

**OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE CASCARILLA DE ARROZ
Y CUESCO DE COCO, PARA LA ADSORCIÓN DE ORO DE SOLUCIONES
CIANURADAS.**

**ALEXANDRA CARVAJAL RAMIREZ
ANGELA NATALIA DELGADO CRUZ**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
CALI, COLOMBIA**

2018

**OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE CASCARILLA DE ARROZ
Y CUESCO DE COCO, PARA LA ADSORCIÓN DE ORO DE SOLUCIONES
CIANURADAS.**

**ALEXANDRA CARVAJAL RAMIREZ
ANGELA NATALIA DELGADO CRUZ**

**PROYECTO DE GRADO PRESENTADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO**

DIRECTOR:

Ing. JORGE ENRIQUE LÓPEZ GALÁN, Ph.D

ASESOR:

Ing. DIEGO ARMANDO MONTENEGRO APRAEZ, M.Sc.

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
CALI, COLOMBIA**

2018

DEDICATORIA

A Dios, mi fuente de conocimiento y entendimiento. Él ha sido mi guía a lo largo de esta etapa y mi protector en los momentos que más lo he necesitado.

A mis padres, Ana Lucía y Miguel Ángel, que sin su apoyo no hubiera empezado esta carrera que me enorgullece tanto. Han sido mi inspiración para seguir adelante y un ejemplo de perseverancia a lo largo de mi vida.

A mis hermanas, Mónica y Deisy, quienes han sido mi fuente constante de apoyo y conocimiento. Gracias por sus palabras de aliento, su cariño incondicional y la mejor compañía que alguien puede pedir.

A mis sobrinos, Santiago y Sofía, por ser la luz de mi vida y la sonrisa de mis días. Sin ustedes no hubiera tenido la inspiración necesaria para culminar mi carrera.

A mi compañera de tesis y amiga, Alexandra, quien me acompañó en este proceso y aportó tiempo, conocimiento, ideas e iniciativa en cada una de las partes de este trabajo. Me llevo muchas cosas positivas de ti.

A mis compañeros, quienes me aportaron conocimientos y enseñanzas. En especial a Cindy Caicedo y Farly Vásquez, que sin su amistad la experiencia universitaria no hubiera sido la misma.

Angela Delgado

A todos los que nos acompañaron en este camino.

Alexandra Carvajal

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue respaldado por el Grupo de Investigación en Biocombustibles y Biorrefinerías (GRUBIOC). Agradecemos a todos los integrantes del grupo que proporcionaron la información y experiencia que ayudó mucho a la investigación.

En especial nos gustaría agradecer a nuestro director de tesis, Jorge Enrique López, Ph. D., por la orientación y los consejos que ha proporcionado desde el principio hasta el final de este trabajo. Hemos sido afortunadas de tener un director que respondió nuestras preguntas y consultas de manera tan acertada y pronta.

Agradecemos a nuestro asesor Diego Armando Montenegro, M.Sc., por su colaboración en los aspectos técnicos de este trabajo y mostrarnos como se puede emprender con los conocimientos adquiridos en la carrera a través de su empresa productora de carbón activado, Innovactiva Ingeniería S.A.S.

A nuestros profesores de la Escuela de Ingeniería Química, muchas gracias por compartir todos sus conocimientos, por su paciencia, sus consejos y por hacer de nuestro paso por la Universidad del Valle una experiencia llena de aprendizajes.

RESUMEN

En este estudio se utilizaron dos residuos agroindustriales: cuesco de coco y cascarilla de arroz para la elaboración de carbón activado (CA). Cada materia prima se adecuó hasta un tamaño de partícula entre 0.6 y 2 mm. En la experimentación de la activación química, se aplicó un diseño rotacional compuesto, realizando la impregnación con hidróxido de potasio en concentraciones de 0.17 a 5.82% p/p durante 20 horas, seguido de un tratamiento térmico de 2 horas a temperaturas entre 358 y 641 °C en atmósfera autogenerada. Luego de ese tratamiento, las muestras resultantes se lavaron con ácido clorhídrico al 1%, para eliminar las impurezas. Para los dos carbones se obtuvieron rendimientos promedio del 25%.

Los CA obtenidos se evaluaron y compararon en términos de sus capacidades para remover oro de soluciones aurocianuradas sintéticas. Las pruebas de adsorción, se realizaron durante una hora con agitación constante en una solución cianurada al 0.1% con unas concentraciones iniciales de 25-40 ppm de oro, se monitoreó el pH para que no bajara de 10. El cuesco de coco presentó la mayor capacidad de adsorción de oro, alcanzando un 46%, tratando el CA con condiciones a una temperatura de 641 °C y usando KOH al 0.17%. La cascarilla de arroz que obtuvo el 30% en capacidad de adsorción se trató a 580 °C y a una concentración de KOH al 1.37%. Finalmente se realizó un análisis económico donde se tuvieron en cuenta los equipos, personal, gastos de ventas, inversiones y flujos de caja.

Para producir 252 toneladas anuales de CA a partir de cuesco de coco se realizó un análisis económico global determinando una inversión inicial de \$924 325 626, donde se tendría un margen neto de 26.3% con un Valor Actual Neto (VAN) de \$2 546 791 915 y una tasa interna de retorno (TIR) de 53%, calculados a un horizonte de 10 años, lo que significa que el proceso es rentable.

Palabras Clave: carbón activado, cascarilla de arroz, cuesco de coco, adsorción, oro.

CONTENIDO

pág.

INTRODUCCIÓN.....	11
1. MARCO TEÓRICO.....	13
1.1 MARCO CONCEPTUAL	13
1.1.1 Carbón activado	13
1.1.2 Materia prima.....	13
1.1.3 Activación	14
1.1.5 Adsorción	17
1.2 ANTECEDENTES	19
2. METODOLOGÍA.....	23
2.1 REACTIVOS Y MATERIALES	23
2.2 EQUIPOS.....	23
Para el desarrollo del proyecto se utilizaron varios equipos, como la mufla eléctrica y el equipo de absorción atómica (Ver Tabla 3).....	23
2.3 PREPARACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA	25
2.3.1 Preparación.....	25
2.3.2 Muestreo y cuarteo	25
2.3.3 Análisis próximo	26
2.4 FASE EXPERIMENTAL	26
2.4.1 Diseño experimental.....	26
2.4.2 Activación química	27
2.4.3 Ensayos previos.....	29
2.4.4 Preparación de solución aurocianurada.....	30
2.4.5 Pruebas de adsorción de oro.....	30
2.4.6 Caracterización del carbón activado	30
2.5 COSTOS PRELIMINARES	32

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	35
3.1 PREPARACIÓN Y ADECUACIÓN DE LA MATERIA PRIMA	35
3.1.1 Análisis granulométrico	35
3.2 PREPARACIÓN DE CARBÓN ACTIVADO	38
3.2.1 Ensayos previos	38
3.2.2 Rendimiento del proceso de activación	39
3.2.3 Ensayos de adsorción	40
3.3 ANÁLISIS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL	40
3.4 CARACTERIZACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO OBTENIDO	44
4. ESTIMACIÓN ECONÓMICA	47
4.1 MATERIA PRIMA	47
4.2 BALANCE DE MASA	47
4.3 EQUIPOS DEL PROCESO	49
4.4 PERSONAL ENCARGADO DEL PROCESO	50
4.5 GASTOS DE VENTAS Y ADMINISTRATIVOS	52
4.6. INVERSIÓN INICIAL	53
4.7 COSTO DEL CARBÓN ACTIVADO	54
4.8 FLUJO DE CAJA	54
4.9 PÉRDIDAS Y GANANCIAS	55
4.10 FACTIBILIDAD DEL PROYECTO	56
5. CONCLUSIONES	57
6. RECOMENDACIONES	58
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
APÉNDICES	63
ANEXO 1: Método estándar para el índice de yodo aplicado al carbón activado	74

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Mecanismos de adsorción (Kolasinski, 2012).....	18
Tabla 2. Antecedentes.....	19
Tabla 3. Equipos utilizados para elaborar CA.....	23
Tabla 4. Metodología del análisis próximo.....	26
Tabla 5. Variables del diseño experimental.....	27
Tabla 6. Análisis próximo para las materias primas.....	37
Tabla 7. Condiciones más favorables en el rango experimental para producir CA.....	43
Tabla 8. Comparación de los CA.....	43
Tabla 9. Densidad y porosidad del CA.....	44
Tabla 10. Materia prima e insumos requeridos para la producción de 252 toneladas de carbón activado.....	47
Tabla 11. Equipos necesarios para la producción de carbón activado.....	49
Tabla 12. Nómina de una planta semi-industrial de carbón activado.....	51
Tabla 13. Gastos varios para la producción de CA.....	52
Tabla 14. Caja de la producción de CA anual.....	54
Tabla 15. Pérdidas y ganancias anuales en la de producción de CA.....	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Montaje experimental para la impregnación con KOH	28
Figura 2. Montaje experimental de la carbonización	29
Figura 3 Análisis diferencial para la cascarilla de arroz.....	35
Figura 4. Análisis diferencial para el cuesco de coco.....	36
Figura 5. Materia prima lavada y molida	36
Figura 6 a. CA con carbonatos b. Isotherma de Adsorción de CA con cascarilla de arroz.....	38
Figura 7. Rendimiento en la producción de CA a diferentes condiciones a. Según la temperatura b. Según la concentración de KOH	39
Figura 8. Efectos principales del CA a partir de cascarilla de arroz en el porcentaje de adsorción de oro	41
Figura 9. Efectos principales del CA a partir de cuesco de coco en el porcentaje de adsorción de oro.	41
Figura 10. Tendencias de la adsorción con el CA a partir de cascarilla de arroz.....	42
Figura 11. Tendencias de la adsorción con el CA a partir de cuesco de coco.....	42
Figura 12. Análisis granulométrico del CA a partir de cascarilla antes y despues de la adsorcion.	45
Figura 13. Análisis granulométrico del CA a partir de cuesco antes y después de la adsorción.	46
Figura 14. Diagrama de flujo para la producción anual de 252 toneladas de CA	48
Figura 15. Distribución de inversión inicial	53

LISTA DE APÉNDICES

APÉNDICE A. Procedimiento para la producción de carbón activado	63
APÉNDICE B. Diseño experimental	64
APÉNDICE C. Modelo de regresión para diseño experimental	65
APÉNDICE D. Pruebas preliminares con azul de metileno.....	66
APÉNDICE E. Procedimiento para la obtención de solución aurocianurada	69
APÉNDICE F. Efecto de las variables controlables de operación en el rango experimental ...	70
APÉNDICE G. Aportes salariales legales vigentes en Colombia	73

INTRODUCCIÓN

Entre las tecnologías disponibles para el beneficio del oro, se encuentran los procesos de amalgamación con mercurio y el de lixiviación con cianuro (CN^-). Actualmente, la legislación colombiana busca erradicar los procesos que involucren mercurio, tanto por su toxicidad como elemento libre como por los efectos negativos sobre la salud humana (por ejemplo, al ingerirlo en pescado contaminado con metilmercurio). Lo anterior hace que el proceso de cianuración sea un poco más aceptado.

El cianuro de sodio se disuelve en agua donde, en condiciones ligeramente oxidantes, disuelve el oro contenido en el mineral. La solución resultante que contiene oro se denomina “solución cargada”. Luego se adsorbe el Au en el CA de la solución cargada para eliminar impurezas presentes en dicha solución.

En este estudio para producir el CA, se usó cascarilla de arroz y cuesco de coco, porque se le quiso dar valor agregado a estos residuos. La cascarilla de arroz representa el 20% del cultivo de arroz, de una producción de 2 971 975 toneladas de arroz en el 2016 (DANE, 2017), es decir, 594 395 toneladas/año. El cuesco de coco constituye entre un 6 y un 10% del peso total del fruto, cuya producción aumentó en un 94.3% comparada con el año 2014, llegando a 3 912 toneladas/año (DANE, 2016).

