



UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y DE LA SALUD

CARRERA DE INGENIERIA QUIMICA

**OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE CÁSCARA DE
"CRESCENTIA CUJETE" (TOTUMO O MATE) PARA LA ADSORCIÓN
DE ORO POR MEDIO DE SOLUCIONES CIANURADAS**

**TORO SAGBAY WALTER GEOVANNY
INGENIERO QUIMICO**

**CAMPOVERDE LOOR JEANS STEEVEN
INGENIERO QUIMICO**

**MACHALA
2024**



UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y DE LA SALUD

CARRERA DE INGENIERIA QUIMICA

**OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE
CÁSCARA DE "CRESCENTIA CUJETE" (TOTUMO O MATE)
PARA LA ADSORCIÓN DE ORO POR MEDIO DE SOLUCIONES
CIANURADAS**

**TORO SAGBAY WALTER GEOVANNY
INGENIERO QUIMICO**

**CAMPOVERDE LOOR JEANS STEEVEN
INGENIERO QUIMICO**

**MACHALA
2024**



UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y DE LA SALUD

CARRERA DE INGENIERIA QUIMICA

TRABAJOS EXPERIMENTALES

**OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE
CÁSCARA DE "CRESCENTIA CUJETE" (TOTUMO O MATE)
PARA LA ADSORCIÓN DE ORO POR MEDIO DE
SOLUCIONES CIANURADAS**

**TORO SAGBAY WALTER GEOVANNY
INGENIERO QUIMICO**

**CAMPOVERDE LOOR JEANS STEEVEN
INGENIERO QUIMICO**

ESPINOZA RAMON WASHINGTON OMAR

**MACHALA
2024**

OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE CÁSCARA DE “CRESCENTIA CUJETE” (TOTUMO O MATE) PARA LA ADSORCIÓN DE ORO POR MEDIO DE SOLUCIONES CIANURADAS

por Geovanny Toro Sagbay

Fecha de entrega: 13-ago-2024 03:49p.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2431663419

Nombre del archivo: TESIS_CAMPOVERDE_-_TORO.pdf (1.48M)

Total de palabras: 14079

Total de caracteres: 72828

OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE CÁSCARA DE "CRESCENTIA CUJETE" (TOTUMO O MATE) PARA LA ADSORCIÓN DE ORO POR MEDIO DE SOLUCIONES CIANURADAS

INFORME DE ORIGINALIDAD

8%

INDICE DE SIMILITUD

6%

FUENTES DE INTERNET

1%

PUBLICACIONES

1%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	2%
2	Submitted to Universidad Técnica de Machala Trabajo del estudiante	1%
3	zagan.unizar.es Fuente de Internet	1%
4	docplayer.es Fuente de Internet	1%
5	doaj.org Fuente de Internet	<1%
6	scielo.sld.cu Fuente de Internet	<1%
7	revistas.udca.edu.co Fuente de Internet	<1%
8	tesis.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	<1%

9	es.slideshare.net Fuente de Internet	<1 %
10	ojs.tdea.edu.co Fuente de Internet	<1 %
11	www.scielo.org.mx Fuente de Internet	<1 %
12	es.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
13	Submitted to Universidad Politécnica de Madrid Trabajo del estudiante	<1 %
14	Submitted to Universidad del Atlántico Trabajo del estudiante	<1 %
15	revistas.unicordoba.edu.co Fuente de Internet	<1 %
16	C. Mileto, F. Vegas, V. Cristini. "Rammed Earth Conservation", CRC Press, 2019 Publicación	<1 %
17	Submitted to Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez Trabajo del estudiante	<1 %
18	sedici.unlp.edu.ar Fuente de Internet	<1 %
19	www.rlc.fao.org Fuente de Internet	<1 %

20

Submitted to Universidad Nacional de Colombia

Trabajo del estudiante

<1 %

21

Submitted to Universidad Pontificia Bolivariana

Trabajo del estudiante

<1 %

22

doczz.es

Fuente de Internet

<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 15 words

Excluir bibliografía

Activo

CLÁUSULA DE CESIÓN DE DERECHO DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL

Los que suscriben, TORO SAGBAY WALTER GEOVANNY y CAMPOVERDE LOOR JEANS STEEVEN, en calidad de autores del siguiente trabajo escrito titulado OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE CÁSCARA DE “CRESCENTIA CUJETE” (TOTUMO O MATE) PARA LA ADSORCIÓN DE ORO POR MEDIO DE SOLUCIONES CIANURADAS, otorgan a la Universidad Técnica de Machala, de forma gratuita y no exclusiva, los derechos de reproducción, distribución y comunicación pública de la obra, que constituye un trabajo de autoría propia, sobre la cual tienen potestad para otorgar los derechos contenidos en esta licencia.

Los autores declaran que el contenido que se publicará es de carácter académico y se enmarca en las disposiciones definidas por la Universidad Técnica de Machala.

Se autoriza a transformar la obra, únicamente cuando sea necesario, y a realizar las adaptaciones pertinentes para permitir su preservación, distribución y publicación en el Repositorio Digital Institucional de la Universidad Técnica de Machala.

Los autores como garantes de la autoría de la obra y en relación a la misma, declaran que la universidad se encuentra libre de todo tipo de responsabilidad sobre el contenido de la obra y que asumen la responsabilidad frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros de manera exclusiva.

Aceptando esta licencia, se cede a la Universidad Técnica de Machala el derecho exclusivo de archivar, reproducir, convertir, comunicar y/o distribuir la obra mundialmente en formato electrónico y digital a través de su Repositorio Digital Institucional, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico.



TORO SAGBAY WALTER GEOVANNY

0706163961



CAMPOVERDE LOOR JEANS STEEVEN

0707061883

UNIVERSITAS
MAGISTRORUM
ET SCHOLARIUM

DEDICATORIA

Esta investigación está dedicada, en primer lugar, a Dios, quien guía cada uno de mis pasos y me otorga la fortaleza para enfrentar las adversidades. A mis padres, Manuel y Diana, por su incansable sacrificio, dedicación y constante apoyo, quienes me han formado en la persona que soy hoy. A mi compañera de vida, cuyo amor y sabiduría me han acompañado y alentado en cada momento de este camino. A mi hija Arleth, por ser la mayor fuente de alegría en mi vida, y a mis hermanos y abuelos, por su presencia incondicional y su apoyo constante.

Jeans Steeven Campoverde Loor

Primeramente, a Dios, a mis padres por su apoyo incondicional a todo momento en este transcurso académico. Su apoyo ha sido primordial en esta etapa y me ayudado a sobresalir en cada circunstancia que se presenta.

A mi familia por los consejos y por su confianza, han sido ese soporte el cual no me ha dejado rendir ante los malos momentos y me han dado esa fuerza necesaria para seguir adelante y poder culminar con esta meta.

Walter Geovanny Toro Sagbay

AGRADECIMIENTO

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a todas las personas que nos apoyaron a lo largo de esta investigación, siempre dispuestas a ofrecer su orientación y asistencia. A los maestros que, con su invaluable ayuda y consejos, nos guiaron en el cumplimiento de cada uno de los objetivos planteados. Agradecemos también a todos aquellos que, de una u otra manera, formaron parte de este camino académico e influyeron positivamente en nuestro crecimiento personal y profesional.

RESUMEN

La presente investigación se centra en la obtención de carbón activado a partir de la cáscara de "*Crescentia Cujete*" (comúnmente conocida como totumo o mate) con el objetivo de evaluar su capacidad de adsorción de oro en soluciones cianuradas. Este estudio se llevó a cabo en respuesta a la necesidad de desarrollar materiales adsorbentes efectivos y de bajo costo, que puedan ser utilizados en la recuperación de metales preciosos en la minería. Inicialmente, se realizó un análisis del porcentaje de carbono orgánico presente en la materia prima, utilizando la metodología de Walkey Black, obteniendo un 50,44% de contenido de carbono orgánico en la cáscara.

Este valor proporcionó una base para establecer las condiciones de calcinación necesarias en la preparación del carbón activado. El proceso de preparación del carbón activado comenzó con la trituración y tamizado de la cáscara adaptando hasta un tamaño de partícula entre 0.5 y 2 mm, seguido de un lavado con agua destilada para eliminar impurezas. Posteriormente, se llevó a cabo la activación química mediante la impregnación de la cáscara con ácido fosfórico (H_3PO_4) al 85%, un proceso que fue repetido para asegurar una activación homogénea.

La mezcla resultante fue sometida a agitación continua durante 24 horas y luego lavada nuevamente hasta alcanzar un pH neutro. La carbonización se realizó a diferentes temperaturas (450°C, 475°C y 500°C) en ausencia de oxígeno para evitar la formación de cenizas, determinando así el tratamiento óptimo. El análisis de los rendimientos de carbón activado mostró un promedio del 55,05%, lo que sugiere la presencia de una estructura macro y microporosa en el carbón activado, conforme a estudios previos. Sin embargo, el rendimiento relativamente bajo indica que las condiciones de activación y el tipo de químico utilizado influyen significativamente en las propiedades del carbón.

Para evaluar la capacidad de adsorción de oro, se realizaron pruebas comparativas entre el carbón activado obtenido de la cáscara de "*Crescentia Cujete*" y un carbón activado comercial de cáscara de coco (HAYCARB) utilizando una solución cianurada obtenida de la lixiviación de un mineral aurífero del Cantón Camilo Ponce Enríquez con una concentración inicial de 2,549 ppm. Las pruebas se realizaron en un reactor de vidrio encamisado bajo condiciones normales de temperatura y presión, dicha prueba

se monitoreó durante 12 horas, registrando tomas de muestra cada hora para ser analizados utilizando espectroscopia de adsorción atómica.

Estos resultados sugieren que, aunque el carbón activado de "*Crescentia Cujete*" tiene una capacidad de adsorción inicial más baja en comparación con el carbón comercial, su capacidad de adsorción mejora con el tiempo, lo que podría hacerlo adecuado para aplicaciones en las que se requiera una adsorción sostenida. La diferencia en las propiedades fisicoquímicas entre ambos tipos de carbón activado subraya la importancia de ajustar las condiciones de activación y carbonización para optimizar la eficiencia del material en la adsorción de metales preciosos como el oro.

Palabras claves: Carbón activado, "*Crescentia Cujete*", adsorción de oro, solución cianurada, activación química

ABSTRACT

The present research is focused on obtaining activated carbon from the shell of "*Crescentia Cujete*" (commonly known as totumo or mate) with the objective of evaluating its capacity to adsorb gold in cyanide solutions. This study was carried out in response to the need to develop effective and low-cost adsorbent materials that can be used in the recovery of precious metals in mining. Initially, an analysis of the percentage of organic carbon present in the raw material was carried out using the Walkley Black methodology, obtaining a 50.44% organic carbon content in the peel.

This value provided a basis for establishing the calcination conditions necessary for the preparation of the activated carbon. The activated carbon preparation process began with the crushing and sieving of the shell to a particle size between 0.5 and 2 mm, followed by washing with distilled water to remove impurities. Subsequently, chemical activation was carried out by impregnating the peel with 85% phosphoric acid (H_3PO_4), a process that was repeated to ensure homogeneous activation. The resulting mixture was subjected to continuous agitation for 24 hours and then washed again until a neutral pH was reached.

Carbonization was carried out at different temperatures (450°C, 475°C and 500°C) in the absence of oxygen to avoid ash formation, thus determining the optimum treatment. Analysis of the activated carbon yields showed an average of 55.05%, suggesting the presence of a macro- and microporous structure in the activated carbon, in accordance with previous studies. However, the relatively low yield indicates that the activation conditions and the type of chemical used significantly influence the properties of the carbon.

To evaluate the gold adsorption capacity, comparative tests were carried out between the activated carbon obtained from "*Crescentia Cujete*" shell and a commercial coconut shell activated carbon (HAYCARB) using a cyanide solution obtained from canton Camilo Ponce Enríquez with an initial concentration of 2,549 ppm. The tests were carried out in a jacketed glass reactor under normal temperature and pressure conditions. The test was monitored for 12 hours, recording hourly samples to be analyzed using atomic adsorption spectroscopy.

These results suggest that, although the activated carbon from "*Crescentia Cujete*" has a lower initial adsorption capacity compared to commercial carbon, its adsorption capacity improves with time, which could make it suitable for applications where sustained adsorption is required. The difference in physicochemical properties between the two types of activated carbon underlines the importance of adjusting the activation and carbonization conditions to optimize the efficiency of the material in the adsorption of precious metals such as gold.

Keywords: Activated carbon, "*Crescentia Cujete*", gold adsorption, cyanide solution, chemical activation.

ÍNDICE

Pág.

DEDICATORIA	- 3 -
AGRADECIMIENTO	- 4 -
RESUMEN	- 5 -
ABSTRACT	- 7 -
INTRODUCCIÓN	- 16 -
OBJETIVOS	- 18 -
OBJETIVO GENERAL	- 18 -
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	- 18 -
1. MARCO TEÓRICO	- 19 -
1.1 Antecedentes	- 19 -
1.2 “<i>Crescentia Cujete</i>” (Totumo o mate)	- 20 -
1.2.1 <i>Características y definición</i>	- 20 -
1.2.2 <i>Propiedades químicas y biológicas</i>	- 20 -
1.2.3 <i>Origen y disponibilidad</i>	- 21 -
1.2.4 <i>Innovaciones en su uso</i>	- 22 -
1.2.5 <i>Composición</i>	- 22 -
1.2.6 <i>Usos y propiedades</i>	- 23 -
1.3 Carbón Activado	- 23 -
1.3.1 <i>Introducción al carbón activado</i>	- 23 -
1.3.2 <i>Innovaciones de su uso</i>	- 24 -
1.3.3 <i>Estructura y tipos de carbón</i>	- 25 -
1.3.4 <i>Usos y aplicaciones del carbón activado</i>	- 26 -
1.3.5 <i>Fuentes de obtención</i>	- 27 -
1.3.6 <i>Composición química</i>	- 27 -
1.3.7 <i>Propiedades químicas del carbón activado</i>	- 28 -
1.3.8 <i>Activación del carbón</i>	- 29 -
1.3.9 <i>Capacidad de adsorción y regeneración del carbón activado</i>	- 31 -
1.3.10 <i>Métodos de regeneración para carbón activado</i>	- 31 -
1.4 Adsorción de oro (Au)	- 32 -
1.4.1 <i>Mecanismos</i>	- 33 -
1.4.2 <i>Materiales y Sorbentes</i>	- 34 -
1.4.3 <i>Factores que afectan la Adsorción de Oro</i>	- 34 -

