención del Carbón de Huesos de Alpaca

Se logró obtener el carbón de huesos de alpaca a una temperatura de 500°C aproximado por una hora en un horno industrial de fundición con una capacidad de 1200°C. Se carbonizó 2.65 kg de huesos, obteniendo 1.79 kg de carbón (Figura 8).

Figura 8

Obtención y pesado del carbón de huesos de alpaca



Actualmente no existen estudios relacionados con la obtención de carbón de huesos de alpaca, por ellos no se tiene antecedentes para poder contrastar en el presente estudio; sin embargo; existen investigaciones realizadas con la obtención de otros huesos de origen animal. En el estudio realizado por Cruz Briano et al. (2017) , se realizó un carbonizado a partir de huesos de origen animal a una temperatura de 500°C, se obtuvo un carbón activo capaz de remover fluoruro en soluciones acuosas. Por otra parte Ramos & Cano (2015)

obtuvieron un carbón a partir de huesos de residuos de huesos de animales cuyos resultados indican ser una excelente alternativa para eliminar fluoruro presente en soluciones acuosas.

4.2. Activación química y por pirólisis el carbón de huesos de alpaca

El carbón se logró activar con ácido fosfórico con una concentración de 86% e hidróxido de sodio con pureza de laboratorio de 97% a una velocidad de agitación de 115 rpm., durante 24 horas y a una temperatura de pirólisis de 750°C. por 1 hora en un horno industrial de fundición con una capacidad de 1200°C (Figura 9).

Figura 9

Carbón de huesos de alpaca activadas químicamente



En un estudio realizado por Avalos (2018) se determinó que, el carbón activado de cáscaras de pecanas activadas con ácido fosfórico a una concentración del 40% y un tiempo de agitación de 12 horas, presentó mejores ventajas para la activación. A comparación con la investigación de Cardenas (2015) donde empleó ácido fosfórico a una concentración de 85% se obtuvo un carbón activo deficiente. Asimismo, según Deydier et al. (2005) el carbón de huesos activado con hidróxido de sodio presentó mejores características que el carbón activado con sustancias ácidas. Esta diferencia de resultados podría deberse al material carbón y la concentración del agente activante.

4.3. Propiedades fisicoquímicas del carbón activado

Luego de obtener las muestras se realizó la determinación de los parámetros fisicoquímicos. Los resultados promedio de las evaluaciones se muestran en la tabla 6.

Tabla 6

Resultados de la evaluación de los parámetros fisicoquímicos

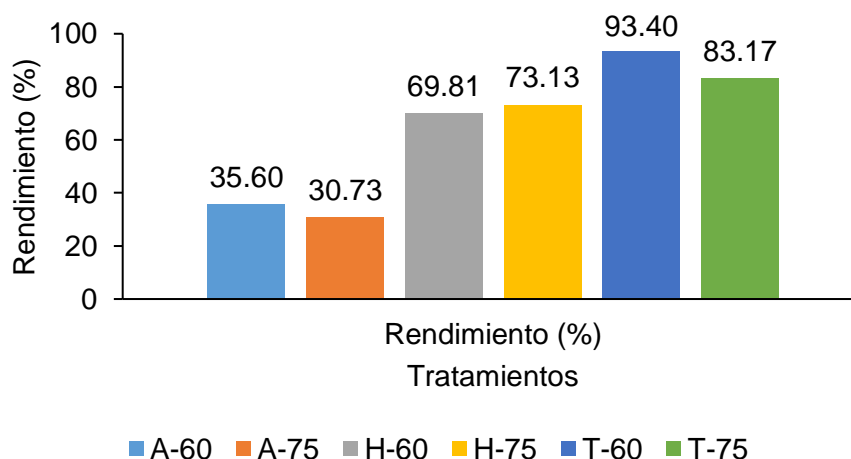
Muestra	Rendimiento (%)	H (%)	CZ (%)	pH	Dap (g/cm ³)	MV (%)	CF (%)	Ads (%)
A-60-1	35.6	1.36	30.27	6.9	0.74	37.64	32.09	32.64
A-75-2	30.73	1.15	25.23	6.8	0.73	32.85	43.92	89.41
H-60-1	69.81	1.62	30.74	10.4	0.98	51.04	18.25	14.12
H-75-2	73.13	1.43	29.36	10.4	0.95	50.41	20.23	16.96
T-60-1	93.4	1.53	30.77	10	0.95	52.47	16.76	12.2
T-75-2	83.17	1.35	28.18	10.2	0.75	51.99	19.83	13.28

4.3.1. Rendimiento

En la figura 10 se observa el porcentaje de rendimiento presente en los tratamientos realizados.

Figura 10

Evaluación del rendimiento del carbón activo



El rendimiento más alto es de 93.40% (T-60), mientras tanto la muestra A-75 presenta el porcentaje de rendimiento más bajo en referencia a los demás tratamientos. Con referencia a estudios de características del carbón activado, los tiempos de pirolización o tasas de impregnación utilizadas, no son factores importantes para el rendimiento porque dependerá del reactivo utilizado (Zamora, 2010). Con respecto al trabajo de Baccar et al., (2009) y

Çuhadar (2005) obtuvieron un rendimiento superior al 50%, este último reportando que el agente activante utilizado es el principal factor que afecta el desempeño y rendimiento.

Tabla 7

Prueba de análisis de varianza de rendimiento del carbón activado

Muestras	Media	Desviación estándar	Error estándar de la media
A-60	35.6000 <i>d</i>	0.91652	0.52915
A-75	30.7333 <i>d</i>	4.04145	2.33333
H-60	69.8100 <i>c</i>	3.05725	1.76511
H-75	73.1333 <i>c</i>	3.02173	1.74459
T-60	93.4000 <i>a</i>	0.36056	0.20817
T-75	83.1667 <i>b</i>	3.60046	2.07873
Total	64.3072	24.11025	5.68284

*Letras iguales indican diferencias no significativas ($p < 0.05$, Prueba Duncan y Tukey).

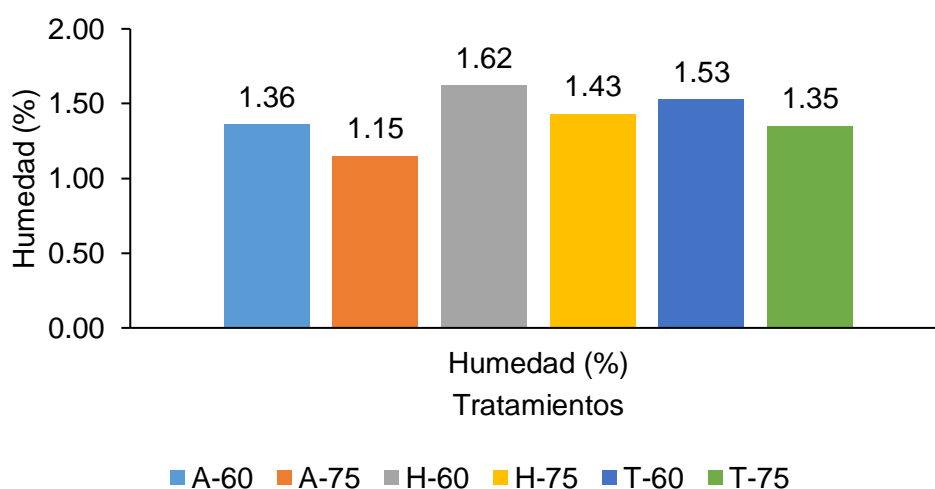
Según la tabla 7 al menos una de las muestras reporta un porcentaje de rendimiento significativamente diferente que las demás ($p = 0.000 < 0.05$; prueba ANVA); además la muestra H-60 reporta el más alto porcentaje de rendimiento ($p < 0.05$, prueba Duncan y Tukey).

4.3.2. Humedad

En la figura 11 se observa la humedad presente en las muestras de carbón activado de huesos de alpaca.

Figura 11

Evaluación de humedad del carbón activo



El porcentaje de humedad más bajo es de 1.15% (A-75), por el contrario la muestra con el contenido más alto de humedad es H-60 (1.62%) en referencia a los otros tratamientos.

Los resultados se encuentran por debajo del 12% según la NTP 207.024 y NMX-F-295-1981 esto es equivalente a los resultados de Rodriguez (2014), que obtuvo una humedad del 5% y Rivera (2017) 6.5%. Zamora (2010) confirma que el tiempo de activación afecta a la humedad y que la adsorción y la humedad son inversamente proporcionales.