Por lo anterior, el uso de estos precursores, para la obtención del CA, generaría un impacto positivo en el medio ambiente, al reemplazar los carbones de origen mineral y podrían ser más económicos por los costos de producción. Además, se ha demostrado que al carbonizar estas dos biomásas se generan diversidad de microporo, macroporos y mesoporos, para mejorar la adsorción. Por otro lado, los puntos isoeléctricos para la cascarilla de arroz y el cuesco son 9.10 y 9.45 respectivamente (Amaringo Villa & Hormaza Anaguano, 2013), facilitando el

mecanismo de intercambio iónico en la solución aurocianurada para adsorber oro cuando el pH es mayor a 9 y hay presencia de cationes Na^+ .

El proceso de activación química fue utilizado porque tiene varias ventajas respecto al proceso de activación física, ya que involucra una única etapa de tratamiento térmico, requiere temperaturas considerablemente menores, se alcanzan rendimientos favorables y puede disminuir los costos del proceso.

En la primera parte se describe los fundamentos teóricos de la adsorción y los antecedentes relacionados con esta investigación, luego se comenta la metodología y se discuten los resultados para la obtención del CA, donde se evaluó el efecto de la concentración del agente activante y la temperatura, sobre el porcentaje de oro adsorbido, finalmente se realizará una estimación económica para una planta industrial con una capacidad de 252 toneladas anuales.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 MARCO CONCEPTUAL

La producción de carbón activado a partir de residuos agroindustriales involucra variedad de conceptos que se explicaran en el presente capitulo.

1.1.1 Carbón activado

El carbón activado (CA) es una adaptación del carbón para elevar su capacidad de adsorción. La estructura de sus poros depende de la fuente de materia prima, de los macroporos ($d > 50$ nm), los cuales contribuyen muy poco en la superficie total, pero sirven de vía de acceso al otro sistema, denotado como el sistema de microporos ($d < 2$ nm), que es el “área de trabajo” donde más tiene lugar la adsorción (Knappe, Li, Quinlivan, & Wagner, 2003).

Generalmente, el carbón activado que se produce tiene áreas superficiales menores a $1\ 000\ \text{m}^2/\text{g}$, sin embargo en diversos estudios, se ha preparado el carbón activado usando métodos que involucran el uso de KOH con áreas superficiales de $2\ 696\ \text{m}^2/\text{g}$ (Hui & Zaini, 2015) y $2\ 451\ \text{m}^2/\text{g}$ (Hu & Srinivasan, 1999), para la cascarilla de arroz y el cuesco de coco, respectivamente.

1.1.2 Materia prima

Por cuestiones de costo y disponibilidad, los desechos vegetales son preferidos como fuente para elaborar carbón activado. Estos deben tener la resistencia y la dureza adecuada como para no reducir su tamaño durante el manejo, buscando no afectar o contaminar el proceso en el cual está siendo utilizado.

Cascarilla de arroz

La cascarilla de arroz es un material duro que protege los granos de arroz. Este material se usa como fertilizante, material en la fabricación de bloques de concreto, alimento para mascotas, etc. La cascarilla es insoluble en agua, resistente al desgaste y leñosa debido a su alto contenido

en sílice y lignina. Tiene un alto contenido calorífico (12-15 MJ kg⁻¹) y un alto contenido de cenizas (20-22% en masa) (Bridwater & Boocock, 1997).

Cuesco de coco

El cuesco de coco es la parte más fuerte de la estructura que cubre y protege la fruta. Se utiliza para hacer artesanías, fertilizantes y CA entre otras aplicaciones.

Se necesitan 4 kg de cuesco de coco para producir 1 kg de carbón activado, que se caracteriza por tener una gran cantidad de micro a meso-poros (30-50 nm), adecuados para la eliminación de moléculas pequeñas. El CA a partir del cuesco de coco tiene una dureza alta, puede ser utilizado en columnas de lecho fijo o lecho móvil, con un mínimo de pérdidas en los procesos de retro lavado y regeneración (Montenegro & Muñoz, 2010).

1.1.3 Activación

La preparación de CA consiste generalmente en dos pasos, el primero es la carbonización del material y el segundo la activación. La carbonización consiste en la descomposición térmica de la materia prima para eliminar las especies no carbonaceas y producir un material con una estructura que contenga poros muy pequeños y cerrados. Por otra parte, el propósito de la activación es agrandar los diámetros de los poros pequeños y crear nuevos poros, esto se logra a través de una activación física o química.

1.1.3.1 Carbonización

La carbonización implica una descomposición térmica del precursor, eliminando todo tipo de impurezas y produciendo una masa fija de carbón con una estructura rudimentaria de poros, este proceso se lleva a cabo en hornos rotatorios a temperaturas inferiores a 800 °C, en presencia de una corriente de gas inerte. Durante este proceso los elementos no carbonosos, como el hidrógeno y el oxígeno, presentes en la materia prima, son eliminados y los átomos de carbono

se organizan en estructuras microcristalinas. En la carbonización solo se logra una pequeña capacidad de adsorción (Sevilla, 2002).

1.1.3.2 Activación física

El material se carboniza para aumentar la tensión superficial molecular manteniendo una estructura de microporos lo mejor desarrollado posible, luego es necesario un segundo tratamiento térmico denominado "activación" donde se usan agentes gasificantes para promover los cambios iónicos y energéticos en la estructura del carbón. El dióxido de carbono (CO₂), vapor de agua, aire o una mezcla de ellos, producen una oxidación en el carbón cambiando los niveles electrónicos en los átomos de carbono.

Cuando se usa oxígeno molecular en la gasificación se produce una reacción exotérmica con velocidades de reacción difíciles de controlar. Como resultado, el oxígeno a presión atmosférica consume el material carbonáceo y no se forma la porosidad deseada. Cuando se tiene una temperatura baja y controlada (alrededor de 600 °C), se favorece la formación de dióxido de carbono y temperaturas más altas (alrededor de 900 °C), favorecen la producción de monóxido de carbono (Marsh & Rodríguez-Reinoso, 2006).

El uso de dióxido de carbono desarrolla microporos estrechos mientras que el uso del vapor agranda el tamaño de dichos microporos. Cuando se usan temperaturas altas se producen más mesoporos y macroporos con el vapor que con el dióxido de carbono. Por lo tanto, el CO₂ produce CA con volúmenes más grandes de microporos y una distribución de poros más estrecha que al utilizar vapor de agua (Hernández-Montoya, García-Servin, & Bueno-López, 2012).

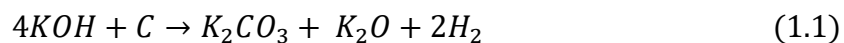
1.1.3.3 Activación Química

Proceso en el que la carbonización y la activación tienen lugar en una sola etapa, la materia prima es impregnada con agentes químicos como ácido fosfórico, hidróxido de potasio y de sodio y luego se lleva a cabo una descomposición térmica.

Los agentes usados actúan como agentes deshidratantes que tienen influencia en la descomposición pirolítica, inhibiendo la formación de alquitrán y por lo tanto conduciendo a altos rendimientos de carbón. Las temperaturas usadas en la activación química son más bajas que las usadas en la activación física (400°C a 900°C), como resultado, se forma una mejor estructura porosa. Además de estas ventajas sobre la activación física, la activación química permite un mejor control del desarrollo de microporosidad y promueve una reducción en el contenido mineral del carbón.

La activación química no sólo promueve cambios iónicos a la matriz de carbón, sino también cambios físicos, favoreciendo la creación de poros (por volatilización de la materia orgánica) y, dependiendo del agente químico, un mayor intercambio iónico y ampliación de los poros existentes, lo que aumenta el área de superficie interna y los volúmenes de poro, que son propiedades altamente deseables (Jiménez, 2011; Martínez, 2012).

En la activación con KOH, este reacciona con el precursor carbonoso durante el tratamiento térmico. Se han propuesto numerosas reacciones para explicar la activación (Monteiro de Castro, 2013). En general la reacción química entre el KOH y el material de carbono puede escribirse como:



El KOH reacciona con el carbón amorfo a altas temperaturas para formar carbonato de potasio (K₂CO₃) y el producto de descomposición óxido de potasio (K₂O) junto a la formación del hidrógeno. Se pueden producir reacciones adicionales durante el proceso de activación tales como:





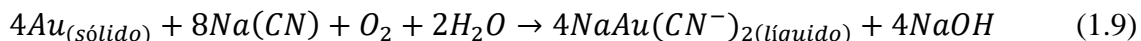
El vapor generado en la Ec. (1.2) reacciona con el carbono amorfo para producir CO como se muestra en la Ec. (1.3) conduciendo a la formación de poros. El carbono adicional es consumido para reducir K^+ a K^0 como se muestra en las Ec. (1.7) y (1.8). Todas estas pérdidas de carbono contribuyen a la creación de la estructura del carbón. (Viswanathan, Neel, & Varadarajan, 2009)

1.1.5 Adsorción

Operación en la cual se pone en contacto una solución con otra fase insoluble, el adsorbente sólido, con el propósito de hacerlo selectivo para determinados compuestos. Este proceso tiene lugar en la superficie del material en donde se concentran las moléculas, iones, átomos e incluso partículas coloidales. Las moléculas pueden ser adsorbidas sobre la superficie por dos mecanismos (ver Tabla 1) (Muñoz & Grau, 2013).

Mecanismo de adsorción del oro

La disolución de oro en el ion cianuro puede describirse mediante una reacción de óxido-reducción propuesta por Elsner:



La estructura física y química compleja del carbón activado permite la adsorción de diferentes especies por varios mecanismos (ver Tabla 1). En contraste el mecanismo exacto de adsorción es difícil de determinar. Sin embargo, se ha discutido (Navarro & Vargas, 2010), que el dicianuro de oro $Au(CN^-)_2$ se adsorbe, sin ningún cambio químico, desde soluciones alcalinas dentro del carbón activado .

El mecanismo tiene una etapa inicial de adsorción, que involucra la adsorción de un par iónico $M^+(Au(CN^-)_2)$, donde, M^+ o es un ión metálico que tiene una solubilidad más baja que el Au

(CN⁻)₂ en el medio de adsorción, seguida por una etapa de reducción, en la cual se forman especies del tipo Au(CN⁻) en la superficie del carbón.

Tabla 1. Mecanismos de adsorción (Kolasinski, 2012)

FISISORCIÓN	QUIMISORCIÓN
Las fuerzas que intervienen son de tipo físico, lo que permite a las moléculas moverse en la superficie del sólido de un lugar a otro, adsorción deslocalizada.	Fuerzas de tipo químico, la probabilidad de movimiento de las moléculas en la superficie es mínima, adsorción localizada.
Enlaces débiles. Interacciones de Van de Waals. Interacción entre dipolos permanentes e inducidos.	Moléculas sostenidas en la superficie por fuerzas de valencia, del mismo tipo de las que ocurren entre átomos.
Es más débil y siempre exotérmica, por lo que la temperatura de desorción es generalmente menor.	Al ocurrir una transformación química la energía de adsorción alcanza valores similares a las energías de reacción.
Al incrementar la temperatura, se reduce la adsorción. Es un proceso reversible.	Un incremento en la temperatura puede favorecer la adsorción. Es un proceso irreversible.

Espectroscopia de Absorción atómica

La muestra de las soluciones que quedan después de la adsorción, se lleva al equipo de absorción atómica donde se descompone en átomos mediante una llama u horno de grafito, ya que estos átomos absorben longitudes de onda características de la luz, la muestra de solución se atomiza, haciendo pasar un haz de radiación electromagnética, emitido desde átomos excitados a través de la muestra vaporizada. Parte de la radiación se absorbe por los átomos en la muestra, la

cantidad de luz absorbida es proporcional al número de átomos de oro (Logsdon, Hagelstein, & Mudder, 2001).

1.2 ANTECEDENTES

Se han realizado investigaciones tanto para obtener carbón activado a partir de biomásas como para su posterior aplicación en la adsorción de oro, algunos resultados son oportunos para este proyecto (Ver Tabla 2).