1.4.4	<i>Cinética y Termodinámica</i>	- 35 -
1.4.5	<i>Optimización de Procesos</i>	- 36 -
1.4.6	<i>Desorción y Recuperación de Oro</i>	- 36 -
1.5	Método de pirolisis	- 37 -
1.5.1	<i>Introducción a la pirolisis</i>	- 37 -
1.5.2	<i>Fundamentos Teóricos de la Pirólisis</i>	- 38 -
1.5.3	<i>Tipos de pirólisis</i>	- 40 -
1.5.4	<i>Mecanismos de Reacción en la Pirólisis</i>	- 40 -
1.5.5	<i>Productos del método de pirolisis</i>	- 41 -
1.5.6	<i>Factores que afectan el proceso de pirólisis</i>	- 42 -
1.5.7	<i>Equipos para la Pirólisis</i>	- 43 -
1.5.8	<i>Aplicaciones de los Productos de la Pirólisis</i>	- 45 -
1.6	Soluciones cianuradas	- 45 -
1.6.1	<i>Introducción a las Soluciones Cianuradas</i>	- 45 -
1.6.2	<i>Aplicaciones de Soluciones Cianuradas en la Industria</i>	- 46 -
2.	METODOLOGÍA	- 48 -
2.1	Tipo de investigación	- 48 -
2.2	Población y muestra	- 48 -
2.3	Ubicación de la experimentación	- 48 -
2.4	Tipo de variables	- 49 -
2.4.1	<i>Variables independientes</i>	- 49 -
2.4.2	<i>Variables dependientes</i>	- 49 -
2.5	Diseño experimental	- 50 -
2.6	Técnicas	- 51 -
2.6.1	<i>Recolección de la materia prima</i>	- 51 -
2.6.2	<i>Equipos, materiales e insumos</i>	- 51 -
2.6.3	<i>Pretratamiento</i>	- 52 -
2.6.4	<i>Secado</i>	- 53 -
2.6.5	<i>Triturado</i>	- 53 -
2.6.6	<i>Preparación del adsorbente</i>	- 53 -
2.6.7	<i>Lavado de la materia prima</i>	- 53 -
2.6.8	<i>Secado de la materia prima</i>	- 54 -
2.6.9	<i>Activación química y lavado</i>	- 54 -
2.6.10	<i>Obtención del carbón activado</i>	- 54 -
3.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	- 55 -
3.1	Análisis de “Crescentia Cujete”	- 55 -
3.2	Preparación del carbón activado	- 55 -

3.3 Adsorción	- 59 -
3.3.1 <i>Comparación de resultados del carbón activado obtenido</i>	- 60 -
CONCLUSIONES	- 64 -
RECOMENDACIONES	- 65 -
BIBLIOGRAFÍA	- 66 -
ANEXOS	- 74 -

Tabla 1. Composición química de la cáscara y carbón activado del coco (Cocos nucifera L)	- 27 -
Tabla 2. Ventajas y desventajas de los métodos de activación de materiales carbonosos	- 29 -
Tabla 3. Efecto del proceso de pirólisis y de los parámetros en el rendimiento de los productos de pirólisis.	- 38 -
Tabla 4. Parámetros operativos y productos típicos para el proceso de pirólisis	- 43 -
Tabla 5. Factores y niveles de la investigación	- 50 -
Tabla 6. Tratamientos establecidos para la investigación	- 50 -
Tabla 7. Equipos, materiales e insumos	- 51 -
Tabla 8. Contenido de carbono orgánico de la cáscara de “Crescentia Cujete”	- 55 -
Tabla 9. Relación entre la densidad y la masa de la cáscara de “Crescentia Cujete”- 56 -	-
Tabla 10. Temperaturas y tiempo empleados en la carbonización.....	- 57 -
Tabla 11. Análisis de contenido de carbono orgánico	- 57 -
Tabla 12. Rendimiento del carbón activado obtenido	- 58 -
Tabla 13. Parámetros establecidos para la prueba de adsorción de Oro (Au).....	- 59 -
Tabla 14. Capacidad de adsorción del carbón activado comercial de la cáscara de “Cocos nucifera L” (Coco).....	- 60 -
Tabla 15. Capacidad de adsorción del carbón activado obtenido de la cáscara de “Crescentia Cujete”	- 61 -

ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Ubicación del sitio de recolección de muestra.....	- 49 -
Figura 2. Diagrama de flujo del pretratamiento de la materia prima	- 53 -
Figura 3. Cinética de adsorción de oro (Au).....	- 62 -

ÍNDICE DE ECUACIONES

Pág.

Ecuación 1. Rendimiento de carbón activado en porcentaje - 58 -
Ecuación 2. Capacidad de adsorción..... - 62 -

ÍNDICE DE ANEXOS

Pág.

Anexo A. Recolección de la materia prima.....	- 74 -
Anexo B. Fruto del “Crescentia Cujete” (totumo o mate).....	- 75 -
Anexo C. Corte, extracción de pulpa y lavado de la cáscara de “Crescentia Cujete”- -	76
Anexo D. Trituración de la cáscara	- 77 -
Anexo E. Activación de la materia prima	- 78 -
Anexo F. Carbonización de la materia prima a una temperatura y tiempo establecido.. 79 -	
Anexo G. Prueba de adsorción por medio de la solución pregnant cianurada	- 80 -
Anexo H. Toma de muestras por cada hora durante 12 horas	- 81 -

INTRODUCCIÓN

La eficiencia en la recuperación de oro ha sido una relevancia global dentro de los distintos países que se dedican a la extracción de oro, el proceso tradicional de adsorción es del carbón activado el cual se ha ido implementando muy seguido y ha sido eficiente dentro de las industrias mineras, y debido a la dependencia de las materias primas para producir carbón activado convencional se ha generado un impacto económico y ambiental, y la competencia también se ha ido incrementando debido a que la obtención se puede dar por diversas materias primas que tengan la capacidad para adsorber.

El carbón activado es un adsorbente sumamente versátil y costoso debido a las características de tamaño y distribución de los poros en su estructura. Los carbones activados disponibles comercialmente se elaboran a partir de materiales precursores con una alta estructura carbonosa, cuya composición puede ser ajustada para cumplir con las exigencias tecnológicas actuales. Mediante el uso de recursos renovables como lo es el "*Crescentia Cujete*" (totumo o mate) se busca hacer un carbón nuevo que sirva dentro del mercado y al mismo tiempo no tengan un costo elevado o que su proceso no sea contaminante, en caso de obtener un carbón con una buena capacidad adsorbente.

La selección del precursor depende de factores como su disponibilidad, costo y pureza, pero es igualmente importante considerar el proceso de fabricación y las posibles aplicaciones del producto final. La cáscara de "*Crescentia Cujete*" es un residuo agroindustrial ampliamente disponible en ciertas regiones, que cuenta con un contenido significativo de carbono, lo que la convierte en un material con gran potencial para la producción de carbón activado. Esta opción se presenta como una alternativa viable y sostenible, contribuyendo a la economía y ayudando a mitigar los impactos ambientales asociados con el uso de recursos no renovables en la fabricación de carbón activado.

En este trabajo se presenta una investigación sobre la obtención de carbón activado en donde se utiliza como materia prima la cáscara de "*Crescentia Cujete*" (totumo o mate) y su aplicación en la adsorción de soluciones cianuradas. Se busca que el método de la pirolisis nos permita obtener un carbón activado eficiente, ya que es una técnica muy utilizada en este tipo de procesos y además es muy simple, los resultados de esta investigación podrían contribuir al desarrollo de tecnologías de recuperación de oro en la industria minera.

Existen procesos químicos dentro de la industria minera y su impacto ambiental es muy elevado en algunas zonas del país, el carbón activado a pesar de ser utilizado para la adsorción también podría ser una solución al tratamiento de aguas las cuales son contaminadas dentro de las zonas aledañas a las industrias que provocan la contaminación de ríos o suelos los cuales van elevando de a poco su impacto. A sí mismo, si el carbón tiene una buena capacidad adsorbente y una buena eficiencia se lo podrá implementar en otras aplicaciones y esto ayudaría mucho en el ambiente y en los costos que llega a tener la producción de carbones dentro de las industrias mineras.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Obtener carbón activado de la cáscara del "*Crescentia Cujete*" (totumo o mate) mediante el proceso de pirolisis lenta para la adsorción de oro a partir de soluciones cianuradas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- * Determinar el porcentaje de carbono de la cáscara de "*Crescentia Cujete*" (totumo o mate) por medio de un análisis químico.
- * Elaborar carbón activado por medio de la cáscara de "*Crescentia Cujete*" mediante activación química por impregnación de ácido fosfórico al 85% utilizando el proceso de pirolisis lenta.
- * Comparar la capacidad de adsorción del carbón obtenido frente al carbón comercial mediante una solución pregnant obtenida en una planta de beneficio del cantón Camilo Ponce Enríquez.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Antecedentes

Según la investigación de Zambrano y Pérez (2021) en Venezuela, se desarrolló un proceso para producir carbón activado a partir del endocarpio de coco, utilizando hidróxido de potasio (KOH) como agente activador. Se realizaron pruebas de adsorción con anaranjado de metilo a diferentes concentraciones, midiendo los resultados en tiempos establecidos. Los resultados mostraron que el carbón activado obtenido tiene un alto potencial para adsorber y remover contaminantes. Además, se determinó que la isoterma de Langmuir fue la más adecuada para describir el proceso de adsorción en este estudio.¹

En el estudio realizado por (Tubón) en Ecuador; 2021 se realizó el estudio de adsorción de plomo con carbón activado obtenido de la cáscara de "*Crescentia Cujete*" mediante la carbonización física y química artesanalmente. Se hizo una comparación de los carbones obtenidos el cual se tuvo en cuenta el porcentaje de humedad, las cenizas que poseen, la densidad aparente de cada uno de ellos y el pH. Los carbones activados químicamente fueron más eficientes que los carbones activados físicamente, pero según la norma ASTM (American Society for Testing and Materials) y los rangos que presentaron no son precisos ni eficientes para ser aplicados en la remoción de plomo.²

En los países sudamericanos la recuperación de oro, a mediana escala se opera mediante el proceso conocido como Merrill-Crawe, el cual genera una baja selectividad del metal a recuperar así como del oxígeno, por lo que el método de recuperación mediante adsorción con carbón activado es una alternativa muy rentable puesto que esta técnica incluye una mayor selectividad del oro y elimina sustancias no deseadas, debido al proceso de filtración y adicción de los fragmentos de carbón activado sobre la pulpa de cianuración.³

1.2 “*Crescentia Cujete*” (Totumo o mate)

1.2.1 *Características y definición.* La característica principal se basa en el fruto, la cual tiene forma esférica con cáscara dura y fibrosa, además, posee en su interior una pulpa de textura gelatinosa donde contiene numerosas semillas. Las investigaciones realizadas hasta ahora se han enfocado principalmente en la pulpa del fruto, dedicando menos atención a las hojas, la corteza y otras partes de la planta.⁴

El árbol “*Crescentia Cujete*”, conocido comúnmente como totumo o mate, es mencionado por diferentes nombres en diversos países, como calabazo, cuya, mate, totumo, totumo cimarrón, totumo grande y entre otras denominaciones que han venido surgiendo tras la utilización de esta fruta que se da en sectores trópicos para su formación.⁵

De acuerdo con López et al.⁵, este árbol de copa abierta tiene ramas largas y hojas caducifolias. Puede llegar a medir entre 4 y 14 metros de altura y presenta una corteza escamosa. Su fruto adopta formas cilíndricas u ovoides, con una cáscara verde brillante, y en su interior contiene una pulpa blanca repleta de semillas elipsoides. Esta especie, que se encuentra en regiones tropicales y es semicultivada a lo largo de América Tropical, suele crecer en casas de campo, junto a otros árboles frutales.⁶

Esta planta produce frutos grandes de forma ovalada y color verde parduzco, con un diámetro que varía entre 10 y 30 cm. La planta comparte características morfológicas con el ciruelo del oeste de la India y México, también conocido como el árbol de calabaza. Es una planta perenne que se encuentra en las tierras bajas de Mesoamérica, así como en regiones de sabana y zonas de lluvias semitropicales. Los metabolitos secundarios presentes en el extracto de hojas de la planta juegan un papel en la reducción de la actividad alimentaria.⁷

1.2.2 *Propiedades químicas y biológicas.* De acuerdo con ciertas investigaciones, “*Crescentia Cujete*” contiene tres tipos de metabolitos secundarios: flavonoides, esteroides y triterpenos, además de la presencia de metales pesados como cromo, mercurio, entre otros.⁸

Los estudios seleccionados indican que "*Crescentia Cujete*" posee diversas actividades biológicas, incluyendo propiedades antifúngicas, antioxidantes, antiinflamatorias, antimicrobianas, acaricidas, fitotóxicas, citotóxicas e inmunológicas. Los investigadores realizaron bioensayos utilizando distintos organismos, como bacterias, plantas, crustáceos e insectos, entre otros.⁹

En el análisis cuantitativo realizado mediante fluorescencia de rayos X (FRX) con energía dispersiva, se identificaron los distintos elementos que componen el material. Los elementos presentes en mayor concentración fueron potasio (K) con un 32,2 %, calcio (Ca) con un 25,2 % y sodio (Na) con un 15,9 %. También se encontraron elementos en concentraciones intermedias, como hierro (Fe) con un 7,2 %, cloro (Cl) con un 6,6 %, azufre (S) con un 4,3 % y estaño (Sn) con un 3,8 %. Además, se detectaron algunos elementos en cantidades inferiores al 2 %, como fósforo (P), cobre (Cu), zinc (Zn) y silicio (Si).¹⁰

1.2.3 *Origen y disponibilidad.* La especie "*Crescentia Cujete*" se encuentra de forma silvestre en Centroamérica y Suramérica. Se puede reproducir tanto por semillas como por esquejes. Sus principales características físicas incluyen una altura promedio de ocho metros, un diámetro de 25 centímetros, y a partir del octavo año, cada árbol puede producir hasta 27 kg de fruto.¹¹

Este fruto puede tardar entre 5 y 7 meses en madurar completamente. A pesar de sus valiosas propiedades fisicoquímicas y nutricionales para diversos usos agroindustriales, esta especie es poco aprovechada en Colombia, a pesar de que tenga características que se pueden aprovechar en gran cantidad y así mismo sus propiedades fisicoquímicas, también favorece a la nutrición debido a sus componentes que se encuentran en el fruto.¹¹

Según Sánchez et al.¹⁰, tanto "*Crescentia alata*" como "*Crescentia Cujete*" se ajustan a una gran variedad de suelos y climas, desde áreas secas hasta pantanosas. Sin embargo, "*Crescentia Cujete*" es más tolerante a la sombra y prefiere ambientes húmedos, favoreciendo suelos profundos con una textura que varía de arcillosa a franco arcillosa. Por otro lado, "*Crescentia alata*" prospera en terrenos pesados, como los vertisoles, y es altamente resistente a suelos pobres, además de tolerar inundaciones temporales y condiciones de sequía extrema.

1.2.4 *Innovaciones en su uso.* “Sin embargo, no se conocen reportes sobre estudios llevados a cabo en el epicarpio del fruto, por lo que resulta imposible inferir los aspectos farmacológicos o toxicológicos que pudiesen tener lugar tras su utilización, con un propósito diferente al ornamental o tradicional. Por otro lado, de la pulpa del fruto, parte de la especie vegetal más relacionada con el epicarpio, diversas investigaciones han mostrado que tiene una marcada actividad antihemorrágica frente al veneno de la víbora *Bothrops atrox*, de igual forma, es útil como agente anticatarral y en trastornos ginecológicos, en el control de la hipertensión, contra el asma, dolores estomacales, antiparasitario y contra la infertilidad femenina”.⁴

A nivel nacional, a pesar del uso cotidiano y conocimiento de la planta no han existido investigaciones que detallen desde el punto de vista fisicoquímico como esta materia prima (“*Crescentia Cujete*”) puede incidir en el uso industrial, siendo este un factor beneficioso para esta investigación.¹²

El “*Crescentia Cujete*” (totumo o mate) es un recurso natural rico en nutrientes con potencial tanto artesanal como industrial, que aún no ha recibido la atención adecuada para su explotación. Si se aprovecha correctamente, este cultivo podría ayudar a satisfacer la creciente demanda de alimentos para la población y la industria pecuaria. La investigación química sobre este árbol ha permitido identificar la estructura de diversas moléculas presentes en su fruto. Un análisis fitoquímico preliminar revela la presencia general de alcaloides cuaternarios, cromóforos lipófilos y polifenoles en el fruto.¹³

1.2.5 *Composición.* El fruto contiene ácido cianhídrico, ácido crescéntico, ácido clorogénico, ácido cítrico, ácido tánico y ácido tartárico. Además, se han identificado lapachona, ácido gentísico, saponinas y 1,4-naftoquinonas (con actividad citotóxica) como compuestos con potencial para el tratamiento del cáncer. Las semillas tienen un 20 % de aceite, compuesto principalmente por ácido oleico (52 %), ácido linoleico (17 %), ácido palmítico (16 %) y ácido esteárico (10,6 %). También contienen azúcares, ácido crescéntico, β -sitosterol, estigmasterol, y glucósidos iridoides como la asperulosida y la plumierida.¹³

Según López et al.⁵, en el mesocarpio del “*Crescentia Cujete*” se encuentran 68 grupos de metabolitos secundarios, entre los que se incluyen flavonoides, carotenoides, glucósidos iridoides, compuestos fenólicos y derivados de benzoilos y cinamolios.