Tabla 8

Prueba de análisis de varianza de humedad del carbón activado

Muestras	Media	Desviación estándar	Error estándar de la media
A-60	1.3633 ^c	0.11060	0.06386
A-75	1.1500 ^d	0.05292	0.03055
H-60	1.6233 ^a	0.05859	0.03383
H-75	1.4300 ^{b, c}	0.07810	0.04509
T-60	1.5333 ^{a, b}	0.10066	0.05812
T-75	1.3467 ^c	0.11150	0.06438
Total	1.4078	0.17131	0.04038

*Letras iguales indican diferencias no significativas ($p < 0.05$, Prueba Duncan y Tukey).

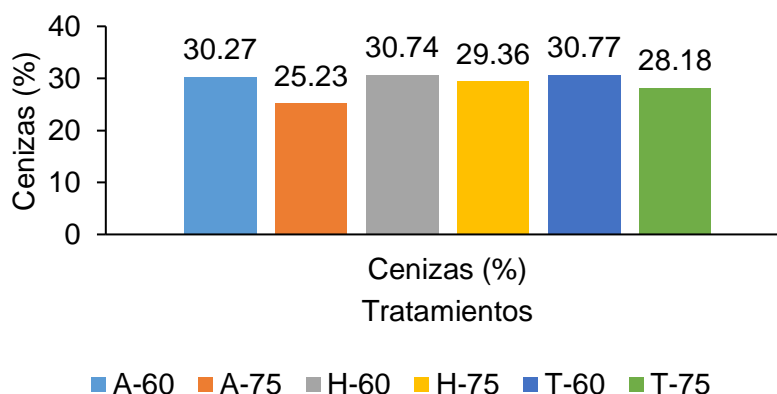
Según la tabla 8 al menos una de las muestras reporta un porcentaje de rendimiento significativamente diferente que las demás ($p = 0.000 < 0.05$; prueba ANVA); Por otra parte el tratamiento A-75 (d), reporta el porcentaje más bajo de humedad ($p < 0.05$, prueba Duncan y Tukey).

4.3.3. Cenizas

En la figura 12 se observa el porcentaje de cenizas en las muestras de carbón activado de cada tratamiento.

Figura 12

Evaluación del contenido de ceniza del carbón activo



El porcentaje de cenizas más bajo es de 25.23% (A-75), por el contrario la muestra T-60 y H-60 presentan el más alto contenido de cenizas con respecto a las otras muestras.

Bardalez (2015) menciona, que un alto porcentaje de cenizas definitivamente afectará la reducción de la capacidad de adsorción, obteniendo un contenido de cenizas inferior al 30%. Además, el cambio en el contenido de cenizas dependerá de la concentración de ácido fosfórico, materias primas y activador utilizado, así mismo cuanto mayor sea su capacidad de adsorción, menor contenido de cenizas existe. Como muestra el resultado de García y Machado (2011) que obtuvo 25% aproximado de cenizas. Asimismo, los resultados obtenidos son superiores al 12% como lo estipula la NTP 207.024 y NMX-F-295-1981.

Tabla 9

Prueba de análisis de varianza de cenizas del carbón activado

Muestras	Media	Desviación estándar	Error estándar de la media
A-60	30.2733 a, b	0.23245	0.13421
A-75	25.2333 d	0.88030	0.50824
H-60	30.7400 a	0.25239	0.14572
H-75	29.3633 b	0.75692	0.43701
T-60	30.7700 a	0.38743	0.22368
T-75	28.1833 c	0.33501	0.19342
Total	29.0939	2.05230	0.48373

*Letras iguales indican diferencias no significativas ($p < 0.05$, Prueba Duncan y Tukey).

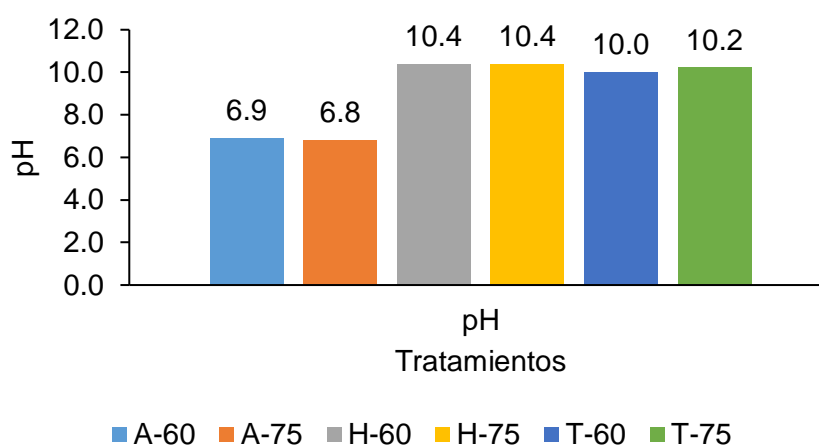
Según la tabla 9 al menos una de las muestras reporta un porcentaje de rendimiento significativamente diferente que las demás ($p = 0.000 < 0.05$; prueba ANVA); además el carbón activado con ácido fosfórico a 75 minutos de pirólisis (d), reporta el porcentaje más bajo de cenizas ($p < 0.05$, prueba Duncan y Tukey).

4.3.4. pH

En la figura 13 se observa el nivel de pH en las muestras de carbón activado de cada tratamiento.

Figura 13

Evaluación del pH del carbón activo



Las muestras H-60 y H-75 tienen el pH más alto, esto debido a que el agente activante fue NaOH. Por el contrario las muestras A-60 y A-75 obtuvieron el pH más bajo debido a que su activación fue con H_3PO_4 . Ramakrishnan (2009) menciona que el pH disminuye generalmente a los activadores del ácido fosfórico, como evidenció en sus resultados donde obtuvo un pH inferior a 7. Al mismo tiempo Reátegui, (2017) señaló, que la capacidad de adsorción no depende del valor de pH medido en el carbón activado. Por otra parte, los resultados se encuentran por encima de 5.5 – 7.5 y 5.5 – 8 de la NTP 207.024 y NMX-F-295-1981 respectivamente.

Tabla 10

Prueba de análisis de varianza de pH del carbón activado

Muestras	Media	Desviación estándar	Error estándar de la media
A-60	6.8567 ^b	0.39577	0.22850
A-75	6.7800 ^b	0.29103	0.16803
H-60	10.4333 ^a	0.15275	0.08819
H-75	10.4000 ^a	0.36056	0.20817
T-60	9.9667 ^a	0.20817	0.12019
T-75	10.1000 ^a	0.10000	0.05774
Total	9.0894	1.67675	0.39521

*Letras iguales indican diferencias no significativas ($p < 0.05$, Prueba Duncan y Tukey).

Según la tabla 10 al menos una de las muestras reporta un porcentaje de rendimiento significativamente diferente que las demás ($p = 0.000 < 0.05$; prueba ANVA); además el carbón

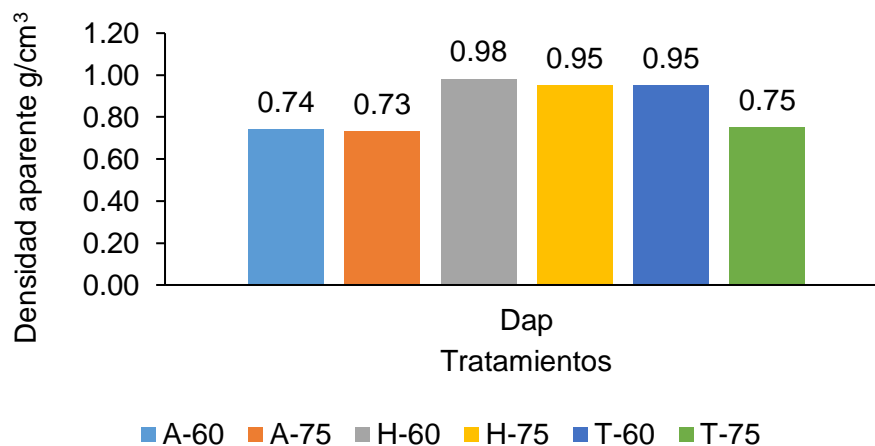
activado con ácido fosfórico a 75 y 60 minutos de pirólisis (b), reportan un pH ácido ($p < 0.05$, prueba Duncan y Tukey).

4.3.5. Densidad aparente

En la figura 14 se observa la densidad presente en las muestras de carbón activado de huesos de alpaca.

Figura 14

Evaluación de la densidad aparente del carbón activo



Las muestras (A-60) y (A-75) presentan una densidad inferior a resto de los tratamientos de 0.74 g/cm^3 y 0.73 g/cm^3 respectivamente. Por el contrario la densidad más alta se presenta en la muestra H-60.