Tabla 2. Antecedentes

Año	Título	Comentarios
1974	Obtención de carbón activado a partir de cascarilla de arroz (Goez Sierra & Santacoloma Martinez).	Se descarta H_3PO_4 y se trabaja con $ZnCl_2$. El mejor resultado se obtuvo a 500 °C y 1 hora. La impregnación larga mejora la adsorción de yodo y la corta la adsorción de azul de metileno. Se recomienda realizar una activación secundaria con vapor de agua.
1981	Producción de carbón activado a partir de cascarilla de arroz usando K_2CO_3 y NaOH como catalizadores (Ramirez & Velasco).	El ion potasio resultó más eficiente que el ion sodio. Se obtuvo un área de 372- 450 m^2/g a 500 °C y 30 min.

<p>1996</p>	<p>The nature of gold-iodide adsorption onto coconut-shell carbon (Teirlinck & Petersen).</p>	<p>El estado del oro en la superficie del carbón dependió de factores como el pH y el nivel de oxígeno disuelto. Como adsorbente se utilizó un carbón activado proveniente de cuesco de coco con un área superficial de 1020 m²/g y densidad aparente de 800 kg/m³. A un valor bajo de pH (2-6.5), las principales especies en la solución son AuI₂ y I₃. Cuando el pH aumenta (6.5-11), el potencial de la solución decrece y las especies de oro predominantes en la solución cambian a oro elemental, mientras que las especies de yodo tienden a cambiar a yodo elemental. Por lo último, el triyoduro no está presente en la solución y el oro no se vuelve a disolver de la superficie del carbón.</p>
<hr/>		
<p>2007</p>	<p>Obtención de carbón activado a partir de cáscara de coco pretratada con vapor (Velásquez, Mejía, Carrasquilla, López, & Garcés).</p>	<p>Se sometió el cuesco de coco a un tratamiento con vapor para incrementar su contenido de lignina y su accesibilidad química, lo que tuvo un efecto significativo sobre el índice de yodo (580) al compararlo con un carbón comercial (480). La activación química se realizó en una relación ácido fosfórico/cuesco de coco 1:4 con un tiempo de impregnación de 48 h. La activación a 150°C por una hora y la carbonización a 475 °C por 2 h. Se comparó la severidad del pretratamiento, entendida como una función del tiempo de adsorción, con el índice de yodo obteniendo mejores valores con un nivel de severidad intermedia. Se concluye que, a un nivel bajo de severidad, las hemicelulosas no alcanzan a ser destruidas y se presenta una baja porosidad en el carbón.</p>

Y a un nivel alto de severidad, se destruyen todas las hemicelulosas y parte de la celulosa, afectando negativamente el área superficial del carbón.

Effects of carbonization on temperature characteristics of porosity in coconut shell chars and activated carbons derived from carbonized coconut shell chars (Li et al.).

Se trabajó a diferentes tiempos de activación (30, 60, 90 y 120 minutos) a una temperatura de 900 °C. A un tiempo de 120 minutos el área de la superficie, el volumen total y el volumen de los microporos fueron 1 926 m²/g, 1.26 cm³/g y 0.931 cm³/g, respectivamente. Se concluye que producir carbón activado con activación física resulta en altas áreas de superficie para diversas aplicaciones

Obtención de carbón activado a partir de la cáscara de coco a nivel piloto para la adsorción de oro (Montenegro & Muñoz).

Se utilizó KOH como agente activante con una concentración entre 10 y 50%. Se realizó una optimización que arrojó como mejor punto, una temperatura de calcinación de 783 °C, una concentración de 1% de KOH y un tiempo de calcinación de 2.5 horas.

Efecto de las propiedades físicas del carbón activado en la adsorción de oro desde medio cianuro (Navarro & Vargas).

Se trabajó con dos carbones activados provenientes del cuesco de coco. El carbón con 786 m²/g de superficie específica, 27% de microporos y 11.6 nm como diámetro promedio de poros, alcanzó la mayor carga por unidad de superficie (0.02 mg Au/m²).

2014 The synthesis and characterization of high purity mixed microporous - mesoporous activated carbon from rice husk using chemical activation with NaOH and KOH (Muniandy, Adam, Rahman, & Ng). El alto contenido de sílice en la cascarilla es una barrera hacia la síntesis de carbón amorfo con gran superficie. Han reportado el uso de lixiviación alcalina con NaOH para producir carbón activado de alta calidad a partir de cascarilla. Este método requiere que la cascarilla se mezcle con una solución de hidróxido a 0.1M durante 24h con el fin de eliminar la sílice en forma de solución de silicato de sodio. El mejor resultado se dio con KOH en una relación agente activante/cascarilla 4:1 a 850 °C durante 120 min, con un área de 2 696 m²/g.

2015 Review on the physicochemical treatments of rice husk for production of advanced materials (Soltani, Bahrami, Pech-Canul, & González). ZnCl₂ y H₃PO₄ se utilizan para la activación de biomásas como la madera y cáscara de nuez. KOH, K₂CO₃ y Na₂CO₃ se utilizan generalmente para la activación de residuo, que es rico en cenizas. Sin embargo, en comparación con el hidróxido, el carbonato tiene un menor costo, y la ruta de recuperación es fácil de lograr. El NaCO₃ tiene un efecto pobre de activación y el K₂CO₃ es considerado como la mejor opción. El tamaño de los poros obtenido por el uso de H₃PO₄ es más baja en comparación con otros agentes de activación.

2. METODOLOGÍA

2.1 REACTIVOS Y MATERIALES

- Cascarilla de arroz y cuesco de coco: precursores para elaborar carbón activado.
- Hidróxido de potasio (KOH): se usó para la activación química de los precursores.
- Ácido clorhídrico (HCl): se aplicó para lavar el carbón activado y retirar las cenizas.
- Azul de metileno: se usó para probar la capacidad de adsorción del carbón activado.
- Oro: Lámina de Oro de 24 quilates, para preparar la solución sintética
- Cianuro de sodio (NaCN): disolvente en agua utilizado para la extracción de oro.

2.2 EQUIPOS

Para el desarrollo del proyecto se utilizaron varios equipos, como la mufla eléctrica y el equipo de absorción atómica (Ver Tabla 3).

Tabla 3. Equipos utilizados para elaborar CA

Nombre	Marca y referencia	Características
Molino forrajero	TRAPP TRF 300	Trituradora de material seco. Potencia del motor: 2 y 3 cv. Rotación: 3000-3600 rpm. Láminas de corte (cuchilla) de acero especial.
Moto ro-tap	Siemens 1RF3 92-4YB90	Velocidad: 1800 rpm Voltaje: 115/230V

R

Plancha de agitación magnética con calentamiento	Corning PC-420D	Rango de velocidad de agitación: 60-1150 rpm Capacidad máxima de agitación: 10L Rango de temperatura: 5 a 550 °C Voltaje:120 V
Bomba de vacío	DryFast 2034B-01	Rango de temperatura: Voltaje: 115V Presión de vacío: 9 torr Caudal:35 L/min
Horno de secado	Daihan LabTech LDO-150F	Rango de temperatura: 15 a 250 °C Voltaje: 220 V
Mufla Eléctrica	Terrígeno 2504 Modelo D8	Aislamiento en ladrillo. Temperatura máxima de 1200 °C. Voltaje: 22-0V Resistencia tipo espiral.
Balanza Analítica	Radwag AS/220/C/2	Precisión de 0.0001 g
Espectrofotómetro visible	Thermo Fisher Scientific Genesys 10 vis	Rango de longitud de onda: 325 a 1100nm Voltaje: 240V

Multímetro portátil de SensiON+ MM150 pH/ORP/EC	Medición de pH: 0.00 - 14.00 Rango de medición: ±1999 mV
Espectrofotómetro de Thermo Fisher Ice 3000 absorción atómica AA05120801	Cuenta principalmente con atomizador individual, caja de gases automático y quemador estándar.

2.3 PREPARACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

El proceso de producción de carbón activado (ver Apéndice A), se realizó mediante los siguientes pasos:

2.3.1 Preparación

Se retiraron las impurezas grandes, como la fibra adherida al cuesco de coco. Luego se realizó un lavado a las dos muestras agroindustriales, cuesco de coco y cascarilla de arroz, para eliminar la suciedad adquirida en las bodegas de las empresas, se secaron al sol y se almacenaron hasta su uso. Fue necesario un proceso de molienda para el cuesco de coco, por lo que se usó un molino forrajero dada la dureza del material. Se realizó un análisis granulométrico a una serie de tamices ASTM para separar el material entre mallas 10 (2 mm de abertura) y 35 (0.5 mm de abertura), ya que es la granulometría comercial del CA (Carbotecnia, 2016).

2.3.2 Muestreo y cuarteo

Para elaborar CA se definieron dos precursores, cascarilla de arroz proveniente de la empresa Arroz Blanquita, y cuesco de coco de la empresa Cindy Coco Ltda. Para obtener una muestra representativa de los precursores, el material almacenado se homogenizó, se apiló, y se

realizaron cuarteos sucesivos hasta obtener las cantidades y muestras suficientes requeridas en todos los ensayos. Las partes sobrantes se conservaron (ASTM.D2013/D2013M-12, 2012).

2.3.3 Análisis próximo

Se establecieron propiedades de la materia prima, mediante un análisis próximo, con base a las normas ASTM para materiales carbonosos (ver Tabla 4).

Tabla 4. Metodología del análisis próximo

Nombre	Norma ASTM
Contenido Humedad	(ASTM.D2867-17, 2017)
Materia volátil	(ASTM.D5832-98, 2014)
Cenizas	(ASTM.D2866-11, 2011)
Carbono fijo	(ASTM.D3172-13, 2013)

2.4 FASE EXPERIMENTAL

2.4.1 Diseño experimental

Se seleccionaron dos variables de control (ver Tabla 5), implementando un diseño factorial rotacional compuesto (ver Apéndice B), con 13 corridas experimentales para cada precursor, incluyendo cuatro réplicas en el punto central. Los efectos de la temperatura de activación y concentración de KOH, así como sus interacciones sobre el porcentaje de adsorción de oro, fueron evaluados mediante un análisis de varianza ANOVA, al diseño de experimentos. Para analizar el porcentaje de adsorción de oro se utilizó un modelo de regresión ajustado para dicha variable (ver Apéndice C).

Se mantuvo constante la relación materia prima/activante (9:1 para la cascarilla y 4:1 para el cuesco), cuyos valores resultaron de ensayos previos con diferentes relaciones, hasta encontrar una adecuada agitación que permitiera el contacto entre la solución del agente activante y el

precursor. El tiempo de impregnación fue de 20 horas, pues en ensayos previos con azul de metileno se encontró que este tiempo no tenía una gran influencia en el porcentaje de adsorción final (ver Apéndice D), por lo tanto, se decidió elegir un tiempo suficiente para garantizar el contacto del material con el KOH. El tiempo de carbonización de 2 horas, elegido por recomendación de la literatura (Doloksaribu, Prihandoko, & Triyana, 2017), también se mantuvo constante.

Tabla 5. Variables del diseño experimental

Nombre	Unidades	Bajo	Alto
Concentración de Activante KOH	% p/p	1	5
Temperatura de Carbonización	°C	400	600

El desarrollo experimental fue aleatorio con el fin de disminuir los efectos sistemáticos entre los factores. Como variable de respuesta se seleccionó la capacidad de adsorción de oro aplicado a los CA obtenidos, por ser un análisis rápido y de bajo costo comparado a otras variables como el análisis BET o el índice de yodo. Los análisis de varianza y superficie de respuesta se realizaron con el software StatGraphics Centurión XVI versión 16.3.04 (2013).

2.4.2 Activación química

Se pesó aproximadamente 20 g del precursor y se mezcló con la solución de KOH a la concentración de cada ensayo durante 20 horas, para garantizar una buena impregnación (ver Figura 1), al final se filtró la mezcla y se secó en un horno a 100 °C para remover el agua sobrante antes de introducir a la mufla con el fin de realizar su respectiva carbonización.