De esta manera, las características ideales que tendría la materia prima se basa en la estructura porosa inherente con un alto contenido de carbono, además de su abundancia y su costo económico frente a diversas materias primas comerciales que abundan en países en desarrollo, por ejemplo el endocarpio de coco, es un residuo orgánico que se encuentra a disposición en países como Ecuador, Colombia, ya que su cultivo se localiza en zonas tropicales, donde las condiciones climáticas sean las favorables para su crecimiento.¹

1.2.6 *Usos y propiedades.* La cáscara del totumo, que es liviana, resistente y de forma variable, es la parte más utilizada del fruto. Se emplea en la fabricación de utensilios de cocina, instrumentos musicales y artesanías. En algunos lugares, también se utilizan las semillas de totumo, cuyo aceite tiene un sabor y olor similares al aceite de oliva y es rico en proteínas. La "*Crescentia Cujete*" se usa en medicina tradicional para tratar la hipertensión, como purgante, calmante, antifebril y expectorante. Además, la pulpa cocida se utiliza para tratar diarrea, dolores estomacales, resfriados, bronquitis, tos, asma y uretritis.¹⁴

Se empleaba para elaborar utensilios domésticos. Tras ser lavado y secado, su fruto se usa como caja de resonancia en el birimbao, un instrumento musical afrobrasileño, y también como recipiente para líquidos, entre ellos el chimarrão, una infusión amarga similar al mate.⁸

1.3 Carbón Activado

1.3.1 *Introducción al carbón activado.* El carbón activado es muy indispensable en la industria ya que este es muy bueno en la adsorción de metales preciosos, esto se debe a la estructura cristalina teniendo una alta superficie específica. Dentro de su fabricación u obtención se eliminan sustancias volátiles destruyendo enlaces débiles a través de un proceso pirometalúrgico debido a esto el carbón activado tiene la propiedad de adsorber iones metálicos en gran cantidad.¹⁵

En los tiempos pasados se usaba el carbón vegetal como adsorbente ya que poseía en sus propiedades la capacidad de eliminar y retener olores, sabores en distintas ramas en donde se lo aplicaba, esto era favorable previniendo enfermedades. Este carbón se lo aplico como agente decolorante por primera vez a nivel industrial precisamente en la industria azucarera, años más tarde se logró sacar su patente, luego se lo empezó aplicar para tratamiento de gases para filtros de aire el cual sirvió para fabricar mascarillas con filtro de carbón activado para eliminar gases tóxicos dentro de la industria química.¹⁶

Luego surgió el término de adsorción por el científico Kayser el cual describió los materiales carbonizados y su propiedad para atrapar gases. El inventor del carbón activado conocido como Vo Raphael Ostrejko empezó a desarrollar métodos para poder llevar a cabo el carbón activado a nivel industrial y producirlo como se lo hace actualmente, tiempo más tarde sucede la primera guerra mundial la cual hace que exista presencia de gases tóxicos en el ambiente lo que favoreció a la aplicación del carbón activado lo cual empieza el desarrollo de este a nivel industrial el cual tenía distintas formas, esto dependía del uso que se le vaya a dar.¹⁶

Hoy en día, existen diversos materiales para la producción de carbón activado, pero deben cumplir ciertos requisitos: tener un alto contenido de carbono y bajo contenido mineral, ofrecer un buen rendimiento, presentar mínima degradación durante el almacenamiento y, de ser posible, ser económicos.¹⁷

1.3.2 *Innovaciones de su uso.* Muchos investigadores han ido publicando muchas investigaciones sobre la aplicación cuando se trata de la eliminación de metales de soluciones acuosas y también pudiendo usarse en aguas residuales, y estos son eficaces debido a que son fáciles de obtener y también siendo un desperdicio a nivel mundial y nacional, son materiales adsorbentes y que pueden llegar a ser económicos al momento de obtenerlos.¹⁸

1.3.3 *Estructura y tipos de carbón.* La estructura de los poros y los macroporos que posee el carbón activado depende de la materia prima del cual es obtenido o fabricado, aunque no contribuyan mucho en la superficie son de gran ayuda para acceder a los microporos, estos son muy esenciales en la adsorción. Los microporos tienen un tamaño de 2nm los cuales poseen gran capacidad de retención, los mesoporos van de 2-50nm y los macroporos con un tamaño de >50 nm, y estos a su vez retienen moléculas con un tamaño elevado, el nivel de porosidad estará determinado por la materia prima utilizada.¹⁹

La capacidad de adsorción del carbón activado depende principalmente de sus características porosas, como la superficie específica, la distribución del tamaño de los poros y el volumen de estos. Aproximadamente un 15% del carbón activado está compuesto por materia mineral en forma de ceniza. La estructura porosa del carbón activado se genera durante el proceso de carbonización y se desarrolla aún más durante la activación.²⁰

Cada tipo de carbón activado posee una estructura porosa única, y los poros pueden variar en forma y tamaño, abarcando desde menos de un nanómetro hasta mil nanómetros. Los poros se categorizan según su ancho promedio, el cual se define como la distancia entre las paredes de un poro en forma de rendija o el radio de un poro cilíndrico. Esta clasificación estándar de los poros, basada en su ancho, está oficialmente reconocida por la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC).²⁰

Se presenta en polvo, granulado y en pellets cilíndricos. El carbón activado en polvo se lo utiliza en la purificación y clarificación de líquidos, hablando del carbón activado granulado este se lo puede utilizar dentro de la purificación de líquidos y gases, por último, el carbón activado en pellets cilíndricos su principal uso se da en la purificación de gases. Estos mismos poseen una estructura porosa integrada con átomos de carbono variados los cuales establecen grupos superficiales beneficiando la adsorción.¹⁶

Existen dos tipos los cuales se pueden clasificar según el tamaño que tengan las partículas:

1.3.3.1 *Carbón activado en polvo o pulverizado.* Poseen un tamaño entre 15 nm y 25 nm, se regenera de manera más compleja.

1.3.3.2 *Carbón activado granular*. Presentan tamaños de 1 mm y 5 mm, se puede regenerar sin complejidad.

Además, los granulados de carbón activado se dividen en dos tipos: el carbón activado troceado, que se obtiene mediante molienda o tamizado para obtener piezas más grandes, y el carbón activado conformado, que se produce por extrusión de carbón en polvo mezclado con diversos aglomerantes.²¹

El proceso de producción del carbón activado implica la pirolisis controlada y según estudios han indicado que este método es costoso y al mismo tiempo inseguro porque usa temperaturas altas, es por eso que se intenta optar por alternativas más económicas utilizando la diversidad de materia prima que existe, cabe mencionar que la calidad del carbón también va a depender del material que se vaya a utilizar.²²

1.3.4 *Usos y aplicaciones del carbón activado*. El carbón activado se lo puede aplicar en experimentos ya sea en laboratorios o a nivel industrial lo que lo hace muy diverso en sus aplicaciones, y como beneficio es respetuoso con el medioambiente, entre sus aplicaciones más conocidas están la de purificación el cual es muy importante y eficaz al momento de eliminar compuestos dañinos del agua. Aunque el más conocido es el carbón activado granular en ocasiones se prefiere el carbón activado en polvo debido a que presenta una mejor eficiencia y facilidad para usarlo.²³

Industria alimenticia: la descolonización del vinagre; *industria hidrometalurgia*: recuperación de oro; *industria química*: recuperación de solventes orgánicos; *medicina*: remoción de toxinas bactericidas; su aplicación también se la encuentra en la remoción de vapores tóxicos.¹⁵ Existen otras aplicaciones, ya sea en filtros de cigarrillos y también en forros de zapatos, como bien sabemos el carbón en polvo se lo utiliza más en medios líquidos y los granulados en ambos medios.²⁴

El carbón activado tiene varias aplicaciones lo que lo hace muy útil dentro las distintas industrias y en laboratorios ya que presenta una capacidad de adsorción muy buena y de alta porosidad y una estructura superficial muy alta, entre sus propiedades se encuentra también la reutilización pues según el tipo de carbón se lo puede volver a utilizar en caso de que se requiera, inclusive estudios detallan que se lo puede aplicar en la eliminación de gases tóxicos, dentro de la industria se utiliza un carbón granular que en polvo.²³

1.3.5 *Fuentes de obtención.* Por el costo y la disponibilidad siempre se ha preferido los desechos vegetales en la obtención de carbón activado, tienen que ser resistentes y tener una dureza apropiada para que no se reduzca de tamaño durante el uso de este carbón y a su vez no contamine el proceso en donde se lo está aplicando. Entre los carbones activados más utilizados son el tipo celulósico o lignocelulósico que provienen de la madera, de la agricultura como residuos y las cáscaras de frutas como la de coco y las de frutos secos entre ellos el “*Crescentia Cujete*” (totumo o mate) el cual determinaremos la capacidad de adsorción en esta investigación.¹⁹

Un beneficio es que al utilizar este tipo de materia prima las emisiones de CO₂ reducirán siendo un impacto positivo en el medioambiente y así mismo se les da un aprovechamiento a estos residuos. Las propiedades que va a poseer el carbón activado siempre dependerán de la materia prima que utilicemos y así mismo que activación vamos a emplear, en este caso vamos a utilizar el “*Crescentia Cujete*” (totumo o mate) el cual no sabemos cuál será la capacidad de adsorción al obtenerlo, estos están producidos en zonas aledañas o zonas tropicales en forma periódica lo cual será muy beneficioso en cuanto a lo económico.¹⁹

1.3.6 *Composición química.* La composición química la apreciamos en la **Tabla 1**. En ocasiones su composición dependerá de la materia prima y proceso de obtención.

Tabla 1. Composición química de la cáscara y carbón activado del coco (Cocos nucifera L)

Parámetros	Cáscara de coco	Carbón activado
Cantidad de carbono (%)	56.43	75 - 80
Cenizas (%)	1.4	5 - 10
Oxígeno (%)	37.51	60

Hidrógeno (%)

4.16

0.5

Fuente: ^{16,25}

1.3.7 *Propiedades químicas del carbón activado.* Entre sus propiedades se encuentran las cenizas, el agua, el pH, están son muy importantes para su activación ya que de estas propiedades dependerá mucho el rendimiento que tenga el carbón activado.

1.3.7.1 *Cenizas.* Es un porcentaje en peso que se determina mediante el contenido de mineral de un carbón activado, estas cenizas contienen óxido de silicio y óxido de aluminio la cual variará según la materia prima que se emplee. en el proceso para determinar las cenizas los componentes minerales se van convirtiendo poco a poco en los óxidos a los que corresponden.²⁶

1.3.7.2 *Agua.* Se puede determinar el contenido de agua mediante un horno de secado el cual el carbón activado se lo deja secar por tres horas a una temperatura de 150 °C, se lo pesara luego de haberse enfriado en el desecador para así obtener la pérdida de peso. Dependiendo de la humedad y del tipo de carbón activado se necesitará más tiempo de secado y así mismo pueda obtener una masa constante.²⁶

1.3.7.3 *pH.* La determinación del valor de pH es muy importante debido a que de este depende la idoneidad del carbón activado, existen varias maneras de determinar el pH de un carbón activado, pero siempre que sea preciso, en esta situación se realiza un procedimiento que consiste en hervir agua desionizada en un tiempo de cinco minutos para luego dejar enfriar haciendo y el carbón activado se asiente, luego este líquido que sobra se lo decanta para poder determinar el pH mediante un electrodo de vidrio.²⁶

1.3.8 *Activación del carbón.* El carbón activado se lo obtiene mediante pirólisis lenta, esta reacción hará deshidratar el material y así volatilizar las sustancias mediante la carbonización, esto hace que el oxígeno y el nitrógeno se eliminen. Se obtendrá carbón en microcristales, el cual tendrá una adsorción baja para lo cual se procede a realizar su activación y así obtenga una capacidad de adsorción más alta.²¹

En algunas ocasiones se puede llegar a utilizar KOH para realizar la activación, el cual va a influir en los parámetros como es la temperatura, tiempo de carbonización y activación. Se siguen los mismos procedimientos según el tipo de activación que se vaya a experimentar, si se aplica el proceso pirolisis se tendrá que desalojar el oxígeno dentro de la mufla, se tendrá que hacer circular nitrógeno desde una bombona de nitrógeno la cual llegue a la abertura superior de la mufla, se tiene que tener en cuenta que este procedimiento se puede aplicar solo si es necesario.¹

Tabla 2. Ventajas y desventajas de los métodos de activación de materiales carbonosos

Método	Ventajas	Desventajas
Activación física	- Bajo costo.	- Se requiere mayor tiempo de activación. - Se requiere mayor temperatura (800-1000 °C)
Activación química	- Se desarrolla a temperaturas más bajas (400-800 °C). - Desarrolla un alto grado de porosidad. - Proporciona altos rendimientos.	- Se necesita lavado exhaustivo al carbonizado para la eliminación de residuos activantes. - Mayor costo.