La densidad según la Norma Técnica Peruana define un valor de $0.35\text{-}0.40$ y un máximo de 0.46 g/cm^3 para la NMX-F-295-1981. Sin embargo, los resultados obtenidos se encuentran por encima de estos valores. La porosidad afecta la capacidad de adsorción, es decir, la porosidad es proporcional a la capacidad de adsorción y la tasa de adsorción también es proporcional (Reátegui, 2017).

Tabla 11*Prueba de análisis de varianza de densidad aparente del carbón activado*

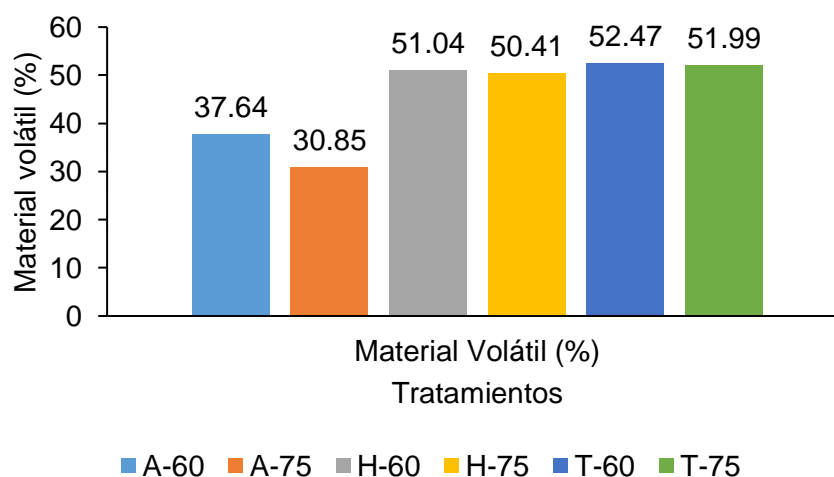
Muestras	Media	Desviación estándar	Error estándar de la media
A-60	0.7400 <i>b</i>	0.01000	0.00577
A-75	0.7267 <i>b</i>	0.01528	0.00882
H-60	0.9800 <i>a</i>	0.01000	0.00577
H-75	0.9500 <i>a</i>	0.03000	0.01732
T-60	0.9500 <i>a</i>	0.02646	0.01528
T-75	0.7567 <i>b</i>	0.01528	0.00882
Total	0.85056	0.11461	0.02701

*Letras iguales indican diferencias no significativas ($p < 0.05$, Prueba Duncan y Tukey).

Según la tabla 11 al menos una de las muestras reporta un porcentaje de rendimiento significativamente diferente que las demás ($p = 0.000 < 0.05$; prueba ANVA); además el carbón activado con H₃PO₄ a 75 y 60 min. de pirólisis (b) y la muestra T-75 (b), reportan una densidad baja ($p < 0.05$, prueba Duncan y Tukey).

4.3.6. Material volátil

En la figura 15 se observa el porcentaje de material volátil presente en las muestras de carbón activado de huesos de alpaca.

Figura 15*Evaluación del contenido de material volátil del carbón activo*

El porcentaje de material volátil más bajo es de 30.85 (A-75) en referencia a los otros tratamientos que tienen un valor de 37.64% (A-60), 51.04% (H-60); 50.41% (H-75); 52.47% (T-60) y 51.99% (T-75).

El material volátil se ve afectado por factores como la temperatura y la concentración de activadores (Sánchez, 2018). Estos resultados son consistentes con Hassler, 1974 (como se cita en Sánchez, 2018) estudio en el cual se obtuvo niveles de material volátil de 40% a altas temperaturas.

Tabla 12

Prueba de análisis de varianza de material volátil del carbón activado

Muestras	Media	Desviación estándar	Error estándar de la media
A-60	37.6367 b	0.89007	0.51388
A-75	30.8500 c	0.96062	0.55462
H-60	51.0433 a	1.58538	0.91532
H-75	50.4100 a	2.07820	1.19985
T-60	52.4667 a	0.90007	0.51966
T-75	51.9867 a	0.51228	0.29577
Total	45.7322	8.69069	2.04841

*Letras iguales indican diferencias no significativas ($p < 0.05$, Prueba Duncan y Tukey).

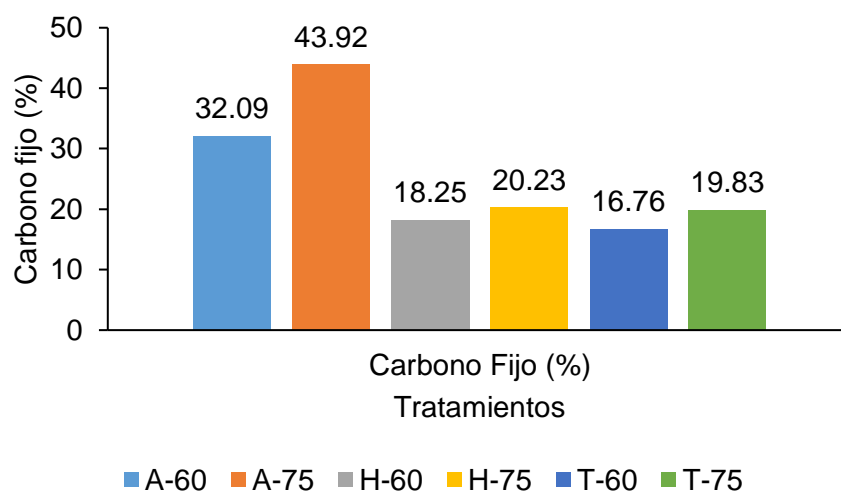
Según la tabla 12 al menos una de las muestras reporta un porcentaje de rendimiento significativamente diferente que las demás ($p = 0.000 < 0.05$; prueba ANVA); además el carbón activado con H_3PO_4 a 75 min. de pirólisis (c), reporta el porcentaje de material volátil más bajo ($p < 0.05$, prueba Duncan y Tukey).

4.3.7. Carbono fijo

En la figura 16 se observa la densidad presente en las muestras de carbón activado de huesos de alpaca.

Figura 16

Evaluación de carbono fijo del carbón activo



La muestra A-75 presenta el porcentaje de carbono fijo más alto de 43.92%. Por el contrario el valor más bajo es de 16.76% (T-60) en referencia a los valores de 32.09 (A-60); 18.25% (H-60); 20.03% (H-75); y 19.83% (T-75).

Layseca (2001) afirmó que a mayor carbono fijo, mayor capacidad de adsorción, donde obtuvo un porcentaje de carbono fijo superior al 60% en sus pruebas. Esto es confirmado según la FAO (1983) indicando que cuanto mayor es el carbono fijo, mayor es la capacidad de adsorción.

Tabla 13

Prueba de análisis de varianza de carbono fijo del carbón activado

Muestras	Media	Desviación estándar	Error estándar de la media
A-60	32.0900 <i>b</i>	0.73369	0.42360
A-75	43.9167 <i>a</i>	0.87323	0.50416
H-60	18.2533 <i>c, d</i>	1.78621	1.03127
H-75	20.2600 <i>c</i>	2.20552	1.27336
T-60	16.7967 <i>d</i>	0.67412	0.38920
T-75	19.8300 <i>c</i>	0.84540	0.48809
Total	25.1911	10.09	2.37824

*Letras iguales indican diferencias no significativas ($p < 0.05$, Prueba Duncan y Tukey).

Según la tabla 13 al menos una de las muestras reporta un porcentaje de rendimiento significativamente diferente que las demás ($p = 0.000 < 0.05$; prueba ANVA); además el carbón

activado H₃PO₄ a 75 min. de pirólisis (a), reporta el porcentaje más alto de carbono fijo (p < 0.05, prueba Duncan y Tukey).