Figura 1. Montaje experimental para la impregnación con KOH

Las muestras solidas se colocaron en un crisol con tapa para carbonizarlas en una mufla eléctrica a las temperaturas a evaluar durante 2 horas (ver Figura 2). La activación se llevó a cabo en la atmósfera autogenerada dentro del crisol, involucrando así parte del aire del espacio libre luego de cargar la muestra impregnada y de los compuestos volátiles que se liberan a partir del sólido (ver Figura 2).

El CA resultante se lavó con 50 mL de HCl al 1%, para proporcionar la limpieza de las cenizas, posteriormente se lavó con agua hasta alcanzar un pH neutro en el agua de lavado, finalmente, se colocó a 100 °C en un horno para remover la humedad.

Se determinó el rendimiento de esta etapa, como se indica en la siguiente relación:

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{\text{Cantidad de carbon activado obtenido}}{\text{Cantidad de materia prima utilizada}} * 100 \quad (2.1)$$

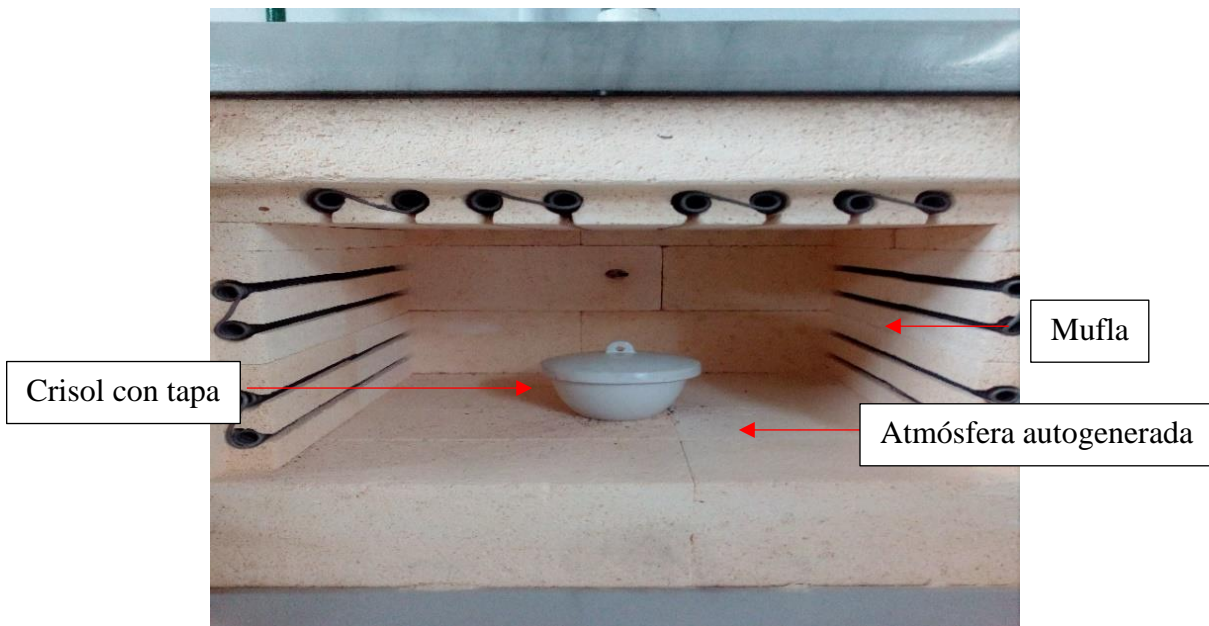


Figura 2. Montaje experimental de la carbonización

2.4.3 Ensayos previos

Se realizaron ensayos con el punto central del diseño experimental, para determinar la capacidad de adsorción del CA con azul de metileno, como una medida indirecta de la activación, para lo cual primero se realizó una curva de calibración del equipo (ver Apéndice D), utilizando la ecuación característica.

$$C = 5.861A + 0.0189 \quad (2.2)$$

Donde C es la concentración de azul de metileno en mg/L y A es la absorbancia en el espectrofotómetro.

Luego se mezcló 50 mL de solución de azul de metileno de 50 ppm con una muestra 0.1 g de carbón, durante 1 hora. Se midió la absorbancia de la solución en el espectrofotómetro a 600

nm, se halló la concentración final con la ecuación, y se midió el porcentaje de remoción de colorante.

2.4.4 Preparación de solución aurocianurada

Con un mineral molido residual proveniente de la mina de Suarez-Cauca se realizó una lixiviación ácida a fin de retirar cobre y la posterior cianuración para determinar cuánto oro se podía disolver (ver Apéndice E). Por otro lado, se preparó una solución sintética, añadiendo agua destilada y cianuro de sodio hasta obtener una concentración de 0.1 % p/p, monitoreando que el pH no subiera de 11 para evitar la formación de ácido cianhídrico, luego la lámina de oro se cortó en pequeñas partes, y se disolvió en la solución cianurada, para obtener una concentración final de 40 ppm de oro. (ver Apéndice E)

2.4.5 Pruebas de adsorción de oro

Se añadió 1g de CA a 50 mL de solución aurocianurada y se agitó durante 1 hora. Se monitoreó el pH, luego se filtró la solución y se tomó una muestra para llevarla al equipo de absorción atómica, en el cual se determina la concentración de oro residual, es decir el oro no adsorbido por el carbón activado. Con el dato anterior, se determinó la cantidad de oro que se adsorbió en el carbón activado (ver ecuación 2.3).

$$\text{Adsorción de oro Au (\%)} = \frac{\text{Masa inicial de Au} - \text{Masa final de Au}}{\text{Masa inicial de Au}} * 100 \quad (2.3)$$

2.4.6 Caracterización del carbón activado

Índice de yodo

Para determinar el índice de yodo se utilizó la Norma Técnica Colombiana (NTC4467, 1998) que se basa en el protocolo de la Asociación Americana de Ensayo de Materiales (ASTM.D4607-94, 2011), y especifican los métodos de ensayo para el carbón activado. Se define el número de yodo como la cantidad de yodo adsorbido (en mg) por gramo de carbón, siendo un indicativo relativo del poder de adsorción del material. A rasgos generales se siguen

estos pasos: se trata una muestra de CA con una solución estándar de yodo bajo condiciones específicas, se filtra para separar el carbón de la solución de yodo y se realiza la titulación en el filtrado con tiosulfato de sodio. La concentración de yodo en el filtrado residual es empleada para calcular los miligramos de yodo adsorbidos. (ver Anexo 1)

Índice de azul de metileno

El índice de azul de metileno para el CA está relacionado con la habilidad del carbón para adsorber el color y las sustancias de un alto peso molecular. Para determinar este índice se usó el procedimiento de la Norma Técnica Colombiana (NTC4467, 1998), que consiste en poner en contacto 25 mL de una solución stock (1200 mg de azul de metileno y 1000 mL de agua destilada) y 0.1 g de la muestra de CA con granulometría menor a 0.1 mm. Se dejó agitar hasta que ocurra la decoloración y se adicionaron porciones de 1 mL hasta que el CA perdió su capacidad de adsorción. El volumen de la solución de azul de metileno decolorado expresado en mL es el índice de azul de metileno del CA.

Humedad

Para hallar la humedad de las muestras de CA se usa el método estándar (ASTM.D2867-17, 2017) que provee tres métodos según el contenido del carbón. El usado en este procedimiento es un secado en horno a temperatura de 145 °C durante tres horas, usando aproximadamente 2 g de muestra.

Análisis granulométrico

Se requiere conocer la granulometría del material antes y después del proceso de adsorción. Para lograr esto se somete las muestras de CA preparado, a partir de cascarilla y cuesco, a una distribución de diámetro entre 0 y 2.3 mm. De igual manera, se realiza este procedimiento al CA que ha pasado por el proceso de adsorción de oro y que ha sido secado en un horno a 100 °C para que la humedad no afecte la distribución del material a lo largo de los tamices.

Porosidad

Se determinó la densidad aparente de los CA (ASTM.D2854-09, 2014), con un cilindro graduado de 100 mL. A su vez se determinó la densidad de la partícula con un picnómetro para calcular la porosidad con la Ec (2.4).

$$Porosidad (\%) = \frac{\rho_{particula} - \rho_{aparente}}{\rho_{particula}} \times 100 \quad (2.4)$$

2.5 COSTOS PRELIMINARES

Los costos globales se calcularon para el montaje de una planta de carbón activado basados en los resultados experimentales obtenidos, teniendo en cuenta los equipos, la adecuación del terreno, los sueldos del personal, la materia prima y los servicios industriales, siendo los dos primeros costos fijos, y los tres últimos costos variables. La importancia del enfoque de este proyecto hacia los costos fijos, se debe a su impacto en la economía del proyecto, pues constituyen un alto porcentaje en la inversión inicial, además, no son fácilmente modificables por un mejoramiento de diseño u operación de la planta. Son aspectos fáciles de controlar que solo se cambiarían considerando mejorar la seguridad en el sitio de trabajo.

Para realizar los respectivos cálculos de una unidad industrial, se consideran los siguientes aspectos:

- Límite máximo de producción: 360 ton/año, se obtuvo de multiplicar la capacidad del horno rotatorio (30 ton/mes) por 12 meses.
- Producción anual: 252 ton, corresponde al 70% del máximo de producción, para tener un margen amplio de producción en el caso que la demanda aumente.
- Venta anual: 228 ton, representa el 90% del CA producido, con el fin de conservar el 10% en stock.
- Rendimiento de cuesco de coco: 25%, obtenido a escala de laboratorio.

Se va a realizar únicamente la estimación económica para la producción de carbón activado a partir de hueso de coco, debido a que esta materia prima posee mayor resistencia mecánica que la cascarilla y por lo tanto es de mayor interés para su producción a gran escala. De igual forma, solo se tuvo en cuenta el proceso de producción anual de carbón activado, sin ninguna aplicación en particular.

Para el cálculo de la materia prima requerida, se consideró como base, las toneladas de carbón activado producidas anualmente, es decir 252 ton. Los costos unitarios se tomaron del precio a gran escala de cada uno de los insumos. Las condiciones y valores tomados se basaron en los resultados obtenidos en la fase experimental a escala de laboratorio.

Entre los insumos principales del proceso se tuvo en cuenta el ácido muriático (usado en el lavado final), el KOH (usado como agente activante) y el agua. Se calculó un costo para las 252 toneladas producidas al año, multiplicando los costos de estos materiales y el rendimiento de cada uno de estos.

Para las adecuaciones se tomó como heurística el 20% del capital de la inversión total. En la nómina solo se tuvo en cuenta el personal necesario para el funcionamiento de la planta, sin tener en cuenta áreas como investigación y desarrollo o control de calidad.

Para el proceso y sus balances de masa, se consideró una capacidad inicial del equipo de 30 toneladas/mes, y se respetó los rendimientos encontrados con el hueso de coco en la fase experimental a escala de laboratorio.

Para este proyecto se escogieron como indicadores de rentabilidad, el margen neto que indica la utilidad neta después de impuestos, el valor actual neto (VAN) expresado en la Ec. (2.5) y la tasa interna de retorno (TIR) que se obtiene igualando el VAN a cero.

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{BN_t}{(1+i)^t} - I_0 \quad (2.5)$$

Donde:

VAN: Valor actual neto

I₀: Valor de inversion inicial

BN_t: Beneficio neto del periodo

i: Tasa de descuento

n: numero de periodos considerados

El análisis económico se elaboró con un horizonte de 10 años de operación y una tasa de descuento igual a la tasa de interés activa vigente en Colombia igual a 7.5%.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 PREPARACIÓN Y ADECUACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

3.1.1 Análisis granulométrico

La cascarilla de arroz se distribuyó entre las mallas estándar 8 y 30, es decir, de abertura 2.38 y 0.595 mm (ver Figura 3 y 5), se intentó moler el material retenido malla 8 en un molino de bolas pero el material presentó resistencia mecánica y no cambio de tamaño, finalmente se decidió trabajar con el material entre mallas de abertura 2.38 y 0.595 mm, que representó un 85% del material.