Fuente: ¹⁷

1.3.8.1 *Activación química*. La activación química se lleva a cabo en un único paso, aplicándose directamente. En este proceso, la materia prima se trata con ácido fosfórico. Es importante mencionar que, al concluir este procedimiento, el carbón debe ser lavado con una solución neutra para eliminar cualquier residuo del agente químico empleado, y luego se somete a un proceso de calentamiento.¹⁶

El método de pirólisis es una de las formas de activación química, se la aplica al sólido a una temperatura baja, primero el sólido es impregnado con sustancias oxidantes y a temperaturas elevadas. El H_3PO_4 ayuda mucho en el rendimiento del material carbonoso.²⁷

Como es conocido, existen dos formas principales para la producción de carbón activado, las cuales utilizan distintos medios y sustancias que logran que esta materia tenga las características adecuadas para los procesos posteriores, estos son conocidos como la activación física y otra como activación química las cuales nos ayudaran a obtener un carbón activado de alta o baja calidad.²⁸

Una de las ventajas que puede tener este tipo de activación, nos permite llevar el proceso a temperaturas un poco más bajas ya que puede reducir el consumo de energía y también de los costes dependiendo del equipo en donde estemos trabajando porque en ocasiones se puede trabajar en hornos artesanales que no necesitan energía, esto nos ayudara a que el carbón no genere ceniza y que no se quemé.²⁰

Dentro de la activación del carbón se podrán usar productos químicos como son el ácido fosfórico(H_3PO_4), hidróxido de potasio (KOH), carbonato de sodio (Na_2CO_3), cloruro de zinc ($ZnCl_2$) y sulfato de sodio (Na_2SO_4). Así mismo se tendrá que lavar con agua para que se eliminen los residuos que se han ocupado en la activación, en cuanto a su estructura va a depender de la relación que se llegue a ocupar entre la materia prima y el producto químico acompañado de la temperatura de activación según el material del carbón.²⁶

1.3.8.2 *Activación física*. La activación física se efectúa en dos etapas. En primer lugar, la materia prima se somete a un proceso de carbonización a temperaturas elevadas, que varían entre 500 y 1200 °C, en un ambiente sin presencia de oxígeno. Posteriormente, se activa el material ya carbonizado mediante la gasificación del carbón, utilizando vapor de agua, oxígeno o dióxido de carbono (CO_2).¹⁶

Como bien sabemos el carbón activado es uno de los adsorbentes más difíciles y versátil en la industria, es de tipo no grafitizable el cual no tiene una estructura amorfa y aun así presenta un desorden estructural que le da esa porosidad y una química superficial convirtiéndolo en uno de los materiales más usados en este proceso. La isoterma de adsorción permite evaluar la capacidad de adsorción del carbón activado, así como las interacciones energéticas involucradas. Estas interacciones dependen de las propiedades químicas del adsorbente y de la afinidad entre este y el adsorbato o el agua.²⁹

Durante la activación del carbón, es crucial considerar el agente activante y su concentración, así como la temperatura y el tiempo de activación. Estos factores influyen de manera significativa en la capacidad de adsorción que tendrá el carbón activado al finalizar el proceso.³⁰

1.3.9 *Capacidad de adsorción y regeneración del carbón activado.* La adsorción con azul de metileno permite evaluar el carbón activado, proporcionando información sobre su capacidad de adsorción y su superficie. Al comparar las mediciones con diferentes sustancias de ensayo, como la adsorción de yodo, se puede determinar la superficie del carbón activado. Sin embargo, si el carbón contiene cenizas o el contenido de yodo es demasiado bajo, se debe reemplazar el adsorbente.²⁶

El proceso de regeneración consiste en eliminar el material adsorbido mediante medios físicos o químicos manteniendo la estructura original para poder restaurar la eficiencia de adsorción para volver a utilizarse. La restauración o regeneración implica también desorber impurezas desde la superficie del carbón activado y así restaurar la capacidad de adsorción del carbón activado ya saturado.³¹

1.3.10 *Métodos de regeneración para carbón activado.* Existen varios métodos para regenerar el carbón activado, del cual hablaremos de la regeneración térmica, la regeneración biológica y la electroquímica.

1.3.10.1 *Método de regeneración térmica.* Es una de las más antiguas, consta de tres etapas las cuales son el secado, la carbonización a altas temperaturas y la activación de acuerdo a la variabilidad o los cambios que tenga la materia prima puesta a temperaturas altas. En el proceso de secado se eliminarán la mayor parte de elementos volátiles, la materia adsorbida se vaporiza en el proceso de carbonización, la materia orgánica se descompone produciéndose hidrocarburos y así se quedará en los poros otro tipo de materia formándose un carbono fijo. Este proceso tiene un costo un poco elevado ya que necesita energía para producir calentamiento durante la regeneración.³¹

1.3.10.2 *Método de regeneración biológica.* Para la eliminación de materia orgánica adsorbida se utilizan bacterias domesticadas para poder degradarlas mucho más. Se lleva a cabo la autólisis celular la cual hará fluir las enzimas hacia el espacio extracelular, debido a que el carbón activado posee un pequeño efecto para la adsorción de enzimas y esto producirá un centro enzimático en la superficie del carbón descomponiendo los contaminantes y así lograr la regeneración. Este proceso es sencillo, pero se verá afectado por la temperatura y calidad del agua.³¹

1.3.10.3 *Método de regeneración electroquímica.* Es un método nuevo el cual ocupa corriente alterna para el proceso de regeneración. Esto se logra aplicando un campo eléctrico que utiliza una corriente continua dirigida hacia el electrolito, mientras que una corriente alterna se intercala entre los dos electrodos principales. Se produce una micro celda electrolítica en el momento que el campo eléctrico hará que la corriente alterna se polarice del lado de un extremo como un ánodo y el otro como un cátodo. Es una técnica de uso sencillo y eficaz el cual consume poca energía y si el tratamiento se da de manera impecable la contaminación secundaria podrá ser evitada.³¹

1.4 Adsorción de oro (Au)

La adsorción es un método comúnmente utilizado para eliminar compuestos de gases o líquidos. Consiste en acumular selectivamente estas sustancias en la interfaz entre un fluido y una superficie sólida o líquida.³²

El oro es un metal precioso que ha sido crucial en la historia de la humanidad, con un impacto significativo en la economía y las tecnologías globales. Sus propiedades únicas, como su resistencia a la corrosión y su maleabilidad, se derivan de su número atómico elevado y configuración electrónica. Aproximadamente el 75% del oro disponible proviene de la minería, mientras que el resto se obtiene mediante reciclaje.³³

El oro se disuelve en entornos oxidativos con ligandos complejantes como agua regia, cianuro, tiosulfato y otros, formando complejos que facilitan su extracción de minerales de baja calidad. Los estados de oxidación más comunes del oro son Au (I) y Au (III), que se estabilizan con ligandos específicos. En hidrometalurgia, se aprovechan estas características para lixiviar el oro utilizando distintos sistemas que varían entre alcalinos, neutros y ácidos, seleccionados en función de la mineralogía, calidad del mineral, costos operativos y consideraciones ambientales.³³

La adsorción es el proceso de captación de sustancias solubles en la interfaz de una solución, ya sea entre un líquido y un gas, o un sólido y líquidos diferentes. Debido al uso intensivo de la cianuración en la extracción de oro, es fundamental desarrollar e implementar procesos de tratamiento para los efluentes de cianuración, adaptándolos a la diversa mineralogía del oro.³⁴

1.4.1 *Mecanismos*. Es un proceso en donde las moléculas de un fluido atraviesan al otro material adsorbente ya sea un líquido o un sólido, acumulándose dentro de este. En la fase líquida se utiliza en la separación de componentes orgánicos dentro las aguas potables o impurezas, así también en los aceites vegetales. La adsorción se da cuando las moléculas golpean la superficie del sólido adsorbente adhiriéndose a este. el adsorbato es el material concentrado y el adsorbente el material que adsorbe.³⁵

Es considerada una las técnicas más convenientes de remoción de contaminantes. Se destacan los materiales porosos como adsorbente, entre ellos el carbón activado. Este proceso de adsorción con materiales porosos ha tenido un resultado muy conveniente por el bajo costo inicial, versatilidad, y por un diseño sencillo y de fácil operación.³⁶

La adsorción de oro mediante resinas de intercambio iónico se caracteriza por una rápida velocidad de adsorción y una alta capacidad de carga de oro. Este proceso requiere soluciones con baja claridad y permite la regeneración de las resinas a temperatura ambiente.³⁷

1.4.2 *Materiales y Sorbentes*. Existen diversos materiales que se utilizan en la adsorción de oro, pero el más común es el carbón activado.

1.4.2.1 *Carbón Activado*. Es un material con propiedades adsorbentes, permite remover contaminantes orgánicos mediante la adsorción. el carbón activado posee una red interna de poros, esto proporciona un área superficial muy amplia.³⁸ Los elementos que conforman la composición química del carbón activado son adsorbentes, estos atrapan en sus paredes las moléculas dentro de un medio líquido o gaseoso, la capacidad para adsorber es gracias a su superficie interna.³⁵

El proceso de carbón en pulpa o carbón en lixiviación (CIP/CIL) es crucial para la extracción de oro, desempeñando un papel esencial en la recuperación comercial de oro a partir de soluciones de cianuro.³⁷

1.4.3 *Factores que afectan la Adsorción de Oro*. Entre los factores se encuentran el pH, la concentración de oro, la temperatura, características del adsorbente, tiempo de contacto, interacción con otros iones, tamaño de partícula del adsorbente y agitación.

1.4.3.1 *pH de la solución*. Este índice afecta la forma del ion oro en solución. Un pH demasiado bajo puede llevar a la formación de especies como el ion AuCl_2^- , mientras que un pH más alto favorece la formación de especies de oro menos complejas. El pH óptimo varía dependiendo del método de extracción y el tipo de adsorbente.³⁹

1.4.3.2 *Concentración de oro*. La capacidad de adsorción del material se ve afectada por la cantidad de oro presente en la solución. A medida que la concentración de oro aumenta, la cantidad que puede ser adsorbida también tiende a incrementarse, hasta que se alcanza un límite.³⁹

1.4.3.3 *Temperatura*. La temperatura puede afectar tanto la solubilidad de los compuestos de oro en la solución como la energía de activación del proceso de adsorción. A temperaturas más altas, la movilidad de las moléculas puede aumentar, afectando la superficie del adsorbente.³⁹

1.4.3.4 *Características del adsorbente.* Las propiedades físicas y químicas del material adsorbente (porosidad, superficie específica, carga superficial, grupo funcional, etc.) son vitales. Los adsorbentes como carbón activado, resinas de intercambio iónico, o materiales basados en sílice pueden tener diferentes eficiencias de adsorción.³⁹

1.4.3.5 *Tiempo de contacto.* El tiempo que la solución de oro está en contacto con el adsorbente impacta en la cantidad de metal que puede ser adsorbido. Un tiempo de contacto mayor generalmente conduce a una mayor adsorción, hasta que se alcanza un equilibrio.³⁹

1.4.3.6 *Interacción con otros iones.* La presencia de otros metales y aniones en la solución puede interferir con la adsorción de oro. Esto se debe a competiciones en los sitios de adsorción disponibles en el material o a formaciones de complejos.³⁹

1.4.3.7 *Tamaño de partícula del adsorbente.* Un tamaño de partícula menor puede aumentar la superficie de contacto y mejorar la velocidad de adsorción, aunque también puede dificultar la filtración.³⁹

1.4.3.8 *Agitación.* La agitación de la solución puede ayudar a distribuir uniformemente las especies en la solución, aumentando la tasa de transferencia de masa hacia el adsorbente y mejorando la eficacia de la adsorción.³⁹

1.4.4 *Cinética y Termodinámica.* La atracción entre los átomos o las moléculas presentes en la superficie de los sólidos es la causa de la adsorción entre un sólido y un líquido. Estas moléculas poseen una fuerza de atracción que envían a las moléculas hacia el interior, se las denomina fuerzas de adsorción las cuales hacen posible el proceso de adsorción entre sólidos y líquidos.²²

De acuerdo con la termodinámica y la temperatura, la variación de la temperatura tendrá un impacto en el equilibrio de la capacidad de adsorción. Las propiedades que no se miden en un experimento se relacionan con el equilibrio de adsorción en la termodinámica. Una curva o ecuación proporciona las isothermas cuando están en equilibrio; se vincula la concentración de metal en la solución con la concentración de metal adsorbido en la fase sólida.³²

1.4.5 *Optimización de Procesos.* La minería de oro ha dado un gran salto gracias al carbón activado, que ha mejorado notablemente la extracción de este metal precioso. Pero los científicos no se quedan ahí y siguen buscando materiales aún mejores para recuperar el oro de las soluciones químicas utilizadas en la minería.

En años recientes, se han investigado novedosos tipos de carbón activado y materiales que se asemejan al grafeno. Estos hallazgos han creado nuevas oportunidades tanto para la industria como para la investigación.

Para diseñar carbones activados más eficientes, es fundamental entender cómo se adhiere el oro a su superficie. Los científicos han descubierto que ciertas características del carbón, como pequeños defectos en su estructura y el tamaño de sus poros, influyen directamente en su capacidad para capturar el oro.³³

1.4.6 *Desorción y Recuperación de Oro.* La adsorción-desorción utilizando carbón activado es una alternativa viable debido a su mayor selectividad por el oro. Este proceso requiere menos clarificación y filtración, ya que el carbón activado se agrega directamente a la pulpa de cianuración. Si bien puede haber una pequeña pérdida de oro durante la adsorción-desorción, este método puede ofrecer beneficios económicos significativos, tanto en términos de una mayor recuperación de oro como de menores costos de capital y operativos en comparación con otros procesos.³

1.5 Método de pirolisis

1.5.1 *Introducción a la pirolisis.* La procedencia de la palabra pirolisis viene dividida en dos secciones las cuales son “piro” que tiene como concepto fuego o calor y la otra llamada “lisis” que equivale a ruptura o como descomposición, en donde el concepto real viene dado por la ruptura que se forma debido al calor que se produce. Este método también se conoce por la ausencia de oxígeno que existe dentro del proceso el cual produce una degradación térmica ya sea de una materia orgánica o de una biomasa la cual se va desarrollando dentro de una atmosfera cuyo valor es nulo.³

El significado de biomasa se lo simplifica en unas cuantas palabras, materia orgánica que es amigable con el medio ambiente, la cual es abundante en seres vivos como las plantas, desechos agroindustriales, etc. Al momento de la caracterización con el método de pirolisis este tiene mucha influencia en las condiciones y las características que se dan en el proceso como por ejemplo la atmosfera la cual es muy importante debido a que es el parámetro más importante dentro del proceso.⁴⁰

Dentro del método de pirolisis podemos encontrar varias maneras de llevar a cabo este proceso entre ellos la pirolisis lenta, la pirolisis media y por último la pirolisis rápida, en donde la transferencia de calor tendrá un impacto ya que por su velocidad hará que se forme el tipo de pirolisis y esto vendrá acompañado del tiempo de la biomasa, este método se da a temperaturas altas aproximadamente 400°C definiéndose como proceso termoquímico lo cual se ocupara materiales orgánicos ya sean en solidos o en líquidos, para el caso de los líquidos, con una densidad de energía un poco alta, donde la presencia de oxígeno será una variante conforme al método que se quiera ejecutar.⁴⁰

Mediante el método de pirolisis se pueden obtener productos como el biocarbón o biogas, existen tres etapas: la primera que es del secado o puede ser la evaporación de la humedad intercelular e intracelular, como segundo punto esta la desvolatilización intensa que esta se da por la degradación de la celulosa y hemicelulosa, y como última etapa esta la desvolatilización leve de los carbohidratos que quedan como la lignina y los extractos no estructurales.⁴¹

1.5.2 *Fundamentos Teóricos de la Pirólisis.* El método de pirólisis, también conocida como termólisis, es un proceso irreversible de tratamiento termoquímico de sustancias químicas sólidas o fluidas complejas, que se realiza a altas temperaturas en un entorno inerte o sin presencia de oxígeno. Básicamente, es un proceso de carbonización donde un material orgánico se descompone, generando un residuo sólido con un alto contenido de carbono y algunos productos volátiles. Este proceso de descomposición generalmente se acompaña de reacciones de polimerización e isomerización. Este método hace que la materia orgánica enterrada se convierta en combustibles fósiles.⁴²

La velocidad de pirólisis está directamente relacionada con la temperatura, aumentando de a poco. Los productos mediante pirólisis pueden ser ajustados al optimizar otros parámetros, el calentamiento que se da en un tiempo determinado, también la presión y el tamaño de las partículas alimentadas y por último el tipo de reactor utilizado. Existen diferentes tipos de reactores, los de lecho fijo, los de horno rotatorio y los de lecho fluidizado. El reactor de lecho fluidizado, el reactor de lecho fluidizado de barrena, el reactor de lecho fluidizado burbujeante y el reactor de lecho fluidizado circulante, son muy eficientes para la producción comercial a gran escala de aceite de pirólisis.⁴²

Tabla 3. Efecto del proceso de pirolisis y de los parámetros en el rendimiento de los productos de pirólisis.