4.4. Evaluación de la capacidad de adsorción de oro utilizando carbón activado de huesos de alpaca.

Se logró evaluar la capacidad de adsorción de oro utilizando una solución cianurada a una concentración de 21.33 mg/L de oro. Los resultados obtenidos en cada tratamiento se muestran en la tabla 14

Tabla 14

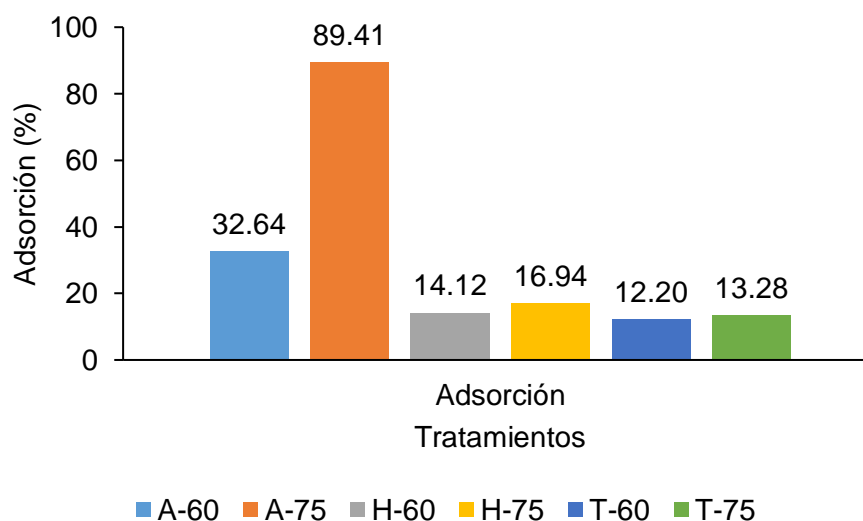
Concentración inicial y final de la solución cianurada de oro

Tratamiento	Concentración inicial mg/L	Concentración Final (mg/L)	Cant. Adsorbida (mg/L)
A-60	21.33	14.37	6.963
A-75	21.33	2.26	19.07
H-60	21.33	18.32	3.01
H-75	21.33	17.72	3.613
T-60	21.33	18.73	2.6
T-75	21.33	18.5	2.833

En la figura 17 se observa la capacidad de adsorción presente en las muestras de carbón activado de huesos de alpaca.

Figura 17

Evaluación de la capacidad de adsorción del carbón activo



El tratamiento A-75 tiene la mayor capacidad de adsorción con un 89.41%. Por el contrario la muestra T-60 tiene una capacidad de adsorción más bajo (12.20%) en referencia a las muestras activadas con NaOH y testigo de 14.12% (H-60); 16.94% (H-75) y 13.28% (T-75).

Según los reportes de investigación de Condori (2019) se presentó una adsorción del 64.76% de solución; todas las muestras fueron sometidas a un período de agitación de 24 horas. En un estudio similar Sulla (2013) afirmó que en un mismo lapso se obtuvo una capacidad de adsorción del 95.05%. Por otra parte, Feijoo, De la Torre, & Uribe (2019) en su investigación utilizaron carbón activo de cuesco de palmiste a un tiempo de pirólisis de 800 – 950°C, donde se presentó un 90% de eficiencia en la adsorción de complejo oro-cianuro.

Tabla 15

Prueba de análisis de varianza de adsorción del carbón activado

Muestras	Media	Desviación estándar	Error estándar de la media
A-60	32.6433 ^b	0.45092	0.26034
A-75	89.4133 ^a	0.61403	0.35451
H-60	14.1233 ^d	0.88500	0.51096
H-75	16.9400 ^c	0.19000	0.10970
T-60	12.2000 ^e	0.31321	0.18083
T-75	13.2767 ^{d, e}	0.91882	0.53048
Total	29.7661	28.359	6.68427

*Letras iguales indican diferencias no significativas ($p < 0.05$, Prueba Duncan y Tukey).

Según la tabla 15 al menos una de las muestras reporta un porcentaje de rendimiento significativamente diferente que las demás ($p = 0.000 < 0.05$; prueba ANVA); además el carbón activado con ácido fosfórico a 75 minutos de pirólisis (a), reporta el porcentaje más alto de ($p < 0.05$, prueba Duncan y Tukey).

CAPITULO V

Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

- El carbón activado de huesos de alpaca fue caracterizado por el método químico con hidróxido de sodio, ácido fosfórico en un tiempo de 60 y 75 minutos a temperatura de pirólisis de 750°C como se muestra en esta investigación.
- A temperatura de 500°C se obtiene carbón de huesos de alpaca.
- Se activó carbón a partir de huesos de alpaca bajo condiciones de activación química (ácido fosfórico, hidróxido de sodio), con agitaciones de 115 rpm., en tiempos de 60 y 75 min. a temperatura constante de 750°C.
- La muestra A-75 de carbón activo de huesos de alpaca presenta mejores características fisicoquímicas con rendimiento (30.73%), humedad (1.15%), cenizas (25.23%), material volátil (51.04%), carbono fijo (30.85%) y carbono fijo (43.92%) a un pH de 6.8 y densidad aparente de 0.73 g/cm³.
- La muestra A-75 de carbón activo de huesos de alpaca presenta mejores resultados de adsorción de oro en 89.41 %.

5.2. Recomendaciones

- Aplicar el carbón activo de huesos de alpaca en purificación de agua, decoloración de tintes, eliminación de olores y adsorción pesados presentes en el medio ambiente.
- Realizar estudios respecto a las características fenotípicas de los huesos de alpaca para mejorar su calidad en la elaboración de carbón activado.

- Realizar estudios con diferentes tiempos y temperaturas de activación para determinar una cinética de adsorción.
- Carbonizar el hueso de alpaca a diferentes temperaturas y tiempos para mejorar la obtención del carbón

Referencias

- Activo, M. (2010). Máster en Ingeniería del Agua. *Escuela Universitaria Politécnica de Sevilla*.
- Barrantes, F. (2017). Cinética de adsorción del Mn²⁺ de las aguas residuales de la mina Lunar de Oro mediante el uso de residuos orgánicos generados de las actividades acuícolas. Universidad Nacional del Altiplano.
- Baccar, R., Bouzid, J., Feki, M., & Montiel, A. (2009). Preparation of activated carbon from Tunisian olive-waste cakes and its application for adsorption of heavy metal ions. *Journal of Hazardous Materials*, 162(2–3), 1522–1529.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.06.041>
- Bansal R, C., Donnet, J., Stoeckli, F., & Dekker, M. (1990). Active Carbon. In *J. DISPERSION SCIENCE AND TECHNOLOGY* (Vol. 11, Issue 3).
- Bardalez, A. (2015). *Obtención química de carbón activado a partir del endocarpio del coco (coccus nucífera) en la Región San Martín*.
<http://repositorio.unsm.edu.pe/handle/UNSM/85?show=full>
- Bonilla, A. (2016). *Materiales en Adsorción y Catálisis*. 778168.
- Carbajal, C. P. (2012). *Informe técnico - Utilización industrial y mercado de diez especies maderables potenciales de bosques secundarios y primarios residuales*. 2(I), 18.
- Cazetta, A. L., Azevedo, S. P., Pezoti, O., Souza, L. S., Vargas, A. M. M., Paulino, A. T., Moraes, J. C. G., & Almeida, V. C. (2014). Thermally activated carbon from bovine bone: Optimization of synthesis conditions by response surface methodology. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 110, 455–462.
<https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2014.10.022>
- Condori, E. (2019). *“Evaluación de la capacidad de adsorción de la cáscara de castaña.”*

- Coronado Martínez, M., Cueva-Gálvez, G. E., Gonzáles Mora, H. E., & Carrasco Pérez, P. (2016). Obtención de carbón activado del endocarpio de Shapaja (*Attalea phalerata*) procedente de la región San Martín, empleando un método físico. *Revista Forestal Del Perú*, 31(2), 90. <https://doi.org/10.21704/rfp.v31i2.1030>
- Çuhadar, Ç. (2005). *Production and characterization of activated carbon from hazeknut shell and hazelnut husk*. june, 5–19.
- Clarimex. (2000). *Clasificación del carbón activado*.
- Deydier, E., Guilet, R., Sarda, S., & Sharrock, P. (2005). Physical and chemical characterisation of crude meat and bone meal combustion residue: “waste or raw material?” *Journal of Hazardous Materials*, 121(1–3), 141–148. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2005.02.003>
- Feijoo, C., De la Torre, E., & Uribe, R. (2019). Determinación de la capacidad de adsorción de complejo oro-cianuro en compósitos de carbón activado. Escuela Politécnica Nacional, Departamento de Metalurgia Extractiva, 8.
- Figueroa, V. & S. M. (1997). Tratamiento y utilización de residuos de origen animal, pesquero y alimenticio en la alimentación animal. In *Producción y sanidad animal*. <http://medcontent.metapress.com/index/A65RM03P4874243N.pdf>.
- Gonzales, H., & Teruya, R. (2004). Estudio preliminar de carbón activado; situación en el Perú. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Groso, G. (1997). El carbón activado granular en el tratamiento de agua. *Aconcagua*.
- Hassan, S., Awwad, N., & Aboterika, A. (2008). Removal of mercury (II) from wastewater using camel bone charcoal. *Journal of Hazardous Materials*, 154(1–3), 992–997. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2007.11.003>
- Hidalgo R. (2017). Obtención de carbón activado a partir del bagazo del café como una

propuesta de utilización del residuo de una industria cafetera. *Escuela Superior Politécnica Del Litoral*, 106.

Hyder, A., Begum, S., & Egiebor, N. (2015). Adsorption isotherm and kinetic studies of hexavalent chromium removal from aqueous solution onto bone char. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3(2), 1329–1336.