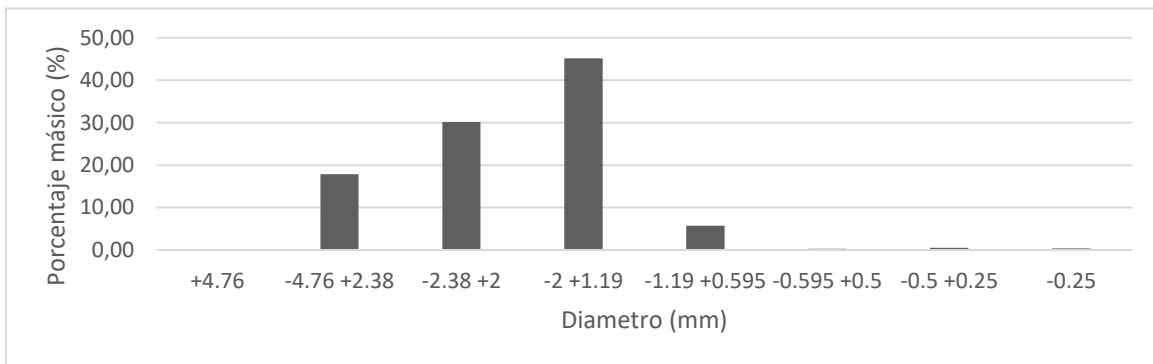


Figura 3 Análisis diferencial para la cascarilla de arroz.

Referente al cuesco de coco, inicialmente todo el material quedó retenido en la malla 4 (4.75 mm), por lo que fue necesario un proceso de molienda, con el que se obtuvo un 47% del material retenido entre diámetros de 2 y 0.5 mm (ver Figura 4 y 5). Se observó que en la malla con diámetro de 2.38, quedó un 25% del material retenido, el cual se volvió a pasar por el molino para que estuviera en el rango experimental definido. Se obtiene un 20% de finos aproximadamente que no se utilizó porque el carbón activado granular comercial está entre malla con diámetros de 2 y 0.5 mm (Carbotecnia, 2016).

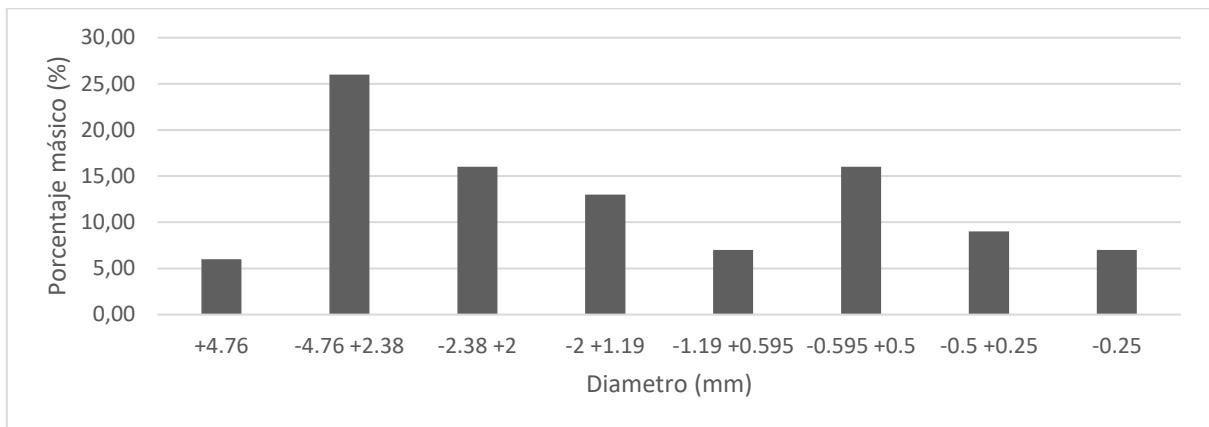


Figura 4. Análisis diferencial para el cuesco de coco



Figura 5. Materia prima lavada y molida

3.1.2 Análisis próximo

La materia prima que se utilizó (ver Tabla 6), tenía bajo contenido de humedad para ambos precursores, esto resultó favorable porque evita el rápido deterioro. El alto contenido de materia volátil en los dos precursores puede reducir el rendimiento en la etapa de carbonización, mientras que el bajo contenido inorgánico es vital debido a su capacidad para producir una baja cantidad de cenizas y un alto contenido de carbono fijo (Shamsuddin, Yusoff, & Sulaiman, 2016).

Los resultados para la materia volátil en ambos precursores fueron los esperados pues se encuentran dentro del rango esperado, entre 60 y 80%, para las biomásas sólidas, que siempre resulta ser mayor a la materia volátil del carbón mineral (Nogués, García-Galindo, & Rezeau, 2010).

Tabla 6. Análisis próximo para las materias primas

	Cascarilla de arroz	Cuesco de Coco
Humedad (%)	12	7
Materia volátil (%)	60	64
Cenizas (%)	17	3.2
Carbono Fijo (%)	13	26

La cascarilla de arroz tiene más cenizas, lo cual disminuye el contenido de carbono, es decir que se esperaría que el rendimiento del proceso de activación sea menor con cascarilla de arroz que con el cuesco de coco, al tener este el doble de contenido de carbono fijo. Resultados similares ocurrieron en un estudio realizado con cascarilla de arroz que tenía un contenido inicial de cenizas del 54%, la cual paso por un proceso de eliminación del material mineral y resultó en un contenido final de 4% de cenizas; inicialmente se había obtenido un índice de azul de metileno de 10 a 12 mg g⁻¹ y al final del proceso se obtuvo un índice de 66 a 135 mg g⁻¹, mostrando como afecta negativamente el contenido de cenizas en la materia prima (Ahiduzzaman & Sadrul, 2016).

Estos resultados concuerdan con otros estudios donde las biomásas usadas como precursores para obtener CA deben de tener alto contenido de carbono fijo 16 a 36%, y materia volátil 60 a 72% y bajo contenido de cenizas (AlOthman, Habila, Ali, Abdel Ghafar, & El-din Hassouna, 2014).

3.2 PREPARACIÓN DE CARBÓN ACTIVADO

3.2.1 Ensayos previos

Se realizó un ensayo en un crisol sin tapa, pero los precursores combustionaron quedando solo cenizas, por lo tanto, se evidenció el empleo del crisol con tapa, como un reactor hermético con atmósfera autogenerada, prescindiendo del nitrógeno como gas inertizante en esta etapa, lo que disminuye costos. Estudios anteriores presentan valores de la superficie específica con atmósfera autogenerada aproximados a los obtenidos en atmósfera de nitrógeno. (Zibetti, Benítez, & Calandri, 2000)

Es importante el lavado con HCl después de la carbonización, al omitir este paso los carbonatos, partículas blancas (ver Figura 6a), que se producen de la reacción del KOH con el CO₂, disminuyen la porosidad, esto se comprobó al medir el área superficial y obtener valores bajos, cercanos a 20 m²/g (ver Figura 6b).

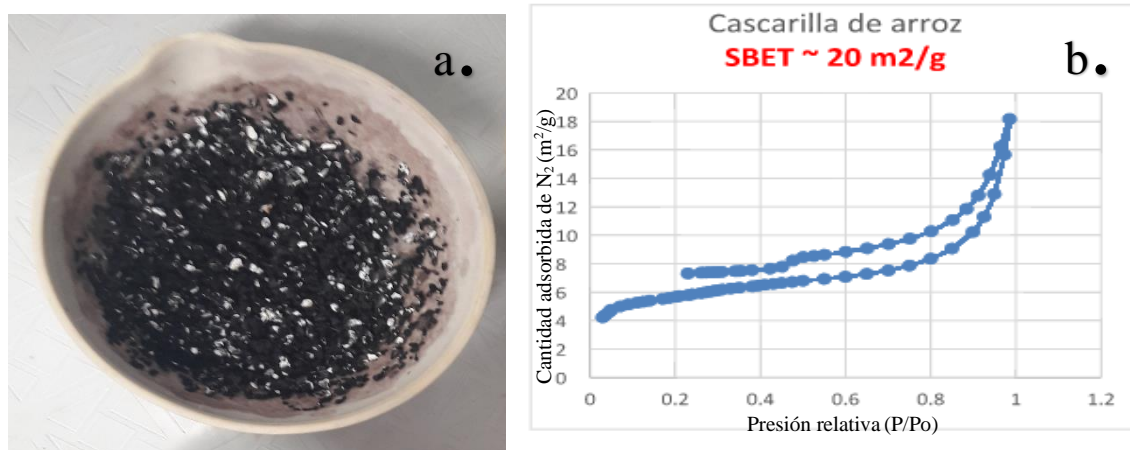


Figura 6 a. CA con carbonatos b. Isoterma de Adsorción de CA con cascarilla de arroz

Los efluentes obtenidos durante el lavado con la solución de HCl al 1%, contienen químicos que provocan toxicidad en el agua así que fue imperativo neutralizar las aguas efluentes con una solución de NaOH al 1%. Cuando un ácido fuerte se neutraliza con una base fuerte, el pH experimenta una brusca variación justamente en el punto de equivalencia, en este caso basta una

molécula de ácido con una molécula de la base para generar el cloruro de sodio y el agua, a fin de reducir los riesgos ambientales.

3.2.2 Rendimiento del proceso de activación

El CA como era de esperarse, presentó mayores rendimientos en las condiciones de proceso más suaves, disminuyendo de un 35 a un 28% en el cuesco y de un 24 a un 18% con el aumento de la temperatura (ver Figura 7a) ya que se aceleran las reacciones de deshidratación e incrementa la liberación de volátiles. El cuesco de coco presentó mayor rendimiento que la cascarilla, posiblemente por el porcentaje de carbono fijo.

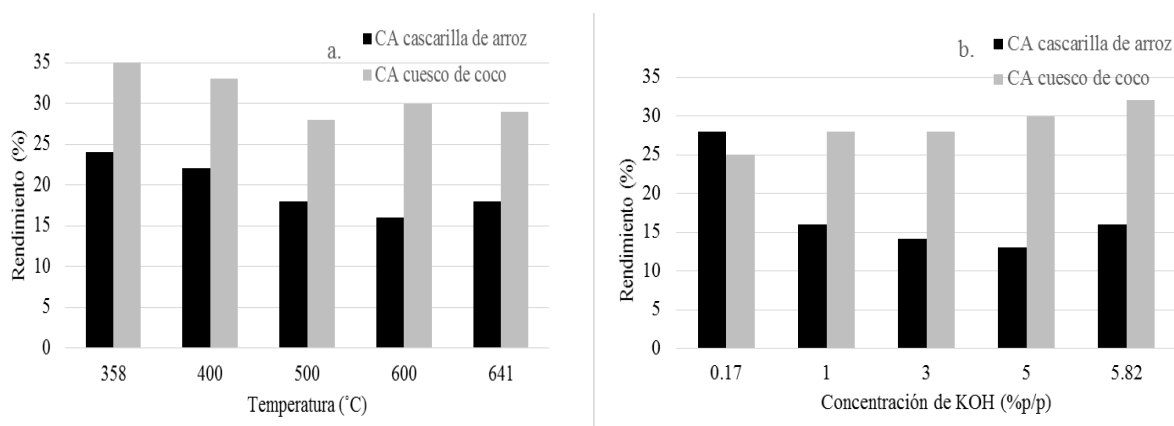


Figura 7. Rendimiento en la producción de CA a diferentes condiciones a. Según la temperatura b. Según la concentración de KOH

Se evidenciaron cambios en la coloración de la cascarilla de arroz en la etapa de impregnación, ya que al aumentar la concentración del KOH el material se vuelve más frágil y el rendimiento disminuye un 5%. En el cuesco, el KOH fortalece el material porque a medida que aumenta la concentración de KOH el rendimiento aumenta un 6% (ver Figura 7b).