	Carbón	Aceite	Gas
Temperaturas de pirolisis más bajas	Aumento del rendimiento	Aumento del rendimiento	
Temperaturas de pirolisis más altas			Aumento del rendimiento
Tasas de calefacción más bajas	Aumento del rendimiento	Aumento del rendimiento	
Tasas de calefacción más altas			Aumento del rendimiento

Tiempo de residencia corto		Aumento del rendimiento	
Bajas presiones o vacío		Aumento del rendimiento	
Presiones más altas	Aumento del rendimiento		Aumento del rendimiento
Tamaño de partícula más grande		Aumento del rendimiento	
Enfriamiento rápido		Aumento del rendimiento	
Pirolisis catalítica	Aumento del rendimiento		Aumento del rendimiento
Pirolisis de plasma por radiofrecuencia			Aumento del rendimiento
Pirolisis lenta	Aumento del rendimiento	Aumento del rendimiento	
Pirolisis rápida			Aumento del rendimiento

Fuente: ⁴²

1.5.3 Tipos de pirólisis.

1.5.3.1 *Pirólisis lenta*. Se lleva a cabo a temperaturas bajas como su nombre lo dice, con un tiempo de calentamiento prolongado y una velocidad lenta para alcanzar la temperatura de operación. Este proceso, conocido también como carbonización, tiene como finalidad producir un biocombustible sólido.⁴¹

La pirolisis lenta se realiza a bajas temperaturas, el tiempo de calentamiento es muy largo y la velocidad a la que se alcanza la temperatura de trabajo es muy lenta. Este proceso también se conoce como carbonización y tiene como objetivo obtener un biocombustible sólido.⁴³

1.5.3.2 *Pirólisis rápida*. Se da a temperaturas mayores o iguales a 650°C, es utilizado en la producción de bioaceites porque condensa la fracción líquida antes de las reacciones de craqueo las cuales forman parte de los gases no condensables.⁴¹

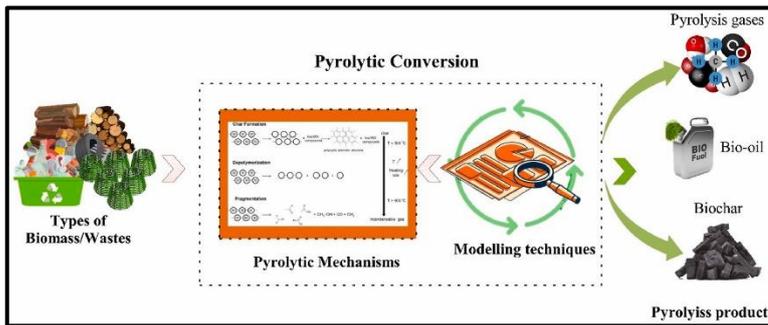
1.5.3.3 *Pirólisis flash o gasificación*. Las temperaturas son cercanas a o superiores a 1000°C y los tiempos de residencia son muy cortos haciendo que se obtengan productos gaseosos con más rendimiento.⁴¹

1.5.3.4 *Pirólisis media*. Se efectúa a temperaturas que oscilan entre 400 y 600 °C, produciendo metanos e hidrocarburos de mayor peso molecular. En cambio, en la pirolisis de alta temperatura, la velocidad de calentamiento es extremadamente rápida, el tiempo de retención en el proceso se da de manera breve, y así se genera un producto principal el cual es un biocombustible líquido.⁴³

1.5.4 *Mecanismos de Reacción en la Pirólisis*. La composición de la biomasa influye de manera significativa en su comportamiento durante el método de pirólisis. La lignocelulosa, principal componente de muchas plantas, está constituida principalmente por celulosa (40-50% en peso), hemicelulosa (20-40% en peso) y lignina (20-30% en peso). La celulosa forma la estructura básica de la planta, mientras que la hemicelulosa se entrelaza alrededor de las fibras de celulosa, y la lignina se encuentra en el exterior, rodeando tanto la celulosa como la hemicelulosa.⁴⁴

1.5.5 *Productos del método de pirólisis.* Los productos resultantes del método de pirólisis abarcan una variedad de materiales, como carbón vegetal, biocarbón, combustible sin humo, coque de petróleo y metalúrgico, carbón activado, negro de carbón, gas de síntesis, coque y gas de horno de coque, aceites de esquisto, biooil y una serie de productos derivados del petróleo sometido a craqueo.⁴²

Figura 1. Mecanismo de conversión de la pirólisis



Fuente: ⁴⁵

1.5.5.1 *Biocarbón.* La pirólisis de biomasa puede realizarse en un reactor de lecho fijo o en un lecho fluidizado burbujeante equipado con un sistema de separación de carbón. El biocarbón es un tipo de carbón vegetal poroso, generalmente obtenido a partir del método de pirólisis de biomasa como madera, caña de azúcar y residuos biológicos. Cuando se mezcla con suelos, actúa como fertilizante y se utiliza para mejorar las propiedades del suelo, promoviendo la agricultura sostenible.⁴²

Para producir biocarbón, la biomasa puede triturarse y someterse a un calentamiento rápido en un proceso de pirólisis rápida, generando gas de síntesis rico en etileno de alta calidad. Alternativamente, la biomasa puede triturarse de manera menos fina y someterse a un calentamiento más lento en un proceso de pirólisis lenta, lo que incrementa los rendimientos de biocarbón.⁴²

1.5.5.2 *Bio-aceite*. La pirólisis de aceites vegetales genera productos que, en términos químicos, se asemejan al combustible diésel derivado del petróleo. Sin embargo, algunas propiedades de estos compuestos, como el punto de fluidez, los residuos de carbono y el contenido de cenizas, pueden no ser aceptables. Además, la eliminación del oxígeno durante el procesamiento térmico reduce los beneficios ambientales de utilizar un combustible oxigenado. Diversos investigadores han estudiado el método de pirólisis de triglicéridos con el fin de obtener productos aptos para motores diésel.⁴²

La descomposición térmica de triglicéridos produce una variedad de compuestos, incluyendo alcanos, alquenos, alcadienos, aromáticos y ácidos carboxílicos. La naturaleza y las proporciones relativas de estos compuestos dependen en gran medida del tipo de aceite vegetal utilizado, ya que diferentes aceites producen compuestos muy distintos durante este método. Por ejemplo, la pirólisis del aceite de soja da lugar a un aceite con menor viscosidad y mayor índice de cetano, que contiene aproximadamente un 79% de carbono y un 12% de hidrógeno.⁴²

1.5.6 *Factores que afectan el proceso de pirólisis*. Conforme los parámetros operativos, la pirolisis se clasifica en lenta, rápida y flash.

El método de pirolisis lenta como su nombre lo indica se desarrolla a bajas temperaturas en donde es poca la velocidad que se da en el calentamiento y a su vez el tiempo que hará que se vaya aumentando haciendo más favorable la fabricación del carbón. Por consiguiente, el método de pirolisis instantánea o también llamado flash se da de manera inmediata debido a la velocidad para calentar la cual es muy elevada, para que este proceso se pueda desarrollar se tendrá que tener un tamaño de partículas pequeño.⁴⁶

Seguido de esto también se encuentra el método de pirolisis rápida, este se puede producir de manera controlada con una temperatura favorable para la formación de bioaceite, se produce a un tiempo de vapor corto en donde el calentamiento se da a una velocidad muy alta. Este método de pirolisis tiene buena eficiencia energética y a su vez no es muy costoso.⁴⁶

Tabla 4. Parámetros operativos y productos típicos para el proceso de pirólisis

Técnica pirolítica	Periodo de asentamiento sólido (min)	Velocidad de calentamiento (°C/s)	Tamaño de grano (cm)	Temperatura (°C)	Producir (proporción)		
					ACEITE	CARBÓN	GAS
Lento	7,5-9,16	0,1-1	0,5-5	277-677	0,30	0,35	0,35
Rápido	0,0083- 0,16	10-200	<0,1	577-977	0,50	0,20	0,30
Flash	<0,0083	>1000	<0,02	777-1023	0,75	0,12	0,13

Fuente: ⁴⁶

1.5.7 *Equipos para la Pirólisis.* La etapa de reacción en el proceso de pirólisis puede realizarse mediante diferentes tecnologías, la cual va a depender en su mayoría de la naturaleza que posea el lecho del reactor y así mismo dependerá de las consideraciones prácticas que se desarrollan en el proceso. Mediante el estudio de la literatura se presentará un listado de los diferentes tipos de reactores más conocidos a nivel industrial.⁴⁶

1.5.7.1 *Reactor de lecho fluidizado.* Este tipo de reactor es uno de los más investigados y avanzados en la industria del petróleo, particularmente en las reacciones de craqueo catalítico. Posee una configuración vertical que se ejecuta mediante procesos que se dan de pirólisis, como una parte del funcionamiento tenemos que en la parte superior del reactor es introducida la materia prima.⁴⁶

Al momento que topa el fondo del reactor, entra en contacto con un medio fluidizado, que normalmente se suele ocupar arena u otro sólido inerte, esto hace que la transferencia de calor no sea complicada. Este medio puede calentarse de manera directa o también de manera indirecta mediante el uso de un gas de fluidización inerte.⁴⁶

1.5.7.2 *Reactor de cono rotatorio.* En este tipo de reactor el proceso se realiza en un recipiente de reacción de manera vertical en donde la materia prima se va a combinar con un lecho de calentamiento que se encuentra formado por arena o por otro sólido pasivo. La mezcla se la lleva a cabo de una manera mecánica, aprovechando el momento angular que posee el cono, y esto hará que disminuya el uso de gas de fluidización y así optimizar la transferencia de calor. El calentamiento puede efectuarse de manera directa o indirecta. Y aun así la aplicación de estos tipos de reactores no se ha podido aplicar en una industria, más bien solo ha sido aplicado en plantas piloto.⁴⁶

1.5.7.3 *Reactor de tornillo sinfín.* Este reactor tiene una similitud con el de cono rotatorio, el proceso se da por una mezcla la cual está constituida por materia prima y el lecho de calentamiento de manera horizontal dentro de un recipiente el cual será producido por un tornillo sinfín. No se utiliza gas de fluidización y el tipo de calentamiento que se va a dar en esta etapa será de manera indirecta, mediante el uso de una chaqueta de calentamiento que será producida con gases de combustión.⁴⁶

1.5.7.4 *Reactor de lecho fijo.* En comparación al reactor de lecho fluidizado, estas constituidos por recipientes verticales los cuales hará calentar solo la base del reactor, produciendo así un perfil térmico que se encontrar a lo largo de las paredes. El calentamiento que se lleva a cabo se lo realizara principalmente de manera indirecta para así llegar a eludir la fluidización del lecho fijo. Existen ocasiones en donde se ocupa una corriente de gas pasiva o inerte que permita la extracción de la parte volátil que se ha generado, esto provocara que se eviten los reflujos de condensados y también las reacciones secundarias del proceso de craqueo que no han sido esperadas.⁴⁶

1.5.7.5 *Reactor de horno rotatorio*. Este reactor ha sido el que se lo ha llegado a utilizar en abundancia en lo que es las industrias, por el parecido que tiene con los hornos rotatorios empleados en la industria del cemento. Dentro de los procesos que se dan de pirólisis, en esta ocasión el calentamiento será de manera indirecta, en donde se ocupará una gran cantidad de gases de combustión y así poder eludir la fluidización que se da de la materia prima simplificando el espacio que se dará entre el material sólido y la fracción volátil.⁴⁶

1.5.8 *Aplicaciones de los Productos de la Pirólisis*. Existen numerosos procesos de pirólisis que se aplican en la producción de combustibles y productos químicos. Estos procesos varían en cuanto al tipo de procedimiento, el empleo de catalizadores, las sustancias que se tratan y los productos finales obtenidos.⁴²

También existen tipos de pirolisis en donde se podemos encontrar la catalítica, la no catalítica, entre ellas la pirolisis hidratada y entre otras que son muy importantes dentro de los procesos de pirolisis. Así mismo se encuentran procesos que van de la mano con este método en donde se incluye la descomposición térmica en el proceso y la destilación destructiva, y en donde más se emplea pues son los procesos de carbonización. Estos también son ejecutados por medio de la licuefacción, la carbonización a altas y bajas temperaturas, la coquización, y el craqueo térmico y catalítico.⁴²

1.6 Soluciones cianuradas

1.6.1 *Introducción a las Soluciones Cianuradas*. Actualmente, el cianuro se encuentra como el lixiviante que más usos ha tenido para la extracción de oro, y esto se debe a su capacidad para formar complejos estables con el metal y por la facilidad al momento de realizar la lixiviación. A pesar de esto han existido importantes desafíos que tienen un gran impacto ambiental, en la salud y en la seguridad.⁴⁷

Así mismo cuando se pueden hallar minerales refractarios, materia carbonosa o minerales provenientes del oro con un contenido de cobre, el proceso de lixiviación puede generar una cinética pausada y un uso de cianuro muy elevado, esto hará los costos tengan un gran incremento al procesar. Pueden existir grandes alternativas como lo es el tiosulfato, haluros, tiourea, tiocianato y bisulfuro, pero para que tengan un mayor impacto ante el cianuro tendrán que tener una toxicidad más baja, su costo tendrá que ser menor y una eficiencia muy alta dentro del proceso.⁴⁷

El paso siguiente a la lixiviación en el procesamiento hidrometalúrgico del oro es la recuperación del metal desde la solución. En la industria minera del oro, el carbón activado es el método más comúnmente utilizado para extraer el oro de la solución de lixiviación con cianuro, en procesos conocidos como carbón en lixiviación (CIL), carbón en pulpa (CIP) y carbón en columnas. Además, se han realizado diversos estudios sobre la recuperación de oro mediante adsorción en carbón activado, tanto a partir de glicina alcalina sola como en combinación con cianuro.⁴⁷

El oro y la plata son cruciales en la sociedad actual por sus propiedades excepcionales, como la alta conductividad eléctrica y la resistencia química y física. Para extraerlos, se emplea mayormente la lixiviación con cianuro, un método hidrometalúrgico efectivo en la recuperación de estos metales, que ha sido utilizado durante más de 100 años. En la pequeña minería, este proceso se ha adoptado recientemente, ya que ciertos materiales que contienen oro no se pueden concentrar adecuadamente con métodos gravimétricos. Actualmente, se usa la cianuración en la pequeña minería aurífera de países andinos como Venezuela, Ecuador, Perú, Colombia, Chile y en algunos países africanos.⁴⁸

1.6.2 Aplicaciones de Soluciones Cianuradas en la Industria.

1.6.2.1 Lixiviación de Metales Preciosos. El método más eficiente para la extracción de oro es la cianuración, que se emplea en la mayoría de los esquemas tecnológicos para procesar minerales y concentrados de oro. Este proceso depende de la reacción del oro y la plata con cianuro de sodio, en presencia de oxígeno, lo que genera una sal compleja $\text{Na}[\text{Au}(\text{CN})_2]$ que es difícil de descomponer, pero se disuelve fácilmente en agua.⁴⁹ De hecho, durante la lixiviación no sólo se extraen metales preciosos, sino también enormes cantidades de Cu y metales básicos.⁵⁰

1.6.2.2 *Toxicidad y Manejo de Residuos Cianurados.* Las plantas que llevan a cabo la lixiviación de minerales de oro con soluciones de cianuro producen residuos con altos valores de pH y efluentes tóxicos que contienen cianuro de sodio, cianatos, tiocianatos y complejos de cianuro con metales pesados. Estos residuos son peligrosos y presentan niveles de dificultad para su tratamiento, el agua utilizada contiene niveles de cianuro superiores a los permitidos, se almacena en estanques de relaves, donde se espera que los contaminantes se descompongan naturalmente antes de ser vertidos. Esto conlleva un riesgo ambiental significativo por la posibilidad de fallos en el equipo de contención.⁵¹

2. METODOLOGÍA

2.1 Tipo de investigación

Este trabajo de investigación es de manera experimental, analítica, comparativa ya que se conocerá cual es la capacidad de adsorción que tiene el carbón activado con esta nueva materia prima.