<https://doi.org/10.1016/J.JECE.2014.12.005>

Hovanec, T., Spotte, S., & Adams, G. (1998). Diferentes clases de carbones activados.

Lazo, R. (2015). Operaciones y procesos para la producción de carbón activado a partir de la cáscara de coco. Universidad Nacional del Callao.

Lillo R., Cazorla A., & Linares S.. (2003). Understanding chemical reactions between carbons and NaOH and KOH: An insight into the chemical activation mechanism.

Carbón, 41(2), 267–275. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(02\)00279-8](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(02)00279-8)

MINAGRI. (2019). Potencial productivo y comercial de la Alpaca. *Potencial Productivo y Comercial de La Alpaca septiembre 2019*, 26.

Molina, M., & Reinoso, F. (2004). Role of chemical activation in the development of carbon porosity. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 241(1–3), 15–25. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2004.04.007>

Moreno P., Gómez C., García C., & Giraldo, L. (2010). Binary system Cu (II)/Pb (II) adsorption on activated carbon obtained by pyrolysis of cow bone study. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 89(1), 122–128.

<https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2010.06.007>

Moreno, C., & Rivera, J. (2001). Carbon Materials as Adsorbents for the Removal of Pollutants from the Aqueous Phase. *MRS Bulletin*, 26(11), 890-894.

doi:doi:10.1557/mrs2001.230.

- Mundial, B. (20 de septiembre de 2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*.
- Murillo, Y., Giraldo, L., & Moreno, J. (2012). Obtención de materiales porosos a partir de huesos de pollo y porcino para. *Afinidad Lxviii*, 556, 447–452.
- NCYT. (07 de diciembre de 2015). *Producción de hidroxapatita a partir de residuos de animales*. (C. d. Materiales, Productor).
- Piccirillo, C., Moreira, I. S., Novais, R., Fernandes, A., Pullar, R., & Castro, P. (2017). Biphasic apatite carbon materials derived from pyrolysed fish bones for effective adsorption of persistent pollutants and heavy metals. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(5), 4884–4894. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2017.09.010>
- Reátegui, K. (2017). Obtención de carbón activado a partir de la cáscara del fruto de la calabaza (*Cucurbita ficifolia* Bouché). *Universidad Nacional Agraria La Molina*, 91. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/2882>
- Reinoso, F. (2005). "Carbón activado: estructura, preparación y aplicaciones". *Revista Uniandes*, 66-69.
- Rojas, J., & Castro, E. (2017). *Boletín estadístico de Producción Agrícola y Ganadera IV Trimestre 2017*. 1–49. <https://doi.org/10.2139/ssrn.1920472>
- Rojas M., Bonilla P., Aguayo V., Hernández V., Moreno V., Tovar R., & Montes M. (2013). Optimization of pyrolysis conditions and adsorption properties of bone char for fluoride removal from water. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 104, 10–18. <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2013.09.018>
- Rojas M., Silvestre A., Aguayo V., Mendoza C., & Bonilla P. (2015). A new synthesis route for bone chars using CO₂ atmosphere and their application as fluoride adsorbents. *Microporous and Mesoporous Materials*, 209, 38–44. <https://doi.org/10.1016/J.MICROMESO.2014.09.002>

- Sánchez, C. (2018). *Caracterización de carbón activado a partir de bambú "Guadua Angustifolia Kunth" utilizando el método químico*. 1–97.
<http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/3340>
- Sangay, S. (2010). Obtención y evaluación de carbón activado del endocarpio de castaña (*Bertholletia excelsa*) procedente de plantación y de bosque natural, empleando un método químico. *Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú*, 40.
- Shahid, M., Kim, J., & Choi, Y. (2019). Synthesis of bone char from cattle bones and its application for fluoride removal from the contaminated water. *Groundwater for Sustainable Development*, 8, 324–331. <https://doi.org/10.1016/J.GSD.2018.12.003>
- Smičiklas, I., Dimović, S., Šljivić, M., Plečaš, I., Lončar, B., & Mitrić, M. (2010). Resource recovery of animal bones: Study on sorptive properties and mechanism for Sr²⁺ ions. *Journal of Nuclear Materials*, 400(1), 15–24.
<https://doi.org/10.1016/J.JNUCMAT.2010.02.004>
- Solum, M., Pugmire, R., Jagtoyen, M., & Derbyshire, F. (1995). Evolution of carbon structure in chemically activated wood. In *Carbon* (Vol. 33, Issue 9).
- Sotelo, J., & Martínez, J. (2004). *Eliminación de compuestos organoclorados para potabilización de aguas mediante un proceso de adsorción-regeneración en carbón activado*.
- Sulla, M. (2013). Estudio de la adsorción con carbón activado para mejorar la recuperación del oro en la planta San Juan de Century Mining Perú S.A.C. *Universidad Nacional de San Agustín I*, 1–123.
- Talledo, J. (2013). Uso de los residuos del hueso de aceituna para obtener carbón activado. *Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann*.
- Zamora, G. (2010). *Obtención de carbón activado a partir de semillas, de dos palmeras de*

Anexos

Anexo A

Análisis estadístico

- Rendimiento

Prueba de normalidad

Muestras	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Rendimiento	A-60	0.253	3	0.964	3	0.637
(%)	A-75	0.232	3	0.980	3	0.726

H-60	0.255	3	0.963	3	0.630
H-75	0.365	3	0.798	3	0.111
T-60	0.276	3	0.942	3	0.537
T-75	0.177	3	1.000	3	0.969

a. Corrección de significación de Lilliefors

Prueba de homogeneidad de varianzas

Estadístico de Levene	Rendimiento (%)		Sig.
	gl1	gl2	
1.832	5	12	0.181

Comparación Múltiple de Promedios.

Muestras	N	Subconjunto				
		1	2	3	4	
HSD Tukey ^{a,b}	A-75	3	30.7333			
	A-60	3	35.6000			
	H-60	3		69.8100		
	H-75	3		73.1333		
	T-75	3			83.1667	
	T-60	3				93.4000
	Sig.		0.352	0.711	1.000	1.000
Duncan ^{a,b}	A-75	3	30.7333			
	A-60	3	35.6000			
	H-60	3		69.8100		
	H-75	3		73.1333		
	T-75	3			83.1667	
	T-60	3				93.4000
	Sig.		0.058	0.179	1.000	1.000

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática (Error) = 8,124.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 3,000.

b. Alfa = 0.05.

• Humedad

Prueba de normalidad

Muestras	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
% de Humedad	A-60	0.215	3	0.989	3	0.800
	A-75	0.314	3	0.893	3	0.363
	H-60	0.321	3	0.881	3	0.328
	H-75	0.362	3	0.803	3	0.122
	T-60	0.219	3	0.987	3	0.780
	T-75	0.318	3	0.887	3	0.344

a. Corrección de significación de Lilliefors

Prueba de homogeneidad de varianzas

% de Humedad			
Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
0.649	5	12	0.668

Comparación Múltiple de Promedios

Muestras	N	Subconjunto				
		1	2	3	4	
HSD Tukey ^{a,b}	A-75	3	1.1500			
	T-75	3	1.3467	1.346666667		
	A-60	3	1.363333333	1.3633		
	H-75	3		1.4300	1.43	
	T-60	3		1.533333333	1.5333	
	H-60	3			1.62333	
	Sig.		0.099	0.176	0.153	
	Duncan ^{a,b}	A-75	3	1.1500		
	T-75	3		1.346666667		
	A-60	3		1.3633		
	H-75	3		1.4300	1.43	
	T-60	3			1.5333	1.53333
	H-60	3				1.6233
	Sig.		1.000	0.295	0.179	0.237

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática (Error) = .008.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 3.000.

b. Alfa = 0.05.

• Cenizas

Prueba de normalidad

Muestras	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
% de cenizas	A-60	0.312	3	0.896	3	0.372
	A-75	0.179	3	0.999	3	0.950
	H-60	0.349	3	0.830	3	0.189
	H-75	0.371	3	0.784	3	0.076
	T-60	0.317	3	0.888	3	0.347
	T-75	0.375	3	0.775	3	0.057

a. Corrección de significación de Lilliefors

Prueba de homogeneidad de varianzas

Estadístico de Levene	Cenizas (%)		Sig.
	gl1	gl2	
1.827	5	12	0.182

Comparación Múltiple de Promedios.