Se reportan diferencias en los rendimientos de activación de biomasa y carbón mineral: en la cascarilla de café se obtiene un 17%, bagazo de caña un 26% (Solís Fuentes, Morales Téllez, Ayala Tirado, & Durán de Bazúa, 2012), cuesco de palma un 27% (Bastidas Moncayo, 2016) y carbones minerales supera el 50%. (J. Jiménez & Gonzáles, 2014)

3.2.3 Ensayos de adsorción

Se obtuvo una solución a partir del mineral residual con una concentración de oro de 1 ppm, el cual no se consideró viable en esta experimentación debido a que, el equipo de absorción atómica trabaja con una curva de calibración de 1 a 10 ppm. Si se trabajara con esta solución en los ensayos de adsorción sería necesaria una concentración de cada corrida experimental. En el mineral se debe tener en cuenta la competencia entre el complejo aurocianurado y el de otros metales como la plata, el cobre, el zinc, entre otros. Además, la tasa de adsorción de oro se ve incrementada con el aumento de su concentración en solución, por tanto, se decide usar solo la solución sintética de 40 ppm en los ensayos de adsorción.

La solución aurocianurada sintética se conserva a un pH de 11 a lo largo del ensayo. Durante el proceso se agregaron gotas de NaOH al 1%, debido a que el pH disminuyó por debajo de 9 cuando se agregó 1g de carbón activado, lo que genera ácido cianhídrico. El hidróxido de sodio además de estabilizar el pH entre 10 y 11, favoreció la adsorción química de oro en la solución cianurada por intercambio de cationes con Na⁺.

3.3 ANALISIS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

Tanto la temperatura como la concentración de KOH tienen diferencias significativas (valor P menor que 0.05) sobre la adsorción de oro del carbón activado, con un nivel de confianza del 95%. El modelo de regresión obtenido para el porcentaje de adsorción de oro explica el 80% de su variabilidad en CA a partir de cascarilla de arroz, y 93% para los carbones que tienen como precursor el cuesco de coco. (ver Apéndice F).

El carbón obtenido de cascarilla de arroz alcanzó un rango máximo de inflexión para ambas variables experimentales, pero para el caso del cuesco de coco el rango experimental no fue suficiente para alcanzar un máximo, esto sugiere que es posible alcanzar adsorciones más altas si se aumenta un poco el rango de la temperatura y se disminuye el de la concentración de KOH (ver Figuras 8 y 9).

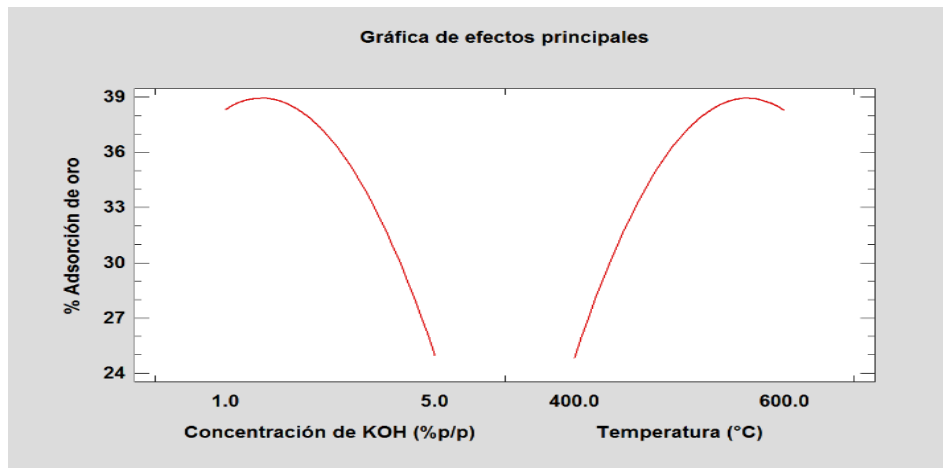


Figura 8. Efectos principales del CA a partir de cascarilla de arroz en el porcentaje de adsorción de oro

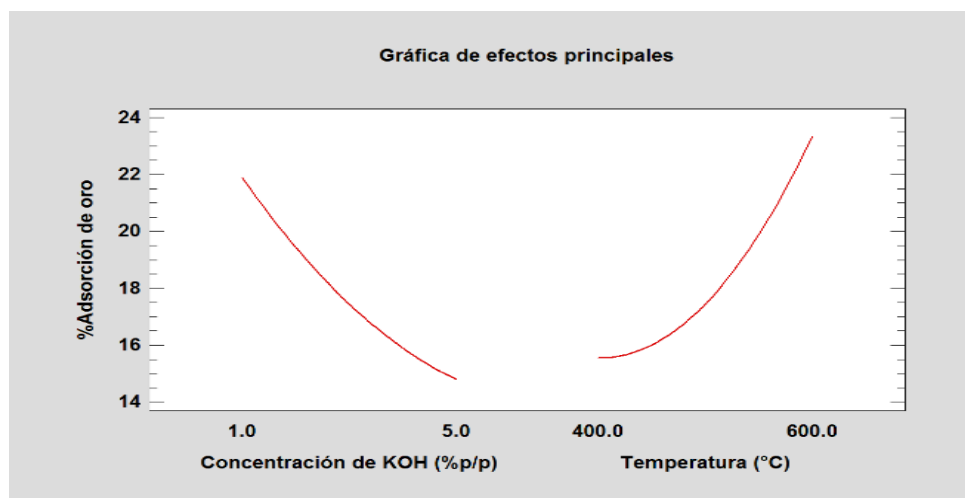


Figura 9. Efectos principales del CA a partir de cuesco de coco en el porcentaje de adsorción de oro.

Dentro del rango de valores ensayados, las mejores adsorciones, un poco mayores al 40%, se presentaron a una temperatura de 580 ± 10 °C y una concentración de KOH de 1.2 ± 0.4 % p/p para el CA a partir de cascarilla de arroz (ver Figura 10). Para el CA a partir de cuesco de coco, las mejores adsorciones, un poco mayores al 35%, se presentan para una temperatura mayor a 600 °C y una concentración de KOH menor a 0.5% p/p de KOH (ver Figura 11).

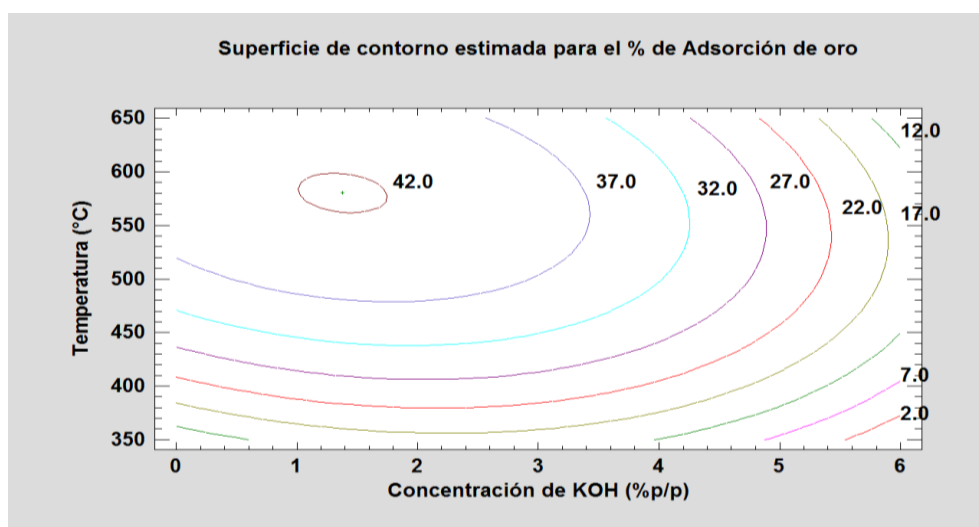


Figura 10. Tendencias de la adsorción con el CA a partir de cascarilla de arroz.

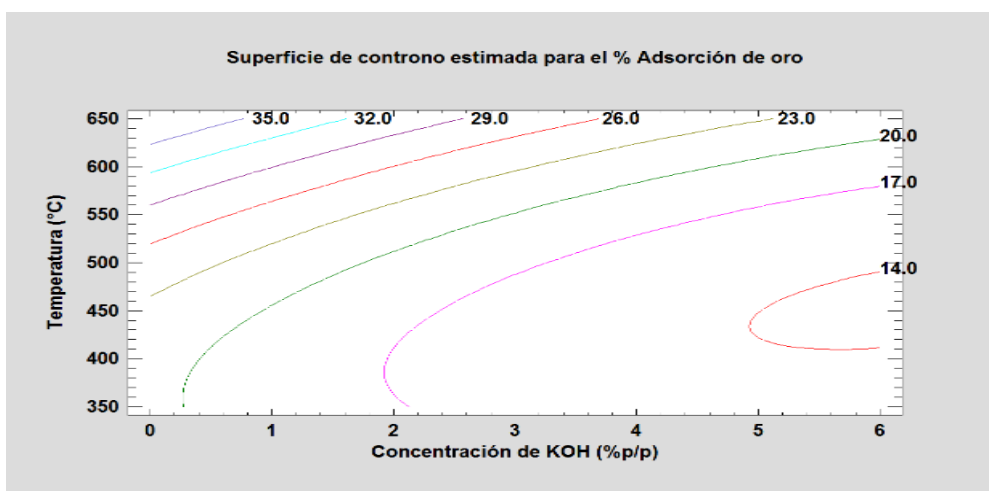


Figura 11. Tendencias de la adsorción con el CA a partir de cuesco de coco

A través de la superficie de respuesta las condiciones más favorables para la realización del carbón activado para la adsorción de oro son:

Tabla 7. Condiciones más favorables en el rango experimental para producir CA

	CA Cascarilla de arroz	CA Cuesco de coco
KOH (%p/p)	1.37	0.17
Temperatura (°C)	580	641

Se repitieron nuevamente los puntos que determina el programa como óptimos dentro del rango establecido, y se realizó la validación tomando 10 g de CA con las mejores condiciones encontradas para cada precursor (ver Tabla 7) y 500 mL de la solución aurocianurada sintética, estos nuevos ensayos arrojaron una adsorción del 33% para el CA a partir de cuesco de coco y 46% para el CA a partir de cascarilla de arroz (Tabla 8), datos que están acordes a las superficies de respuesta obtenidas anteriormente.

Tabla 8. Comparación de los CA

	CA Cascarilla de arroz	CA Cuesco de coco
Rendimiento (%)	≈20	≈30
% Adsorción oro (40 ppm Au)	≈46	≈33
% Adsorción azul de metileno	98	89

Ambos precursores logran el objetivo de remover oro, al comparar los resultados con los ensayos del azul de metileno se comprobó que la cascarilla de arroz tiene mayor capacidad de remoción de ambos contaminantes, aunque por su fragilidad sería viable realizar briquetas en vez de usarlo granular.

3.4 CARACTERIZACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO OBTENIDO

Se realizó la caracterización del carbón activado de la validación obtenido bajo las condiciones más favorables en el rango experimental (ver Tabla 7).

La densidad aparente del CA que teniendo como precursor el cuesco de coco, es muy cercana al valor típico para este precursor de 0.5 g/cm^3 (ASTM.D2854-09, 2014), el que tiene como precursor cascarilla de arroz se acerca a este rango (ver Tabla 9). Ambos CA tienen buena porosidad, aunque es mejor el de la cascarilla de arroz.

Tabla 9. Densidad y porosidad del CA.

Variable	CA Cascarilla de arroz	CA Cuesco de coco
$\rho_{aparente} \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right)$	0.1657	0.4914
$\rho_{partícula} \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right)$	0.9422	1.2937
Porosidad (%)	82.41	62.02

Generalmente, contenidos de humedad mayores a 3% no son favorables para aplicaciones convencionales (Pogaku, Bono, & Chu, 2013). Para el cuesco de coco y cascarilla de arroz los contenidos de humedad son relativamente bajos (0.42 y 2.77%), los cuales son propicios para la adsorción de oro.

El índice de yodo para el CA a partir de cuesco de coco es 7.6 veces mayor que el obtenido a partir de cascarilla de arroz (371 y 49 mg/g CA), lo cual facilita una superficie de partícula más grande que puede tener más sitios activos y una estructura porosa de menor tamaño.