2.2 Población y muestra

Para la presente investigación, se ha determinado como población de estudio al Recinto Galayacu, ubicado en el Cantón Pasaje. Este lugar es conocido por su abundancia en recursos naturales, entre los cuales se encuentra la "*Crescentia Cujete*", una planta cuyas cáscaras han sido seleccionadas como muestra para el desarrollo del proyecto. La muestra se compone específicamente de las cáscaras de "*Crescentia Cujete*", que serán procesadas para la obtención de carbón activado. Este carbón activado será evaluado por su capacidad de adsorción de oro en soluciones cianuradas, contribuyendo así al conocimiento sobre alternativas sostenibles para el tratamiento de efluentes industriales en procesos de extracción de metales preciosos.

2.3 Ubicación de la experimentación

La experimentación se realiza en el laboratorio de carbón activado en la facultad de Ciencias Químicas y de la Salud de la UTMACH. La recolección de esta materia prima se la obtiene en una hacienda perteneciente al recinto de Galayacu, cantón Pasaje.

Figura 1. Ubicación del sitio de recolección de muestra



Fuente: Google Earth

2.4 Tipo de variables

Las variables de estudio independientes y dependientes son importantes para el desarrollo de esta investigación.

2.4.1 Variables independientes. Se identifican ciertas variables independientes que son manipuladas y controladas para analizar el impacto en el proceso de elaboración de carbón activado y su rendimiento en la parte experimental.

- * Temperatura
- * Tiempo

2.4.2 Variables dependientes. Son parámetros que se ven influenciados por el proceso de elaboración del carbón activado y que ofrecen datos importantes sobre la capacidad adsorbente y el rendimiento.

- * Rendimiento
- * Capacidad adsorbente

2.5 Diseño experimental

Se aplicará un diseño factorial 3^2 , para seleccionar el mejor tratamiento según el contenido de carbono orgánico.

Tabla 5. Factores y niveles de la investigación

Factores	Niveles
A: Temperatura (°C)	A1: 450
	A2: 475
	A3: 500
B: Tiempo (minutos)	B1: 15
	B2: 20
	B3: 25

Fuente: Elaboración propia

Los tratamientos de la combinación de los factores con los niveles correspondientes se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 6. Tratamientos establecidos para la investigación

Tratamientos	Combinaciones	Descripción
T1	A1B1	Carbón activado a 450 °C por 15 minutos
T2	A1B2	Carbón activado a 450 °C por 20 minutos
T3	A1B3	Carbón activado a 450 °C por 25 minutos

T4	A2B1	Carbón activado a 475 °C por 15 minutos
T5	A2B2	Carbón activado a 475 °C por 20 minutos
T6	A2B3	Carbón activado a 475 °C por 25 minutos
T7	A3B1	Carbón activado a 500 °C por 15 minutos
T8	A3B2	Carbón activado a 500 °C por 20 minutos
T9	A3B3	Carbón activado a 500 °C por 25 minutos

Fuente: Elaboración propia

2.6 Técnicas

2.6.1 *Recolección de la materia prima.* La cáscara de “*Crescentia Cujete*” (totumo o mate) se la adquirió de una hacienda perteneciente al recinto de Galayacu, cantón Pasaje, este trabajo experimental se centró en: selección por medio del estado de maduración y tamaño del fruto, recogida, limpieza para posteriormente eliminar todas las impurezas como pequeñas piedras, ramas u otros contaminantes.

2.6.2 *Equipos, materiales e insumos.* Es importante contar con una serie de elementos adecuados para llevar a cabo el proceso de obtención de carbón activado en la **Tabla 7** se detallan algunos de los elementos necesarios para la experimentación.

Tabla 7. Equipos, materiales e insumos

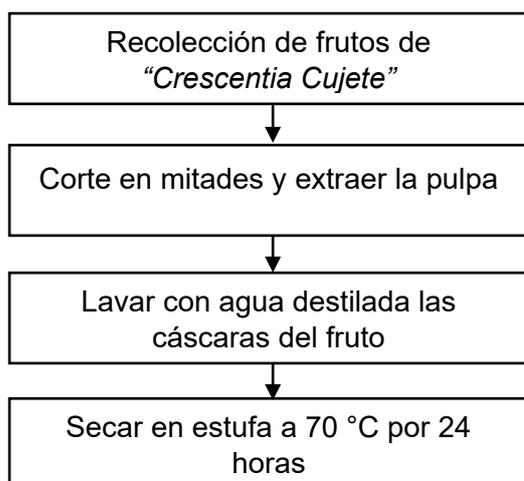
Equipos	Materiales	Insumos
Balanza analítica	Sierra manual	Fruto de “ <i>Crescentia Cujete</i> ”
Termómetro infrarrojo	Cuchara metálica	

Estufa	Probeta de 50 ml	Ácido fosfórico al 85%
pH metro	Pinza de crisoles	Agua potable
Molino eléctrico	Crisoles	Agua destilada o desionizada
Reactor de adsorción	Tubos de ensayo	
Horno mufla al vacío (MAGRICO)	Guantes	
	Vasos de precipitación	
	Papel filtro	
	Tamiz	
	Agitador	
	Pera de succión	
	Embudo de plástico	
	Recipiente de aluminio	

Fuente: Elaboración propia

2.6.3 *Pretratamiento.* Tras la obtención de la materia prima se fraccionó la fruta en mitades para retirar la pulpa y semillas del fruto, las cuales fueron almacenadas en envases de vidrio para un futuro uso; con lo cual la cáscara quede totalmente limpia y sin residuos de contaminantes.

Figura 2. Diagrama de flujo del pretratamiento de la materia prima



Fuente: Elaboración propia

2.6.4 *Secado.* Luego de la limpieza, la cáscara debe ser sometida a perder humedad por medio de la exposición solar, dicho secado se da aproximadamente en 3 días.

2.6.5 *Triturado.* Con ayuda de un molino eléctrico se facilitó la disminución del tamaño de las cáscaras de "Crescentia Cujete" (totumo o mate) para obtener fragmentos más pequeños que faciliten el proceso y los análisis respectivos. Dicho procedimiento tomo aproximadamente un día.

2.6.6 *Preparación del adsorbente.* Tras el proceso de trituración se clasificaron los residuos los cuales pasarán por un tamiz #100 en donde serán separados para ganar uniformidad.

2.6.7 *Lavado de la materia prima.* Dentro de un vaso de precipitación se procedió a colocar la materia prima clasificada para poder lavar con 500 ml de agua destilada, agitando poco a poco para eliminar partículas no deseadas en la misma, este proceso se repitió tres veces hasta tener una eliminación completa de los sólidos no deseados.

2.6.8 *Secado de la materia prima.* Se llevo la muestra previamente filtrada a una estufa de eliminación de humedad, a condiciones de 75 C por 24 horas, para eliminar en totalidad el líquido adherente a la cáscara de totumo o mate.

2.6.9 *Activación química y lavado.* El proceso al que se sometieron los fragmentos de la cáscara de “*Crescentia Cujete*” (totumo o mate) fue la modificación o activación química, un método que se emplea para aumentar la porosidad de las partículas y, por ende, su capacidad de adsorción, facilitando así la eliminación de diversos metales.⁵²

En esta fase, se utilizó ácido fosfórico (H₃PO₄) al 85% para impregnar los residuos de la cáscara de “*Crescentia Cujete*” en un vaso de precipitación, siguiendo una relación de 1:5, que es la proporción adecuada para este proceso. Finalmente, se dejó reposar durante una hora y luego se lavó varias veces con agua desionizada o con agua a 80°C hasta lograr un pH neutro.⁵²

2.6.10 *Obtención del carbón activado.* Tras la realización de la caracterización de los residuos de “*Crescentia Cujete*” (totumo o mate) se procede a la eliminación de la humedad existente y posteriormente la carbonización o activación lo cual es fundamental para la obtención de carbón activado. Según Guanuche et al,⁵². “La eliminación de humedad se realiza llevando la muestra en crisoles a una estufa a 120 °C por un lapso de una hora, pasado ese tiempo se la retira y se la coloca en una mufla a 450 °C por un periodo de 30 minutos para su respectiva activación”.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1 Análisis de “*Crescentia Cujete*”

Tabla 8. Contenido de carbono orgánico de la cáscara de “*Crescentia Cujete*”

	% de carbono orgánico	ppm (mg/L)
Cáscara de “ <i>Crescentia Cujete</i> ”	50,44	504400,000

Fuente: NEMALAB S.A.

En la **Tabla 8**, se evidencia el análisis realizado del porcentaje de carbono orgánico a la materia prima la cual fue sometida a pruebas de laboratorio de la empresa NEMALAB S.A., mediante la metodología de Walkey Black donde se obtuvo un resultado del 50,44% para la cáscara de “*Crescentia Cujete*”.

Por lo consiguiente, se puede comparar valores similares al de la cáscara de “*Cocos nucifera L*”, la cual contiene un 56.43% de contenido de carbono, según²⁵.

3.2 Preparación del carbón activado

Para llevar a cabo este proceso primeramente se trituro la cáscara de “*Crescentia Cujete*” mediante un molino eléctrico obteniéndose un tamaño normal para poder trabajar, luego se lo paso por un tamiz #100 varias veces hasta eliminar la mayor cantidad de residuos o polvo que se producen. Se procedió al lavado con agua destilada hasta eliminar contaminantes que interfieran en la activación de la cáscara de “*Crescentia Cujete*”, se procedió a pesar teniendo un peso total de 1,1 kg de cáscara ya lavada y triturada para llevar a cabo el proceso de activación.

En esta etapa se da uso de la fórmula de la densidad para poder establecer cuanto de ácido fosfórico debemos ocupar para el proceso de activación, se procedió a la activación química de la cáscara de “*Crescentia Cujete*” en donde se utilizó ácido fosfórico al 85%, este proceso se llevó a cabo en vasos de precipitación, dentro de ellos se mezcló agua destilada junto con el ácido fosfórico y la cáscara de “*Crescentia Cujete*” en un volumen adecuado según la fórmula utilizada. Este proceso de activación se lo realizo en dos ocasiones para llevar una mejor activación la cual fue de 505 g de cáscara de “*Cresenceia Cujete*” respectivamente.

Tabla 9. Relación entre la densidad y la masa de la cáscara de “*Crescentia Cujete*”

Densidad del ácido fosfórico al 85% (g/cm ³)	Peso de la cáscara de “ <i>Crescentia Cujete</i> ” (g)	Volumen a utilizarse de ácido fosfórico (cm ³)
1,79	505	282,123

Fuente: Elaboración propia

La mezcla realizada se dejó en agitación continua durante 24 horas, luego se procedió al lavado con agua destilada varias veces dejando en agitación continua por 24 horas hasta llegar a obtener un pH neutro el cual es importante en este proceso. Se realizo el secado de la materia prima en una estufa a 70°C durante 24 horas en una bandeja de aluminio para llevar a cabo un mejor secado y así eliminar toda la humedad.

Para realizar la carbonización se establecieron temperaturas (450°C, 475°C, 500°C) a diferentes tiempos, los cuales se detallan en la **Tabla 10**. Según los tratamientos establecidos en cada uno se ocuparon 5 g de cáscara de “*Crescentia Cujete*”, cada repetición se la realizo sin presencia de oxígeno debido a que esto podría generar cenizas en los carbones perjudicando la obtención de estos. Por cada tratamiento se obtuvo un rendimiento de carbón y este fue llevado a análisis para determinar el tratamiento óptimo para poder ejecutar el proceso de adsorción con el mejor tratamiento.

Tabla 10. Temperaturas y tiempo empleados en la carbonización

Temperatura (°C)	Tiempo (min)
450	15
	20
	25
475	15
	20
	25
500	15
	20
	25

Fuente: Elaboración propia

Posterior a esto se procedió a realizar el análisis a cada tratamiento ejecutado en el laboratorio NEMALAB mediante el método de Walkey Black el cual nos mostrará una tabla de resultados según el contenido de carbono, se eligió el tratamiento con mayor cantidad de carbono orgánico como el más óptimo con el cual se llevó a cabo el proceso de adsorción.

Tabla 11. Análisis de contenido de carbono orgánico

Tratamientos	% Carbono
T1	1,67
T2	1,62

T3	1,97
T4	6,98
T5	7,09
T6	7,00
T7	12,01
T8	12,05
T9	12,20

Fuente: Elaboración propia

Se obtuvieron carbones a partir de la cáscara de “*Cresecentia Cujete*” en donde no todos son óptimos según el contenido de carbono orgánico, el tratamiento (T9) nos dio un mejor porcentaje y partiendo de este se llevará a cabo la adsorción de oro cabe mencionar que estos carbones están siendo analizados según la forma de activación y producto químico utilizado.

Ecuación 1. Rendimiento de carbón activado en porcentaje

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{C-A}{B-A} \times 100 \text{ (30)}$$

Tabla 12. Rendimiento del carbón activado obtenido

	Rendimiento (%)
Carbón de la cáscara de “Crescentia Cujete”	55,05

Fuente: Elaboración propia

Se procedió a sacar un promedio de los cálculos realizados para encontrar los rendimientos dando como resultado un porcentaje del 55,05 % de rendimiento dando como perdida un 44,95%, esto quiere decir que el carbón tendrá una estructura macro y microporosa según Ster Polit y Sevilla, 2015; en donde nos indica que si se pierde un 50-75% este carbón tendrá esa estructura, también mencionaremos que se obtuvo un carbón de bajo rendimiento de acuerdo a las condiciones realizadas. Cabe mencionar que el producto químico que se utiliza para la activación va a depender en el rendimiento del carbón que se obtenga.²

3.3 Adsorción

Tabla 13. Parámetros establecidos para la prueba de adsorción de Oro (Au)

	Concentración de Oro (ppm)	Volumen (L)	Biomasa (g)	Tiempo (h)
Carbón activado comercial de cáscara de “Cocos nucifera L”	2,549	2	200	12
Carbón activado de cáscara de Crescentia Cujete	2,549	2	200	12

Fuente: Elaboración propia

Para el estudio de la adsorción de Oro (Au) y verificar el efecto en la experimentación, se realizó una prueba de adsorción en el reactor de vidrio encamisado del laboratorio de investigación Electro analítica y bioenergía de la UTMACH a condiciones normales, en primer lugar se realizó la prueba de adsorción del carbón comercial HAYCARB, en la cual se empleó una solución cianurada obtenida del Cantón Camilo Ponce Enríquez, disponiendo de una concentración inicial de 2,549 mg/L (ppm), ocupando 2 litros de volumen y una biomasa de 200 g.

Posteriormente se efectuó la prueba con el carbón obtenido a partir de la cáscara de “*Crescentia Cujete*”, realizando un triplicado de está a partir de los mismos parámetros anteriormente mencionados. Es relevante destacar, que dichos experimentos contaron con la toma de muestra por hora transcurrida, hasta alcanzar el lapso de 12 horas mediante agitación constante dentro del reactor con oxigenación continua. Cabe mencionar, que posteriormente se filtraron las muestras, y los filtrados se analizaron por la técnica de espectroscopia de adsorción atómica de la empresa Ecoluxen del cantón Portovelo para determinar la concentración del metal.