Muestras	N	Subconjunto				
		1	2	3	4	
HSD Tukey ^{a,b}	A-75	3	25.2333			
	T-75	3		28.1833		
	H-75	3		29.3633	29.3633	
	A-60	3			30.2733	
	H-60	3			30.7400	
	T-60	3			30.7700	
	Sig.		1.000	0.148	0.064	
Duncan ^{a,b}	A-75	3	25.2333			
	T-75	3		28.1833		
	H-75	3			29.3633	
	A-60	3			30.2733	30.2733
	H-60	3				30.7400
	T-60	3				30.7700
	Sig.		1.000	1.000	0.060	0.302

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática (Error) = .288.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 3.000.

b. Alfa = 0.05.

• pH

Prueba de normalidad

Muestras	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
pH	A-60	0.339	3	0.851	3	0.242
	A-75	0.314	3	0.893	3	0.363
	H-60	0.253	3	0.964	3	0.637
	H-75	0.276	3	0.942	3	0.537
	T-60	0.292	3	0.923	3	0.463

T-75	0.175	3	1.000	3	1.000
------	-------	---	-------	---	-------

a. Corrección de significación de Lilliefors

Prueba de homogeneidad de varianzas

pH			
Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
2.149	5	12	0.129

Comparación Múltiple de Promedios.

Muestras	N	Subconjunto		
		1	2	
HSD Tukey ^{a,b}	A-75	3	6.780	
	A-60	3	6.857	
	T-60	3		9.967
	T-75	3		10.100
	H-75	3		10.400
	H-60	3		10.433
	Sig.		0.999	0.352
Duncan ^{a,b}	A-75	3	6.780	
	A-60	3	6.857	
	T-60	3		9.967
	T-75	3		10.100
	H-75	3		10.400
	H-60	3		10.433
	Sig.		0.737	0.076

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática (Error) = .075.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 3.000.

b. Alfa = 0.05.

- Densidad aparente**

Prueba de normalidad

Muestras	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
densidad	A-60	0.175	3	1.000	3	1.000
	A-75	0.253	3	0.964	3	0.637
	H-60	0.175	3	1.000	3	1.000
	H-75	0.175	3	1.000	3	1.000

T-60	0.314	3	0.893	3	0.363
T-75	0.253	3	0.964	3	0.637

a. Corrección de significación de Lilliefors

Prueba de homogeneidad de varianzas

Estadístico de Levene	Densidad		
	gl1	gl2	Sig.
1.179	5	12	0.375

Comparación Múltiple de Promedios.

Muestras	N	Subconjunto		
		1	2	
HSD Tukey ^{a,b}	A-75	3	0.7267	
	A-60	3	0.7400	
	T-75	3	0.7567	
	T-60	3		0.9500
	H-75	3		0.9500
	H-60	3		0.9800
	Sig.		0.451	0.451
Duncan ^{a,b}	A-75	3	0.7267	
	A-60	3	0.7400	
	T-75	3	0.7567	
	T-60	3		0.9500
	H-75	3		0.9500
	H-60	3		0.9800
	Sig.		0.097	0.097

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática (Error) = .000.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 3.000.

b. Alfa = .05.

- **Material volátil**

Prueba de normalidad

Muestras	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
material volátil (%)	A-60	0.176	3	1.000	3	0.975
	A-75	0.183	3	0.999	3	0.931
	H-60	0.256	3	0.962	3	0.626
	H-75	0.218	3	0.987	3	0.785

T-60	0.176	3	1.000	3	0.975
T-75	0.323	3	0.878	3	0.318

a. Corrección de significación de Lilliefors

Prueba de homogeneidad de varianzas

Estadístico de Levene	Materia Volátil		Sig.
	gl1	gl2	
1.239	5	12	0.350

Comparación Múltiple de Promedios.

Muestras	N	Subconjunto			
		1	2	3	
HSD Tukey ^{a,b}	A-75	3	30.8500		
	A-60	3		37.6367	
	H-75	3		50.4100	
	H-60	3		51.0433	
	T-75	3		51.9867	
	T-60	3		52.4667	
	Sig.		1.000	1.000	0.401
	Duncan ^{a,b}	A-75	3	30.8500	
A-60		3		37.6367	
H-75		3		50.4100	
H-60		3		51.0433	
T-75		3		51.9867	
T-60		3		52.4667	
Sig.			1.000	1.000	0.089

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática (Error) = 1.603.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 3.000.

b. Alfa = .05.

• Carbón Fijo

Prueba de normalidad

Muestras	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
carbono fijo	A-60	0.269	3	0.950	3	0.568
	A-75	0.206	3	0.993	3	0.836
	H-60	0.280	3	0.938	3	0.520
	H-75	0.359	3	0.810	3	0.139

T-60	0.361	3	0.805	3	0.128
T-75	0.344	3	0.840	3	0.215

Prueba de homogeneidad de varianzas

Carbono Fijo (%)					
Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.		
2.829	5	12	0.065		

Comparación Múltiple de Promedios.

Muestras	N	Subconjunto				
		1	2	3	4	
HSD Tukey ^{a,b}	T-60	3	16.7967			
	H-60	3	18.2533			
	T-75	3	19.8300			
	H-75	3	20.2600			
	A-60	3		32.0900		
	A-75	3			43.9167	
	Sig.		0.065	1.000	1.000	
Duncan ^{a,b}	T-60	3	16.7967			
	H-60	3	18.2533	18.2533		
	T-75	3		19.8300		
	H-75	3		20.2600		
	A-60	3			32.0900	
	A-75	3				43.9167
	Sig.		0.203	0.102	1.000	1.000

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática (Error) = 1.754.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 3.000.

b. Alfa = .05.

• **Adsorción**

Prueba de normalidad

Muestras	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
adsorción	A-60	0.196	3	0.996	3	0.878
	A-75	0.356	3	0.817	3	0.156
	H-60	0.175	3	1.000	3	0.994
	H-75	0.270	3	0.948	3	0.561
	T-60	0.351	3	0.828	3	0.183

T-75	0.246	3	0.970	3	0.668
------	-------	---	-------	---	-------

a. Corrección de significación de Lilliefors

Prueba de homogeneidad de varianzas

Adsorción (%)			
Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
1.362	5	12	0.305

Comparación Múltiple de Promedios.

Muestras	N	Subconjunto					
		1	2	3	4	5	
HSD Tukey ^{a,b}	T-60	3	12.2000				
	T-75	3	13.2767	13.2767			
	H-60	3		14.1233			
	H-75	3			16.9400		
	A-60	3				32.6433	
	A-75	3					89.4133
	Sig.		0.343	0.579	1.000	1.000	1.000
	Duncan ^{a,b}	T-60	3	12.2000			
T-75		3	13.2767	13.2767			
H-60		3		14.1233			
H-75		3			16.9400		
A-60		3				32.6433	
A-75		3					89.4133
Sig.			0.056	0.123	1.000	1.000	1.000

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática (Error) = .390.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 3.000.

b. Alfa = .05.

Anexo B

Panel fotográfico



Fotografía 1. Recolección de huesos de Alpaca



Fotografía 2. Preparación de la muestra, lavado y trituración en tamaños de 2- 5 cm.



Fotografía 3. Pesado y medición de huesos



Fotografía 4. Proceso de carbonizado.



Fotografía 5. Proceso de carbonización, en una temperatura de 500°C durante 1 h.



Fotografía 6. Tamizaje de carbón en un rango de 0.25 a 0.42 mm.



Fotografía 7. Preparación de muestras.



Fotografía 8. Proceso de activación química, preparación del carbón para impregnación con H_3PO_4



Fotografía 9. Proceso de activación, agitación del carbón



Fotografía 10. Pesado de carbón y agente activante



Fotografía 11. Proceso de activación química, preparación del carbón para impregnación con NaOH



Fotografía 12. Proceso de agitación con los respectivos agentes activantes.



Fotografía 13. Proceso de lavado, filtración y secado del carbón



Fotografía 14. Pesaje del carbón, para el proceso de pirolización



Fotografía 15. Proceso de activación física.



Fotografía 16. Proceso de activación física, pirolización del carbón



Fotografía 17. Lavado y filtración de las muestras.



Fotografía 18. Secado de las muestras.



Fotografía 19. Proceso de análisis físicos del proceso, pesado del carbón para el parámetro de humedad.



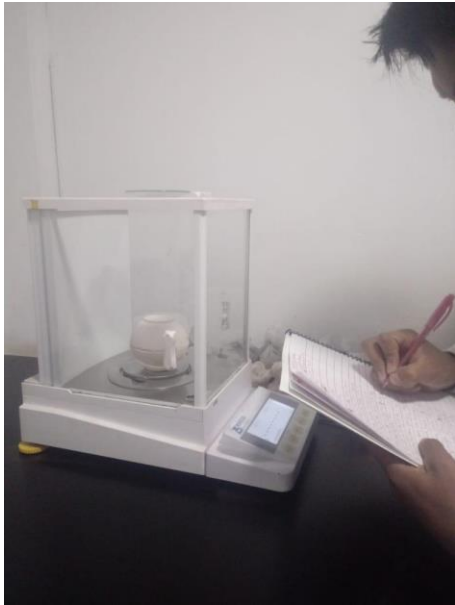
Fotografía 20. Procedimiento del análisis de densidad aparente.