Para el cuesco de coco y la cascarilla de arroz el índice de azul de metileno resultó igual a 29 y 30 mL solución stock/0.1 g CA. Estos valores indican una distribución de tamaño de poros similar para los dos precursores favoreciendo la capacidad de adsorción para moléculas de tamaño similar al azul de metileno, es decir, mayores a 1.5 nm.

El análisis granulométrico del CA a partir de cascarilla (ver Figura 12), antes y después de la adsorción, mostró que el tamaño del material se distribuye en un amplio rango del diámetro de malla (0-2 mm). Después del proceso de adsorción, la distribución de partículas fue cambiando significativamente a partir de 0.2 mm presentándose más finos comparado al carbón activado inicial, lo que significa que la cascarilla presenta una resistencia mecánica baja.

Para el cuesco de coco (ver Figura 13), la distribución del material, antes del proceso de adsorción, constituye en su mayoría partículas gruesas pues el 80% del material acumulado queda retenido en un diámetro de 0.75 mm. Después de la adsorción, el 80% del material queda retenido en un diámetro de 0.85 mm, este cambio no es muy significativo comparado al cambio global de la granulometría. El CA a partir de cuesco de coco presenta una mayor resistencia mecánica al pasar por el proceso de adsorción, por lo tanto, se hizo la estimación económica con este precursor.

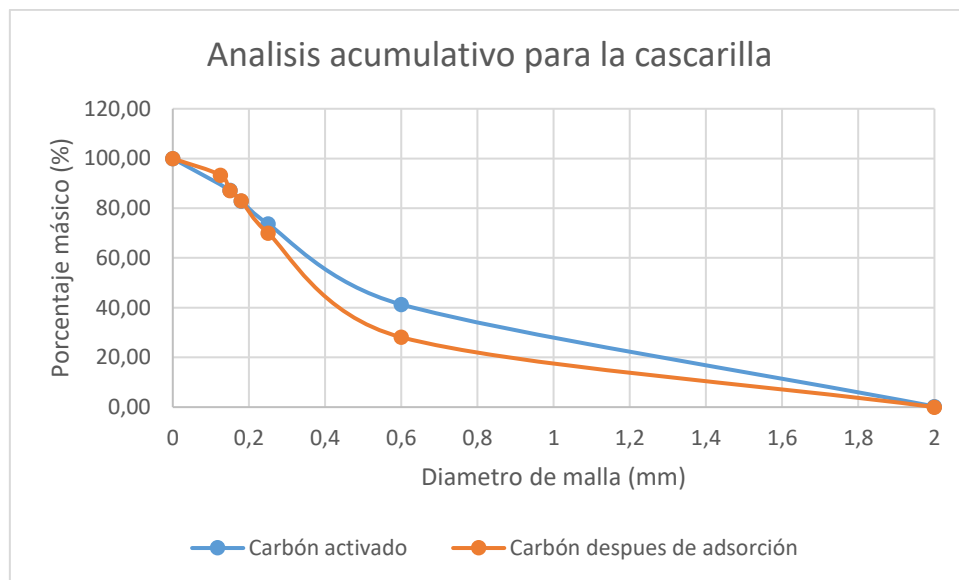


Figura 12. Análisis granulométrico del CA a partir de cascarilla antes y después de la adsorción.

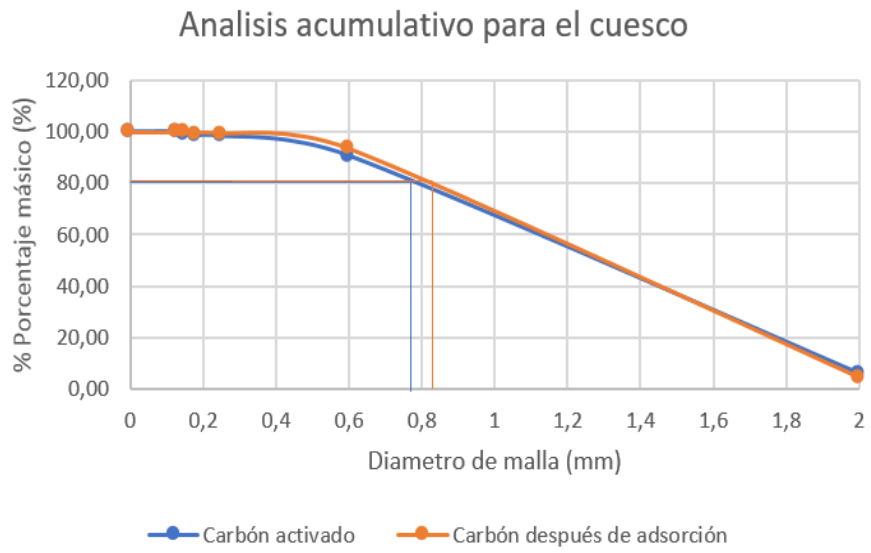


Figura 13. Análisis granulométrico del CA a partir de cuesco antes y después de la adsorción.

4. ESTIMACIÓN ECONÓMICA

4.1 MATERIA PRIMA

Se observó un costo de carbón activado, solo teniendo en cuenta la materia prima, igual a \$341 526 014 ton/año (Tabla 10).

Tabla 10. Materia prima e insumos requeridos para la producción de 252 toneladas de carbón activado

Materia prima	Costo de materia prima	Rendimiento (%)	Costo total (\$/ ton)	Costo total (\$/252 ton)
Cuesco de coco	230 000 \$/ton	25	920 000	231 840 000
Agua	2 548 \$/ m ³	4	63 699	16 052 211
KOH	2 340 \$/kg	3.58	65 327	16 462 311
Ácido muriático	2 750 \$/l	0.9	306 236	77 171 492
Costo total de materia prima			1 355 262	341 526 014

4.2 BALANCE DE MASA

El cuesco de coco arroja un rendimiento del 25% pues en el proceso se consideraron las pérdidas de masa, en la molienda y clasificación (39.34%), en la impregnación, filtración y secado (0.93%), en la carbonización realizada por 2 horas a 641°C (38.10%) y en el lavado usando HCl con su respectivo filtrado y secado (32.78%). En general, las pérdidas totales de masa de todo el proceso fueron del 74.63%, de acuerdo con el trabajo experimental realizado (ver Figura 14).

Se obtiene gran cantidad de residuos en la molienda y clasificación, se debería encontrar otras aplicaciones para este material o realizar estudios para producir CA con diferentes granulometrías. Las soluciones remanentes que contienen KOH y HCl también pueden ser recirculadas al proceso para obtener menos residuos y ahorrar en costos.

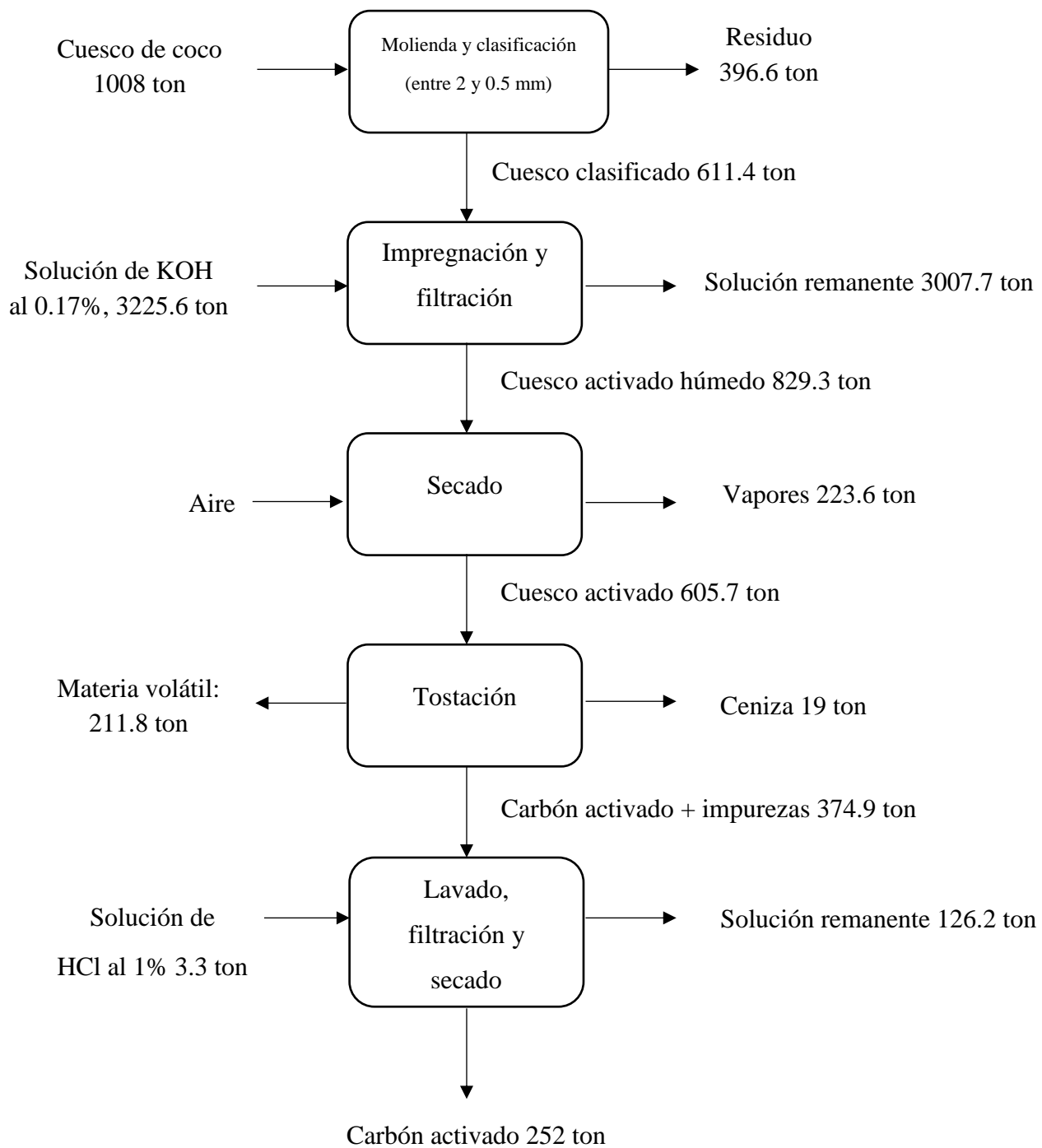


Figura 14. Diagrama de flujo para la producción anual de 252 toneladas de CA

4.3 EQUIPOS DEL PROCESO

Los costos de los principales equipos para obtener la producción requerida de CA (ver Tabla 11), se tomaron de acuerdo a valores dados por diferentes fabricantes y proveedores nacionales, principalmente con distribuidores de la ciudad de Cali.

Tabla 11. Equipos necesarios para la producción de carbón activado

Equipos	Función	Material	Valor (COP)
Tanque de activación	Realizar la activación del precursor con el agente activante.	Acero inoxidable	8 000 000
Horno Rotatorio	Realizar la carbonización del material.	Acero inoxidable	600 000 000
Enfriador	El CA sale con una temperatura alta del horno, se requiere enfriamiento.	Acero inoxidable	12 000 000
Molino de martillos	La materia prima viene con una granulometría diferente a la requerida, por lo que se requiere clasificarla antes de iniciar la producción de CA.	Acero al carbón	5 000 000
Secador	Reducir la humedad del CA una vez haya finalizado el proceso de producción.	Acero al carbón	9 000 000
Filtro- prensa	Separar la solución con el agente químico del precursor.	Acero al carbón	30 000 000

Clasificador granulométrico	Se requiere una granulometría específica de la materia prima antes de la producción de CA y del CA comercial (entre 0.5 y 2 mm).	Acero al carbón	6 000 000
Empacadora	Almacenar el CA en bolsas plásticas para su respectivo despacho.	Acero al carbón	5 000 000
Balanza	Medir la masa del CA para despachar las cantidades requeridas por el cliente.	Acero al carbón	1 000 000
Elementos de laboratorio	Consiste en variedad de instrumentos como termómetros, vasos de precipitado, Erlenmeyer, espátulas, planchas de agitación, entre otros. Se requieren para realizar pruebas de adsorción con diferentes materiales.	Varios	20 000 000
Total maquinaria y equipo			696 000 000

4.4 PERSONAL ENCARGADO DEL PROCESO

Para obtener la nómina de la planta semi-industrial, se consideró que el horno rotatorio no puede parar, a menos que requiera mantenimiento, por lo tanto, los turnos se dividieron en tres, donde un operario se encargue del buen funcionamiento del equipo. Se tuvo en cuenta el salario básico de un empleado con los aportes de seguridad y prestación social a la que están obligadas las empresas por las leyes colombianas (ver Apéndice G), y se obtuvo el total de la nómina requerida mensual y anualmente (ver Tabla 12).