3.3.1 Comparación de resultados del carbón activado obtenido

Tabla 14. Capacidad de adsorción del carbón activado comercial de la cáscara de “*Cocos nucifera L*” (Coco)

Carbón activado comercial de la cáscara de “Cocos nucífera L” (coco) marca HAYCARB	
Tiempo (minutos)	qt (mg/g)
60	0,02471
120	0,02460
180	0,02457
240	0,02457
300	0,02465
360	0,02468
420	0,02463
480	0,02463
540	0,02437
600	0,02423
660	0,02462
720	0,02451

Fuente: Elaboración propia

Mediante el ensayo de adsorción, se logra determinar la capacidad de adsorción “qt” que tiene el carbón activado comercial de la marca HAYCARB en un tiempo de 720 minutos (12 horas), donde dichos resultados obtenidos del equipo de espectroscopia de adsorción atómica se lo calculo mediante la formula tomada de ⁵³, donde nos indica que “qt” es la capacidad de adsorción en un tiempo determinado (mg metal/g de biomasa), V es el volumen de muestra utilizada (L) y C representa la concentración del metal en mg/L, lo cual podemos verificar en la **Tabla 14**.

Tabla 15. Capacidad de adsorción del carbón activado obtenido de la cáscara de “Crescentia Cujete”

Carbón activado de la cáscara de “Crescentia Cujete” (totumo o mate)	
Tiempo (h)	Concentración (ppm)
1	2,0440
2	1,9873
3	1,8973
4	1,9817
5	1,9076
6	1,7906
7	1,7468
8	1,6940
9	1,5894
10	1,5637
11	1,5361
12	1,5359

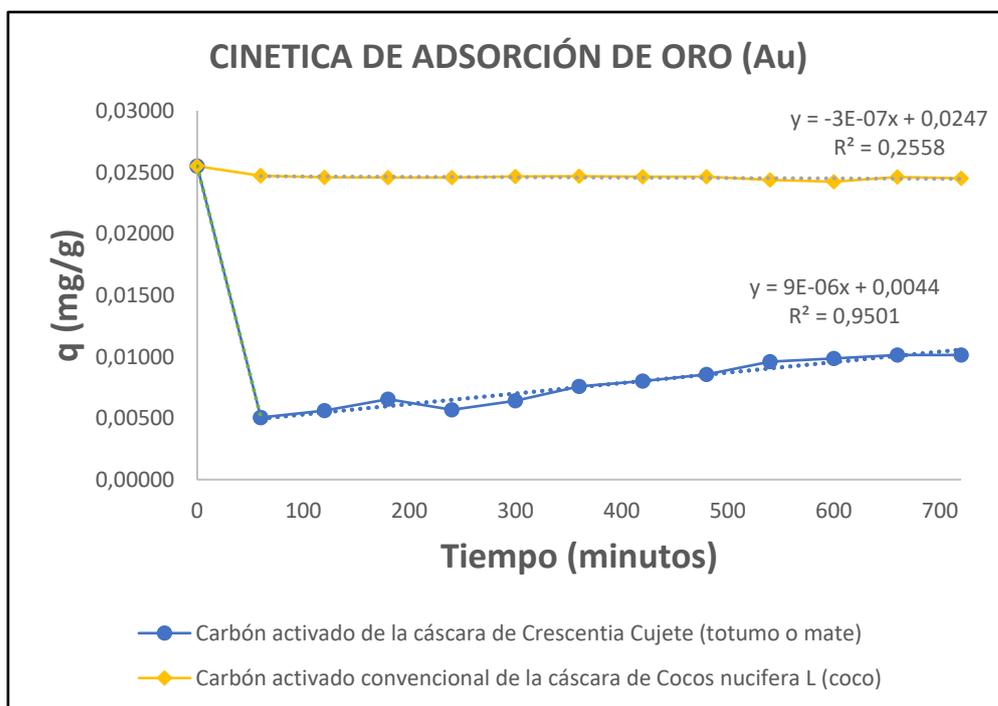
Fuente: Elaboración propia

En la **Tabla 15**, se indica la capacidad de adsorción que se alcanzó a base del mejor tratamiento el cual fue el T9 a temperatura de 500 °C por 25 minutos, donde dichos resultados obtenidos del equipo de espectroscopia de adsorción atómica en ppm.

Ecuación 2. Capacidad de adsorción

$$qt = \frac{(C_{inicial} - C_{residual})(Volumen)}{g \text{ de biomasa}} \quad (53)$$

Figura 3. Cinética de adsorción de oro (Au)



Fuente: Elaboración propia

Con forme detalla, la)

Figura 3 muestra la cinética de adsorción de Oro (Au) utilizando dos tipos de carbón activado: uno derivado de la cáscara de “*Crescentia Cujete*” (totumo o mate) y otro de la cáscara de “*Cocos nucifera L*” (coco). Por medio de parámetros idénticos que son los que rigen la cinética de cada prueba.

Para el carbón activado convencional de la cáscara de “*Cocos nucifera L*” (Coco), se observa que este tipo de carbón activado alcanza un nivel relativamente alto de

adsorción desde el inicio, manteniéndose casi constante con valores alrededor de 0,025 mg/g. La línea de regresión tiene una pendiente negativa muy cercana a cero, lo que indica que la cantidad de oro adsorbida prácticamente no cambia con el tiempo.

El valor de R^2 es 0,2558, lo que sugiere que la correlación de los datos con el modelo lineal no es fuerte.

En cuanto al carbón activado de "*Crescentia Cujete*", este comienza con una adsorción más baja, alrededor de 0,005 mg/g, y muestra un aumento gradual en la cantidad adsorbida a medida que pasa el tiempo. La línea de regresión tiene una pendiente positiva, lo que indica una tendencia creciente en la adsorción con el tiempo.

El valor de R^2 es 0,9501, indicando una fuerte correlación con el modelo lineal, lo que sugiere que el aumento en la adsorción es consistente y sigue una tendencia lineal.

El carbón activado comercial de "*Cocos nucifera L*" (coco) muestra una alta capacidad de adsorción inicial y estabilidad a lo largo del tiempo, lo que podría ser indicativo de un equilibrio rápido en la adsorción de oro.

El carbón activado de "*Crescentia Cujete*", aunque comienza con una menor capacidad de adsorción, continúa aumentando la cantidad adsorbida, lo que podría indicar que aún no ha alcanzado el equilibrio dentro del tiempo estudiado.

CONCLUSIONES

En el proceso de activación química, el carbón activado derivado de la cáscara de "*Crescentia Cujete*" alcanzó un rendimiento del 55,05%. Este resultado indica una pérdida considerable de la materia prima inicial. Sin embargo, el producto final se destacó por su excelente textura y dureza, clasificándose como un carbón activado granular de calidad.

El análisis del contenido de carbono orgánico en la cáscara de "*Crescentia Cujete*" reveló una alta presencia de átomos de carbono, alcanzando un 50,44%. Esta concentración de carbono influye directamente en las propiedades mecánicas del material, como la resistencia, durabilidad y rigidez, lo que sugiere que este carbono es representativo de diversas materias orgánicas.

Al comparar el carbón activado de "*Crescentia Cujete*" con un carbón activado comercial, se observó que el primero presentó una adsorción del 29%, mientras que el comercial alcanzó un 96% de adsorción de oro de una solución cianurada. Estos resultados indican que el carbón activado de "*Crescentia Cujete*" no posee una capacidad de adsorción adecuada para aplicaciones en industrias mineras o en procesos de adsorción de minerales.

Dentro de la experimentación, los tratamientos (T7, T8, T9) mostraron el mayor contenido de carbono orgánico, aunque, a pesar de mantenerse a una misma temperatura, se evidenció que la cáscara de "*Crescentia Cujete*" una vez carbonizada no desarrolló una estructura de carbono óptima, limitando su capacidad de adsorción debido a una estructura macro y microporosa insuficiente.

Las diferencias observadas en las capacidades de adsorción y las cinéticas entre los dos tipos de carbón activado sugieren que poseen propiedades fisicoquímicas distintas. Este es un factor crucial a considerar al estudiar la interacción con minerales auríferos y otros compuestos.

RECOMENDACIONES

Dado que el carbón activado de “*Crescentia Cujete*” demostró una capacidad de adsorción que aumenta con el tiempo, se sugiere explorar el uso de diferentes agentes activantes o sus combinaciones para evaluar si es posible optimizar aún más las propiedades adsorbentes del material.

Dado que el rendimiento del carbón activado obtenido fue relativamente bajo (55,05%), se recomienda realizar experimentos adicionales para optimizar la concentración de ácido fosfórico (H_3PO_4) y las condiciones de activación (tiempo y temperatura) con el fin de mejorar el rendimiento y la estructura porosa del carbón activado.

Es recomendable realizar un análisis económico que contemple el costo de producción del carbón activado y su comparativa con alternativas comerciales como el carbón de coco. Además, se debería evaluar la escalabilidad del proceso para determinar si puede ser implementado a nivel industrial sin pérdidas significativas de eficiencia o incremento en los costos.

Con base en las propiedades del carbón activado obtenido, se sugiere explorar aplicaciones adicionales más allá de la recuperación de oro, como la adsorción de otros metales pesados o compuestos orgánicos presentes en efluentes industriales, lo que podría ampliar el uso potencial del material en diferentes industrias.

Es recomendable realizar una caracterización más profunda del carbón activado obtenido, utilizando técnicas como microscopía electrónica de barrido (SEM), espectroscopía de infrarrojo (FTIR), y análisis de área superficial (BET), para comprender mejor las propiedades estructurales y químicas que influyen en su capacidad de adsorción.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) Zambrano Campitelli, M. E.; Pérez Hernández, M. M. ELABORACIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE ENDOCARPIO DE COCO PARA LA REMOCIÓN DE ANARANJADO DE METILO EN FASE ACUOSA. *Rev. Int. Contam. Ambiental* **2023**, 39, 59–70. <https://doi.org/10.20937/RICA.54514>.
- (2) Tubón Rengel Katherine Abigail. ADSORCIÓN DE PLOMO SOBRE CARBÓN ACTIVADO OBTENIDO DE RESIDUOS DE FRUTOS DE *Crescentia Cujete*. Proyecto de Investigación, ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO, Riobamba, 2021. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/14620> (accessed 2024-07-29).
- (3) Martínez-Mendoza, K. L.; Barraza Burgos, J. M.; Marriaga-Cabrales, N.; Machuca-Martinez, F.; Barajas, M.; Romero, M. Production and characterization of activated carbon from coa lfor gold adsorption in cyanide solutions. *Ingeniería e Investigación* 2020,40(1),3444. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v40n1.80126>.
- (4) Eliecer Espitia-Baena, J.; Del, H.; Duran-Sandoval, R.; Fandiño-Franky, J.; Díaz-Castillo, F.; Alberto Gómez-Estrada, H. Química y Biología Del Extracto Etanólico Del Epicarpio de *Crescentia Cujete* L. (Totumo). *Rev. Cubana Plantas Medicinales* **2011**, 16 (4), 337–346. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1028-47962011000400005.
- (5) López M., L. G.; Rada M., D. F.; Góngora D., A. F.; Morales M., L. C.; Ospina L., M. C. Evaluación de la extracción del colorante de totumo (*Crescentia Cujete* L.) en un producto textil. *TecnoLógicas* **2022**, 25 (53), e2165. <https://doi.org/10.22430/22565337.2165>.
- (6) Mejía Suárez, K. N. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA FRENTE A UN MÉTODO DE CONSERVACIÓN PARA JARABE ELABORADO A BASE DE TOTUMO (*Crescentia Cujete*), SALVIA(*Lamiaceae*), Y ANAMÚ (*Petiveria*), POR LA

INDÍGENA ZENÚ. Monografía, Corporación Tecnológica de Bogotá, Bogotá D.C., 2022. <https://repository.udca.edu.co/handle/11158/4726> (accessed 2024-03-02).

- (7) Pratomy, I.; Aminatun, T.; Kuswandi, P. C. Effectiveness of Majapahit Leaf Extract (*Crescentia Cujete L.*) as a Natural Pesticide for Banana Leaf Roller Caterpillar (*Erionota Thrax L.*). *Indonesian Journal of Bioscience (IJOBI)* **2023**, *1* (1), 24–36. <https://doi.org/10.21831/ijobi.v1i1.106>.
- (8) Farias, A. L. F.; Volpe, M. I. C.; Miranda Júnior, J. P.; Leite, R. C. de S.; Santos, L. L.; Farias, C. W. F.; Sousa, R. de S. de; Almeida, S. S. M. da S. de. Estudo fitoquímico, físico-químico, de citotoxicidade frente a *Artemia salina* da espécie *Crescentia kujete* e atividade larvi-cida em *Aedes aegyptis*. *Caderno Pedagógico* **2024**, *21* (6), e4890. <https://doi.org/10.54033/cadpedv21n6-113>.
- (9) Santos Sousa, T. M.; dos Santos Pereira, C. C.; Xavier Santos, R. Phytochemical Activities of *Crescentia kujete L.*: An review. *Textura* **2023**, *17* (1), 83–97. <https://doi.org/10.22479/texturav17n1p83-97>.
- (10) Sánchez-Aguilar, R. F.; Alexis Castillo, Y.; Ibarra-Sanchez, S. A.; Muñoz-Chaves, J. A. Caracterización estructural, térmica y morfológica de *Crescentia kujete* (totumo) con potencial uso como polímero biodegradable. *Rev. U.D.C.A Actual. Divulg. Cient.* **2023**, *26* (2). <https://doi.org/10.31910/rudca.v26.n2.2023.2398>.
- (11) Utria, O.; Meza Castellar, P.; Bossa, L. Evaluación de pulpa de totumo (*Crescentia kujete L.*), matarratón (*Gliricidia sepium*) y sal (Cloruro de sodio) en la formulación de un ensilaje para el incremento del contenido protéico como alternativa en alimentación bovina. *Rev. Ing-Nova* **2023**, *2* (1), 34–42. <https://doi.org/10.32997/rin-2023-4261>.
- (12) Bello Alarcon, A. Obtención y caracterización físico-química del aceite de las semillas del mate (*Crescentia kujete L.*). *Cumbres* **2017**, *3* (1), 93–99. <https://doi.org/10.48190/cumbres.v3n1a12>.
- (13) Espinoza Olazabal, C. G.; Suyon Enriquez de Rodas, M. E. ACTIVIDAD ANTIBACTERIANA DEL EXTRACTO ETANÓLICO DE LAS HOJAS DE *Crescentia Cujete L.* (TOTUMO) FRENTE A *Staphylococcus aureus* ATCC 25923. Tesis, Universidad María Auxiliadora, Lima, 2023.

<https://repositorio.uma.edu.pe/handle/20.500.12970/1502> (accessed 2024-03-02).