Fotografía 21. Proceso de análisis de material volátil.



Fotografía 22. Proceso de análisis de cenizas.



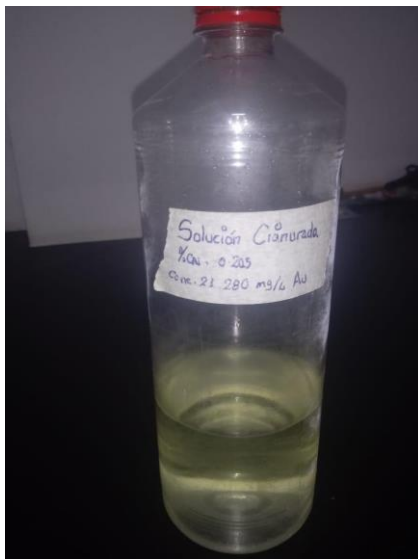
Fotografía 23. Proceso de análisis físicos del carbón, pesado del producto después de la calcinación para hallar el parámetro de material volátil.



Fotografía 24. Proceso de preparación para el análisis del pH del carbón activado.



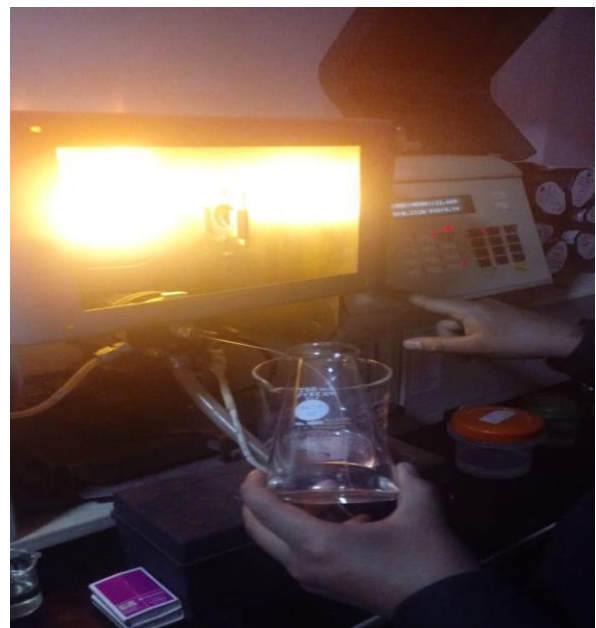
Fotografía 25. Proceso de análisis físicos del carbón, medición del pH.



Fotografía 26. Proceso de análisis físicos del carbón, preparación de solución de oro con una concentración de 21 mg/l, para el parámetro de absorción.



Fotografía 27. Proceso de análisis físicos del carbón activado, filtración del del carbón activado.



Anexo C

Métodos ASTM para el análisis de parámetros fisicoquímicos



Designation: D 2867 – 04

Standard Test Methods for Moisture in Activated Carbon¹

This standard is issued under the fixed designation D 2867; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope

1.1 These test methods provide two procedures for the determination of the moisture content of activated carbon. The procedures may also be used to dry samples required for other tests. The oven-drying method is used when water is the only volatile material present and is in significant quantities, and the activated carbon is not heat-sensitive (some activated carbons can ignite spontaneously at temperatures as low as 150°C). The xylene-extraction method is used when a carbon is known or suspected to be heat sensitive or to contain nonwater-miscible organic compounds instead of or in addition to water. The oven-drying method described in these test methods may be used as the reference for development of instrumental techniques for moisture determination in activated carbon.

1.2 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*²

E 177 Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods

E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method

3. Summary of Test Methods

3.1 *Oven-Drying Test Method*—A sample of carbon is put into a dry, closed capsule (of known weight) and weighed accurately. The capsule is opened and placed with the lid in a preheated oven. The sample is dried to constant weight then removed from the oven and with the capsule closed, cooled to ambient temperature. The closed capsule is weighed again

accurately. The weight loss is expressed as a percentage of the weight of the original sample.

3.2 *Xylene-Extraction Test Method*—A known, accurate weight of carbon is put into a boiling flask. A known volume of xylene is added to the flask and the flask then connected to a water trap. A hot plate is used to heat the xylene until boiling. The temperature is controlled to allow steady reflux. Reflux continues until no further water can be collected in the trap. The weight of water collected is expressed as a percentage of the weight of the original sample.

4. Significance and Use

4.1 The moisture content of activated carbon is often required to define and express its properties in relation to the net weight of the carbon.

4.2 The moisture content of activated carbon packed in typical shipping containers will usually increase during transportation and storage. Users of activated carbon in applications where low moisture content is important should be aware of this effect.

OVEN-DRYING METHOD

5. Apparatus

5.1 *Moisture Oven*—Most commercial, electrically heated, forced-circulation drying ovens capable of temperature regulation between 145 and 155°C may be used.

5.2 *Capsules with Covers*—Low-form glass weighing bottles with ground-glass stoppers or seamless metal boxes with covers may be used. They should be as shallow as possible, consistent with convenient handling.

5.3 *Desiccator*.

6. Materials

6.1 *Desiccant*—Anhydrous calcium chloride or other suitable desiccant.

¹ These test methods are under the jurisdiction of ASTM Committee D28 on Activated Carbon and are the direct responsibility of Subcommittee D28.04 on Gas Phase Evaluation Tests.

Current edition approved April 1, 2004. Published May 2004. Originally approved in 1970. Last previous edition approved in 1999 as D 2867 – 99.

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For Annual Book of ASTM Standards volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.



Standard Test Method for Total Ash Content of Activated Carbon¹

This standard is issued under the fixed designation D 2866; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This test method describes a procedure for the determination of total ash content of activated carbon.

1.2 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*

D 2867 Test Methods for Moisture in Activated Carbon²

E 177 Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods³

E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine Precision of a Test Method³

3. Summary of Test Method

3.1 An accurately weighed sample of dried activated carbon is placed in a controlled-temperature muffle furnace for a period of several hours. When constant weight has been achieved, the crucible is cooled to ambient temperature in a desiccator and reweighed. The weight of the ashed carbon is expressed as a percentage of the weight of the original carbon sample.

4. Significance and Use

4.1 In specific end uses, the amount and composition of the ash may influence the capabilities and certain desired properties of activated carbon.

5. Apparatus

5.1 *Muffle Furnace*, having air circulation, capable of temperature regulation of $\pm 25^\circ\text{C}$ at 650°C .

5.2 *High-Temperature Crucible*, high-form.

5.3 *Analytical Balance*, having a sensitivity of 0.1 mg.

5.4 *Desiccator*.

5.5 *Oven*, forced-air circulation, capable of temperature regulation between 145 and 155°C .

6. Procedure

6.1 Ignite the crucible in the muffle furnace at $650 \pm 25^\circ\text{C}$ for 1 h. Place the crucible in the desiccator. Cool to room temperature and weigh to the nearest 0.1 mg.

6.2 Dry an adequate sample of activated carbon to constant weight at $150 \pm 5^\circ\text{C}$ (3 h is usually sufficient).

Note 1—Some carbons can ignite spontaneously at 150°C . In this case, moist carbon should be used with a correction for moisture (in accordance with Methods D 2867) applied in the calculations. In this case, the ashing should be started in a cold muffle furnace.

6.3 Weigh out to the nearest 0.1 mg sufficient dried activated carbon, so that the estimated amount of ash will be 0.1 g, into the ignited crucible and place the crucible in the furnace at $650 \pm 25^\circ\text{C}$. Ashing will require from 3 to 16 h, depending on the size and type of activated carbon. Ashing can be considered complete when constant weight is achieved.

6.4 Place the crucible in the desiccator and allow to cool to room temperature. After the sample has cooled in the desiccator, admit air slowly to avoid loss of ash from the crucible. Weigh to the nearest 0.1 mg.

7. Calculation

7.1 Calculate the ash content as follows:

$$\text{Total ash, \%} = [(D - B)/(C - B)] \times 100 \quad (1)$$

where:

B = weight of crucible, g.

C = weight of crucible plus original sample, g, and

D = weight of crucible plus ashed sample, g.

8. Precision and Bias⁴

8.1 *Precision:*

8.1.1 *Interlaboratory Test Program*—An interlaboratory study was run in which representative samples of three types of activated carbon (coconut-shell based (A), coal-based (B), and wood-based (C)) were tested for ash content by six laboratories with each laboratory making three observations of each activated carbon type over three days. Practice E 691 was

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D-28 on Activated Carbon and is the direct responsibility of Subcommittee D28.04 on Gas Phase Evaluation Tests.

Current edition approved Feb. 15, 1994. Published April 1994. Originally published D 2866 – 70. Last previous edition D 2866 – 83 (1988).

² *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 15.01.

³ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 14.02.

⁴ Supporting data have been filed at ASTM Headquarters and may be obtained by requesting RR: D 28-1004.



Standard Test Method for Volatile Matter Content of Activated Carbon Samples¹

This standard is issued under the fixed designation D 5832; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last approval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or approval.

1. Scope

1.1 This test method covers the determination of the percentage of gaseous products, exclusive of moisture vapor, present in virgin and used activated carbons which are released under specific conditions of the test.

1.2 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

- 2.1 *ASTM Standards:*
D 2652 Terminology Relating to Activated Carbon²
D 2867 Test Method for Moisture in Activated Carbon²
D 3175 Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke³

3. Terminology

3.1 *Definitions*—For definitions of terms used in this test method relating to activated carbon, refer to Terminology D 2652.

4. Summary of Test Method

4.1 Volatile matter is determined by establishing the loss in mass resulting from heating an activated carbon sample under rigidly controlled conditions. The measured mass loss, corrected for moisture as determined in Test Method D 2867, establishes the volatile matter content of the activated carbon sample.

5. Significance and Use

5.1 Volatile matter, when determined as herein described, may be used as a relative measure of the extent of carbonization in an activated carbon and the extent of loading of volatile material on an activated carbon that has been used in an adsorption application.

5.2 Combined with other information, the volatile matter of an activated carbon may be useful in evaluating its performance in an adsorption application.

5.3 Other automated methods for the determination of the volatile content of solids, such as using a thermogravimetric analyzer (TGA), can be used in place of this test method with equally reliable results.

6. Apparatus

- 6.1 *Crucible and Cover*, high temperature porcelain, high form, 30 cc capacity.
6.2 *Oven*, forced-air circulation, capable of temperature regulation up to 250°C.
6.3 *Moisture Determination Apparatus*, as described in Test Method D 2867.
6.4 *Muffle Furnace*, gravity circulation, capable of temperature regulation at $950 \pm 25^\circ\text{C}$. An electric furnace similar to the one described in Test Method D 3175 is suitable for use in this test method.
6.5 *Desiccator*, glass with indicating type desiccant.
6.6 *Balance*, analytical, capable of 0.1 mg sensitivity.

7. Hazards

- 7.1 The furnace used in this test method should be located in a well ventilated area to eliminate exposure to possible toxic vapors that may evolve from the carbon sample during the high temperature heating.
7.2 Exercise care when working with the high temperature furnace to eliminate the possibility of burns.

8. Procedure

- 8.1 Determine the moisture content of an as-received representative portion of the sample using the Xylene-Extraction Test Method described in D 2867. If the as-received sample is wet, drain it of all free liquid before the representative sample is taken.
8.2 Weigh to 0.1 mg accuracy a crucible and cover that have been ignited in a muffle furnace regulated at 950°C for 30 min and cooled in a desiccator. Record the weight.
8.3 Using a spoon or spatula, dip from the sample bottle approximately 1 g of the as-received sample and place it in the pre-dried and tared crucible. Cover it with a lid and immediately weigh it to the nearest 0.1 mg.

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D28 on Activated Carbon and is the direct responsibility of Subcommittee D28.04 on Gas Phase Evaluation Tests.

Current edition approved March 10, 2003. Published July 2003. Originally approved in 1995. Last previous edition approved in 1998 as D 5832 – 98.

² *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 15.01.

³ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 05.05.



Standard Test Method for Apparent Density of Activated Carbon¹

This standard is issued under the fixed designation D 2854; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last approval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope

1.1 This test method covers the determination of the apparent density of granular activated carbon. For purposes of this test method, granular activated carbon is defined as a minimum of 90 % being larger than 80 mesh.

1.2 This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

- D 2862 Test Method for Particle Size Distribution of Granular Activated Carbon²
- D 2867 Test Method for Moisture in Activated Carbon²
- E 177 Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods³
- E 300 Practice for Sampling Industrial Chemicals⁴
- E 542 Practice for Calibration of Laboratory Volumetric Apparatus⁵

3. Summary of Test Method

3.1 Apparent density (bulk density) is determined on a granular sample by measuring the volume packed by a free fall from a vibrating feeder into an appropriately sized graduated cylinder and determining the mass of the known volume. Other packing procedures can result in different apparent densities.

4. Significance and Use

4.1 This test method provides a method for determining the packed density of a bed of granular activated carbon. Determination of the packed density is essential when designing vessels to hold the material and for ordering purposes when procuring materials to fill existing vessels.

5. Apparatus (see Fig. 1)

5.1 Reservoir Funnel, fabricated of glass or metal.

5.2 Feed Funnel, glass or metal.

5.3 Vibratory Feeder,⁶ such as shown in Fig. 1 or similar.

5.4 Cylinders, graduated 100, 250, or 500 mL, calibrated "to contain" (TC).

5.5 Balance, having a sensitivity of 0.1 g.

6. Procedure

6.1 Select a 100, 250, or 500 mL graduated cylinder appropriate for the particle size of the activated carbon to be tested. The inside diameter of the cylinder shall be at least 10 times the mean particle diameter (MPD) as determined by Test Method D 2862.

6.2 If desired, the graduated cylinder may be calibrated by the user in accordance with Practice E 542.

6.3 Obtain a representative sample of activated carbon in accordance with Practice E 300. Carefully place the sample of activated carbon into the reservoir funnel so that the material does not prematurely flow into the graduated cylinder. If this occurs, return the material to the reservoir funnel.

6.4 The feed funnel should have an outside diameter which just fits inside the chosen graduated cylinder. Adjust the height of the reservoir funnel above the vibrator trough so that a free flow of material is obtained. The drawing in Fig. 1 shows a typical apparatus using a 100 mL TC graduated cylinder.

6.5 Add the sample to the cylinder using the vibratory feeder through the feed funnel. Adjust the flow rate control to fill the cylinder at a uniform rate not less than 0.75 or exceeding 1.0 mL/s up to the mark corresponding to the volume chosen. The graduated cylinder shall be filled to at least 50 % of its capacity.

6.6 Transfer the contents from the cylinder to a balance pan and weigh to the nearest 0.1 g.

7. Calculation

7.1 Calculate the as-received apparent density as follows:

$$\text{as-received apparent density, g/mL} = \frac{\text{mass of activated carbon in grams}}{\text{carbon volume in millilitres}} \quad (1)$$

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D-28 on Activated Carbon and is the direct responsibility of Subcommittee D28.04 on Gas Phase Evaluation Tests.

Current edition approved April 10, 1996. Published June 1996. Originally published as D 2854 – 70. Last previous edition D 2854 – 89 (1993)¹.

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.01.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.02.

⁴ Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.05.

⁶ A suitable vibratory feeder is the model F-70 vibrating feeder with standard trough 1½ by 12 in. and controller. This unit is available from FMC Corporation, Material Handling Equipment Division, 57 Cooper Ave., Homer City, PA 15748. Similar equipment is available from other suppliers.

Anexo D

Norma Peruana y mexicana para la determinación de la calidad de carbón activado.

CARACTERISTICAS DEL CARBÓN ACTIVADO	
PARÁMETROS	NTP 207.024
Densidad (g/cm ³)	0.35 - 0.4
Humedad (%)	Máx. 12 %
Cenizas Totales	Máx. 12 %
pH	5.5 - 7.5

6. ESPECIFICACIONES

Los carbones activados empleados en la refinación de azúcar en sus dos tipos y un solo grado de calidad deben cumplir con las siguientes especificaciones:

6.1 Carbones activados pulverizados

6.1.1 Apariencia Polvo negro

6.1.2 pH 6.0 a 8.5

6.1.3 Contenido de humedad % máximo 12,0 al envasar

6.1.4 Densidad aparente g/cm³ máximo 0,4

6.1.5 Contenido total de cenizas % máximo 12,0

6.1.6 Tamaño de partículas % mínimo 95,0 NOM-80 M (200 U.S.)

6.2 Carbones activados granulares

6.2.1 pH 5,5 a 8,0

6.2.2 Contenido de humedad % 12,0 al envasar.

6.2.3 Densidad aparente g/cm³ máximo 0,46

6.2.4 Contenido total de cenizas % máximo 12,5