- (14) Pavón, F. P.; Arriaza, F. M.; Granados, F. C. Obtención de carbón activado a partir de la cáscara del fruto del jícaro sabanero (*Crescentia alata*). *Rev. Cient. Agua y Conoci.* **2018**, *4*, 11–22.
<https://revistas.unan.edu.ni/index.php/RevAgua/article/view/3762>.
- (15) Vega-Gonzalez, J. A.; Paredes Mendoza, J. A.; Palma Ledesma, J. I.; Gomez Hurtado, W. C. Silver adsorption with olive pit activated carbon.; Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions: Trujillo, 2022.
<https://doi.org/10.18687/LEIRD2022.1.1.82>.
- (16) Carrasco Tito, B. S.; Londa Veletanga, E. G. Obtención de carbón activado a partir de la cáscara de coco “Cocos Nucífera L.” Trabajo de titulación, Universidad de Cuenca, Cuenca, 2018. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/31705> (accessed 2024-02-26).
- (17) García-Guel, Y. Y.; Múzquiz-Ramos, E. M.; Ríos-Hurtado, J. C. Telas de carbón activado: generalidades y aplicaciones. *TIP Rev. Espec. Cienc. Quím.-Biol.* **2019**, *22*. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2019.0.182>.
- (18) Amigun, A. T.; Jamiu, W.; Adebayo, G. B.; Jimoh, A. A. Adsorption Study of Utilizing Calabash (*crescentia cujete*) Seed in the Removal of Heavy Metals from Industrial Wastewater. *J. Appl. Sci. and Environ. Manage.* **2018**, *22* (2), 218.
<https://doi.org/10.4314/jasem.v22i2.11>.
- (19) Carvajal Ramirez, A.; Delgado Cruz, A. N. OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE CASCARILLA DE ARROZ Y CUESCO DE COCO, PARA LA ADSORCIÓN DE ORO DE SOLUCIONES. Proyecto de Grado, Universidad del Valle, Cali, 2018. <https://hdl.handle.net/10893/16945> (accessed 2024-02-26).
- (20) Jaya Rajan, M.; Indira Anish, C. Role of Activated Carbon in Water Treatment. In *Water Quality - New Perspectives*; IntechOpen, 2024.
<https://doi.org/10.5772/intechopen.108349>.

- (21) Burgos Campuzano, G. E.; Jaramillo Quiroz, J. L. APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS DE CACAO Y COCO PARA LA OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO, EN EL MILAGRO, PROVINCIA DEL GUAYAS. Trabajo de Titulación, Universidad de Guayaquil, Guayaquil, 2015. <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/8941> (accessed 2024-02-26).
- (22) Omoruwou, F.; Edegbe, U. D.; Madojemu, G. O. Removal of Total Hydrocarbon from Oilfield Produced Water Using Activated Carbon prepared from Coconut Shells. *J. Appl. Sci. Environ. Manage.* **2022**, *26* (11), 1861–1868. <https://doi.org/10.4314/jasem.v26i11.19>.
- (23) Sajid, M. Industrial Applications of Activated Carbon. In *Activated Carbon*; The Royal Society of Chemistry, 2023; pp 23–41. <https://doi.org/10.1039/BK9781839169861-00023>.
- (24) Callo Choquepuma, A. J.; Flores Quispe, N. D. Caracterización del carbón activado de huesos de Alpaca (*Vicugna pacos*) por activación química con hidróxido de sodio, ácido fosfórico y tiempo de pirólisis. Tesis, Universidad Peruana Unión, Juliaca, 2020. <http://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/4858> (accessed 2024-03-03).
- (25) Preeti, Mohod AG, Khandetod YP, Dhande KG and Sawant PA. Physico-Chemical Characterization of Coconut Shell (*Cocos Nucifera*). *IJABR* **2024**, *8* (3S), 118–122. <https://doi.org/10.33545/26174693.2024.v8.i3Sb.703>.
- (26) Scholz, M. How Activated Carbon Can Help You—Processes, Properties and Technological Applications. *Technologies (Basel)* **2023**, *11* (6), 153. <https://doi.org/10.3390/technologies11060153>.
- (27) Orozco Castro; Leidy Rocío. PREPARACIÓN DE CARBÓN ACTIVADO CONFORMADO A PARTIR DE *HYDROCHAR* DE BORRA DE CAFÉ. Trabajo de Investigación, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2019. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/77471> (accessed 2024-02-28).
- (28) Suárez Ramos, D. A. EVALUACIÓN DE LA ADSORCIÓN DEL CARBÓN OBTENIDO DEL MESOCARPIO DE CACAO (*Theobroma cacao L.*)

MODIFICADO POR ULTRASONIDO. Maestría en ciencias ambientales, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, 2019, Vol. 85. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/3950> (accessed 2024-08-05).

- (29) Carvajal Bernal, A. M.; Gomez Granados, F. A.; Giraldo Gutiérrez, L.; Moreno Piraján, J. C. Estudio de la adsorción de 4-nitrofenol desde solución acuosa sobre un carbón activado con heteroátomos nitrogenados en la superficie. aplicación del Modelo de Sips. *Rev. Colomb. Quím.* **2018**, *47* (1), 27–33. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v47n1.64561>.
- (30) Arévalo, F. H.; Reátegui, K. Calidad y rendimiento del carbón activado de la cáscara del fruto de calabaza (*Cucurbita ficifolia*) obtenido por método químico. *Rev. For. Perú* **2020**, *35* (1), 21. <https://doi.org/10.21704/rfp.v35i1.1473>.
- (31) Ganjoo, R.; Sharma, S.; Kumar, A.; Daouda, M. M. A. Activated Carbon: Fundamentals, Classification, and Properties. In *Activated Carbon*; The Royal Society of Chemistry, 2023; pp 1–22. <https://doi.org/10.1039/BK9781839169861-00001>.
- (32) Carbonel, D. Adsorción de Cadmio, Cobre y Plomo en Bentonita, Caolín y Zeolita Naturales y Modificadas: Una Revisión de los Parámetros de Operación, Isotermas y Cinética. *Ingeniería* **2018**, *23* (3). <https://doi.org/10.14483/23448393.13418>.
- (33) Xia, J.; Marthi, R.; Twinney, J.; Ghahreman, A. A Review on Adsorption Mechanism of Gold Cyanide Complex onto Activation Carbon. *J. Ind. Eng. Chem.* **2022**, *111*, 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2022.04.014>.
- (34) Guzman, C. V. R.; Ramírez, L. M.; Villarreal, S. G.; Vera, G. G. T.; Rosa, S. C. de la; Zarate, E. A. P. FABRICACION DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE CÁSCARA DE COCO PARA LA ADSORCION DE CIANURO DE SODIO. *J. Eng. Res.* **2022**, *2* (15), 2–8. <https://doi.org/10.22533/at.ed.3172152220072>.
- (35) Ponce Bravo, D. G. Aplicación del carbón activado de la cáscara de coco, en la purificación y absorción del hierro y plomo del agua de consumo de los pobladores de Paragsha - Pasco 2018. Tesis, Universidad Nacional Daniel

Alcides Carrión, Cerro de Pasco, 2019.
<http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/1563> (accessed 2024-02-28).

- (36) Daza Barranco, L. M.; Orrego M., J. F.; Fernández Hincapie, J. J. PREPARACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE CARBONES ACTIVADOS A PARTIR DE UN CARBÓN MINERAL DE LA CUENCA DEL CESAR (Colombia). *Rev. Politéc.* **2018**, 14 (26), 75–88. <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v14n26a7>.
- (37) Fu, Y.; Chen, J.; Xie, F.; Cao, Z.; Wang, W. Adsorption of Gold from Copper–Tartrate–Thiosulfate Solutions with Ion-Exchange Resins. *Metals (Basel)* **2023**, 13 (8), 1443. <https://doi.org/10.3390/met13081443>.
- (38) Susanibar, A. W. “EVALUACIÓN DE LA ADSORCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO PARA LA RECUPERACIÓN DE ORO A NIVEL EXPERIMENTAL.” Tesis, Universidad Nacional “José Faustino Sánchez Carrión,” Huacho, 2019. <https://repositorio.unjfsc.edu.pe/handle/20.500.14067/3605> (accessed 2024-03-03).
- (39) Huamei Activated Carbon Company de China. *¿Cómo seleccionar un buen carbón activado para la extracción de oro?*. Knowledge&news. <https://www.huameicarbon.com/es/oro-recuperacion-post/> (accessed 2024-08-07).
- (40) Vilca, K.; Rodríguez, S.; Atarama, U.; Cueva, C.; Concha, W. J.; Atausupa, M. A.; Gosgot, W. Pirólisis: una revisión de conceptos y aplicaciones en la gestión de residuos sólidos. *Rev. Investig. agroproducción sustentable* **2022**, 6 (1), 43–56. <https://doi.org/10.25127/aps.20221.854>.
- (41) Díaz Mesa, A. P.; Díaz Quintero, J. N. BIOCARBONES Y BIOACEITES A PARTIR DE RESIDUOS LIGNOCELULÓSICOS. Trabajo de investigación, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2022. <https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/15859e2b-711c-43b9-93de-670101aa6093/content> (accessed 2024-03-04).
- (42) Ibrahim, H. A.-H. Pyrolysis in the Chemical Industry and Its Major Industrial Applications. *Innovation Sci. Technol.* **2023**, 2 (2), 1–11. <https://doi.org/10.56397/IST.2023.03.01>.

- (43) Ordoñez Agredo, K.; Coral Coral, D. F.; Rodríguez Páez, J. E.; Diosa Astaiza, J. E.; Mosquera Vargas, E. E. Pirólisis del tereftalato de polietileno y poliestireno para la síntesis de nanoestructuras de carbono: una revisión bibliométrica. *Rev. UIS Ingenierías* **2023**, *22* (2). <https://doi.org/10.18273/REVUIN.V22N2-2023003>.
- (44) Liu, J.; Chen, X.; Chen, W.; Xia, M.; Chen, Y.; Chen, H.; Zeng, K.; Yang, H. Biomass pyrolysis mechanism for carbon-based high-value products. *Proc. Comb. Inst.* **2023**, *39* (3), 3157–3181. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2022.09.063>.
- (45) Vuppaladadiyam, A. K.; Varsha Vuppaladadiyam, S. S.; Sikarwar, V. S.; Ahmad, E.; Pant, K. K.; S, M.; Pandey, A.; Bhattacharya, S.; Sarmah, A.; Leu, S.-Y. A critical review on biomass pyrolysis: reaction mechanisms, process modeling and potential challenges. *J. Energy Inst.* **2023**, *108*, 101236. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2023.101236>.
- (46) Santiago Andrés, M. M.; Sergio Augusto, U. S. La pirólisis y otros métodos para el aprovechamiento de residuos de neumáticos como fuente de energía para la industria. Una revisión. In *Cuaderno Activa*; Colombia, 2021; Vol. 13, pp 41–60. <https://ojs.tdea.edu.co/index.php/cuadernoactiva/article/view/728>.
- (47) Altinkaya, P.; Wang, Z.; Korolev, I.; Hamuyuni, J.; Haapalainen, M.; Kolehmainen, E.; Yliniemi, K.; Lundström, M. Leaching and recovery of gold from ore in cyanide-free glycine media. *Miner. Eng.* **2020**, *158*, 106610. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106610>.
- (48) Sharma, G.; Sharma, S.; Kumar, A.; Lai, C. W.; Naushad, Mu.; Shehnaz; Iqbal, J.; Stadler, F. J. Activated Carbon as Superadsorbent and Sustainable Material for Diverse Applications. *Adsorpt. Sci. Technol.* **2022**, *2022*. <https://doi.org/10.1155/2022/4184809>.
- (49) Vasyunina, N. V.; Dubova, I. V.; Baksheev, S. P.; Kovel, M. R.; Makarova, V. V. Generation of sodium cyanide by coal gasification for gold recovery factories. *Proceedings of Irkutsk State Technical University* **2021**, *25* (4), 488–497. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-488-497>.

- (50) Trucillo, P.; Di Maio, E.; Lancia, A.; Di Natale, F. Selective Gold and Palladium Adsorption from Standard Aqueous Solutions. *Processes* **2021**, *9* (8), 1282. <https://doi.org/10.3390/pr9081282>.
- (51) Fernández Essenwanger, G. R.; Fernández Essenwanger, E. G.; Moreno Eustaquio, W.; Fernández Chavez, G. P. Impacto de la concentración de cobre en la detoxificación de soluciones cianuradas. *Rev. Cienc. Technol.* **2024**, *20* (1), 53–61. <https://doi.org/10.17268/rev.cyt.2024.01.04>.
- (52) Guanuche, F. A.; Sares, L. A.; Nieves, A. M.; Morales, M. A. Purificación de agua mediante carbón activo proveniente de la cáscara de arroz. *Conference Proceedings (Machala)* **2017**, *1* (1). <https://investigacion.utmachala.edu.ec/proceedings/index.php/utmach/article/view/148>
- (53) Sánchez T., E. L.; Garza González, Ma. T.; Almaguer Cantú, V.; Sáenz Tavera, I. D. C.; Liñan Montes, A. Estudio cinético e isoterma de adsorción de Ni(II) y Zn(II) utilizando biomasa del alga *Chlorella Sp.* inmovilizada. *Ciencia UANL* **2008**, *11* (2). <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/1876>.

ANEXOS

Anexo A. Recolección de la materia prima



Fuente: Elaboración propia

Anexo B. Fruto del “*Crescentia Cujete*” (totumo o mate)



Fuente: Elaboración propia

Anexo C. Corte, extracción de pulpa y lavado de la cáscara de “*Crescentia Cujete*”



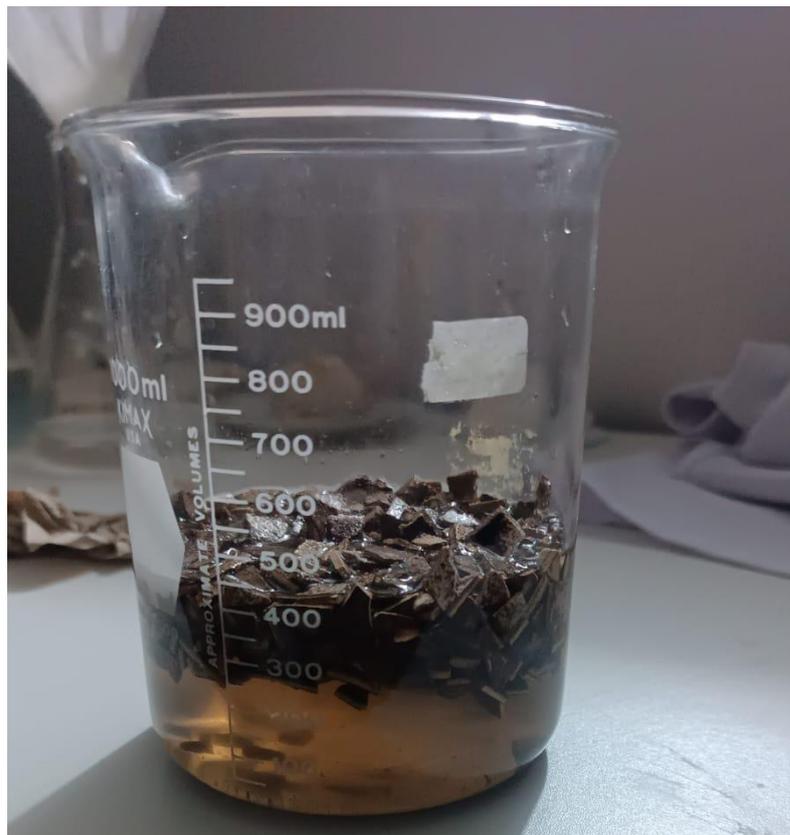
Fuente: Elaboración propia

Anexo D. Trituración de la cáscara



Fuente: Elaboración propia

Anexo E. Activación de la materia prima



Fuente: Elaboración propia

Anexo F. Carbonización de la materia prima a una temperatura y tiempo establecido



Fuente: Elaboración propia

Anexo G. Prueba de adsorción por medio de la solución pregnant cianurada



Fuente: Elaboración propia

Anexo H. Toma de muestras por cada hora durante 12 horas



Fuente: Elaboración propia