Tabla 12. Nómina de una planta semi-industrial de carbón activado

No	Cargo	Salario fijo mensual que devengara el empleado (COP)	Salario total mensual que la empresa pagará al empleado (COP)
1	Ingeniero de producción	3 000 000	4 515 600
2	Operario 1	781 242	1 264 136
3	Operario 2	781 242	1 264 136
4	Operario 3	781 242	1 264 136
5	Secretaria/auxiliar contable	1 000 000	1 588 340
6	Compras	2 000 000	3 010 400
7	Ventas	2 000 000	3 010 400
Total mensual		10 343 726	15 922 220

Para el flujo de nómina anual, se tuvo en cuenta que cada mes se les pagaría a los empleados un total de \$13 256 315, obtenido de descontar el porcentaje correspondiente a primas y cesantías al salario total mensual que la empresa debe pagar (\$15 922 220). El valor correspondiente a la prima de \$7 957 926 se pagaría en el sexto y doceavo mes. De esta manera, el flujo de nómina es de \$174 991 635/año.

4.5 GASTOS DE VENTAS Y ADMINISTRATIVOS

Dentro de estos gastos se tuvo en cuenta los costos de arrendamiento, de servicios públicos, de transporte de empleados y producto terminado (ver Tabla 13).

Tabla 13. Gastos varios para la producción de CA.

Descripción	Gastos al año (\$)
Arriendo	36 000 000
Servicios	36 000 000
Aseo	2 400 000
Mantenimiento	5 000 000
Papelería y Útiles	3 000 000
Imprevistos	6 000 000
Publicidad	3 300 000
Gastos de transporte de producto	12 000 000
Transporte de empleados	6 000 000
Total Anual	109 700 000

La planta se localizaría en una bodega en el municipio de Jamundí, ubicación de la empresa que produce carbón activado y apoya este trabajo: Innovactiva, por lo tanto, se toma el arriendo del lugar como \$3 000 000 mensuales y del mismo valor serían los servicios con razón industrial.

El gasto de transporte de los productos se estima como \$1 000 000/mes si se va a hacer la venta en municipios cercanos a la planta. De igual manera, se invertiría en el transporte de los empleados con desplazamientos laborales.

La publicidad es importante para que la empresa pueda darse a conocer, por consiguiente, es importante una inversión de \$3 300 000/año en congresos, seminarios, publicaciones, entre otros. El resto de ítems es un aproximado según el tamaño de producción y el personal que se estima en el trabajo.

4.6. INVERSIÓN INICIAL

Se encontró que el 20% de la inversión total son adecuaciones, como los cambios y mejoras que se deben realizar al lugar en donde estará ubicada la empresa. Para el primer mes se hace una inversión de materia prima igual a \$28 460 501, que se obtiene de multiplicar el valor del costo de una tonelada de carbón activado (ver Tabla 10) por las 21 toneladas/mes que se deben producir. El porcentaje más alto corresponde a la maquinaria y equipos, que es una inversión con una vida útil, de aproximadamente 10 años. La inversión total fue de \$924 325 626 (ver Figura 15).

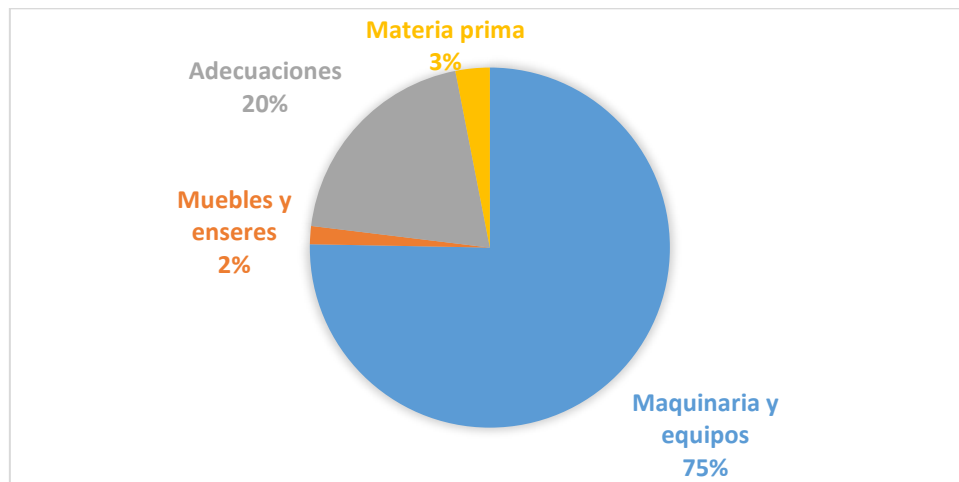


Figura 15. Distribución de inversión inicial

4.7 COSTO DEL CARBÓN ACTIVADO

El costo unitario de 1 tonelada de CA es de \$1 355 262/ton obtenido a partir del costo de la materia prima y reactivos utilizados. Se utilizó un factor de 0.87, que se obtiene de dividir el total de gastos administrativos y de ventas por el total de la materia prima. Al valor inicial del carbón activado se le sumó el factor para tener un valor de \$2 530 345/ton. El precio al público de \$5 060 690/ton, se obtuvo teniendo en cuenta un 100% de ganancia.

4.8 FLUJO DE CAJA

El total de ingresos mensuales se obtuvo multiplicando la venta mensual de CA que se planteó inicialmente de 19 ton/mes por el precio al público mencionado anteriormente. Se define el porcentaje de ventas de crédito, igual a 60% con un plazo para el pago de 30 días. Por lo tanto, para el primer mes se tiene un ingreso de \$38 741 462 y para los siguientes 11 meses, un ingreso de \$96 853 655. El total de ingresos anuales se obtienen sumando los 12 meses (Ver Tabla 14).

Dentro de los egresos se tienen los gastos operativos, los cuales se obtienen de multiplicar el valor de producción de 1 tonelada de CA (\$1 355 262) por 21 ton que es la cantidad de CA que se va a producir mensualmente. En la siguiente tabla se resume dichos valores para una producción anual.

Tabla 14. Caja de la producción de CA anual.

Descripción	Valor (\$/ton)
Total ingresos	1 104 131 667
Egresos	
Operativos	313 065 514
Gastos de administración y ventas	109 700 000
Nomina	174 991 635
Impuestos	4 067 854
Total egresos	601 825 002
Caja acumulada	502 306 665

4.9 PÉRDIDAS Y GANANCIAS

Las ventas esperadas del CA se obtienen con las 19 toneladas/mes que están disponibles al público y con su precio comercial, sin tener en cuenta el porcentaje de ventas que se realizan mediante crédito. Los costos de ventas tienen en cuenta las mismas 19 toneladas/mes multiplicadas por el valor de la materia prima para producir 1 ton de CA.

El margen bruto se obtiene dividiendo la utilidad bruta entre las ventas esperadas. Para la depreciación de equipos se tiene una vida útil de 10 años que incluye la maquinaria, muebles y adecuaciones. La utilidad operacional resulta de restar los gastos administrativos y de ventas, la nómina y la depreciación de equipos a la utilidad bruta, teniendo un margen operacional de 39.8% y un margen neto (después de impuestos) de 26.3%. Este último resultado es un indicador de rentabilidad positivo que genera la producción de CA.

Tabla 15. Pérdidas y ganancias anuales en la de producción de CA.

Descripción	Valor anual
Ventas esperadas	1 162 243 860
Costos de ventas	308 999 728
Utilidad bruta	853 244 132
Margen bruto	73.4%
Gastos de administración y ventas	109 700 000
Nómina	191 066 645
Depreciación de equipos	89 586 513
Utilidad operacional	462 890 975
Margen operacional	39.8%
Utilidad neta antes de impuestos	462 890 975
Utilidad neta	305 458 922
Margen neto	26.3%

4.10 FACTIBILIDAD DEL PROYECTO

Se obtuvo un VAN de \$2 546 791 915 teniendo en cuenta una inversión inicial de \$924 325 626 y el beneficio neto de cada año arrojado por el flujo de caja. La TIR resulto igual a 53% siendo un valor mayor a la tasa de descuento que es de 7.5%, resultando un valor alto debido a la omisión, en el análisis económico, de varios aspectos como el control de calidad, investigación y desarrollo, desembolsos a contratistas, elementos de protección, instalación de tuberías y accesorios, entre otros.

5. CONCLUSIONES

Es posible producir carbón activado a partir de cascarilla de arroz y cuesco de coco con características aceptables, sometido a una activación química en atmósfera autogenerada en una etapa de calentamiento.

La variable más influyente en la producción de carbón activado a partir de cascarilla de arroz y cuesco de coco fue la temperatura de carbonización, seguido de la concentración del agente activante que a condiciones más suaves favorece el proceso.

Según la elaboración del carbón activado, las mejores condiciones experimentales dentro del rango evaluado fueron los producidos a partir de cascarilla de arroz con 1.37 % p/p KOH y 580 °C que presentaron mayores porcentajes de adsorción (46%), respecto a los producidos a partir de cuesco de coco 0.17 % p/p KOH y 641 °C, con una adsorción del 33%.

La elaboración de una planta semi-industrial para la elaboración de carbón activado a partir de cuesco de coco es factible pues el VAN resulta positivo con un valor de \$2 546 791 915, una TIR del 53% y un margen neto de 26.3%, lo que significa que el proyecto arroja utilidades altas.

6. RECOMENDACIONES

Después de encontrar las mejores condiciones de preparación para el carbón activado se recomienda realizar un estudio con las condiciones de adsorción, como la evaluación de pH, tiempo de contacto, presencia de diferentes cationes en solución, así como también la relación carbón activado/solución lixivante, para optimizar la adsorción de oro.

Se recomienda evaluar otros agentes químicos y buscar un método para realizar briquetas de carbón con los finos que no se utilizan en el proceso, para hacer más rentable el aprovechamiento de las materias primas.

Para la preparación de la biomasa se recomienda usar la norma ASTM E1757 – 01, en lugar de la usada en este trabajo ASTM D2013.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahiduzzaman, M., & Sadrul, A. K. M. (2016). Preparation of porous bio-char and activated carbon from rice husk by leaching ash and chemical activation. *sPRINGERPLUS*, 5(1), 1248. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4972807/>
- AlOthman, Z. A., Habila, M. A., Ali, R., Abdel Ghafar, A., & El-din Hassouna, M. S. (2014). Valorization of two waste streams into activated carbon and studying its adsorption kinetics, equilibrium isotherms and thermodynamics for methylene blue removal. *Arabian Journal of Chemistry*, 7(6), 1148–1158. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.05.007>
- Amaringo Villa, F. A., & Hormaza Anaguano, A. (2013). Determinación del punto de carga cero y punto isoelectrico de dos residuos agrícolas y su aplicación en la remoción de colorantes. *Revista de Investigación Agraria Y Ambiental*, 4(2), 27–36.
- ASTM.D2013/D2013M-12. (2012). Standard Practice for Preparing Coal Samples for Analysis. West Conshohocken, PA: ASTM International. Retrieved from www.astm.org
- ASTM.D2854-09. (2014). Standard Test Method for Apparent Density of Activated Carbon. West Conshohocken, PA: ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D2854-09.2>
- ASTM.D2866-11. (2011). Standard Test Method for Total Ash Content of Activated Carbon. West Conshohocken, PA: ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D2866-11.2>
- ASTM.D2867-17. (2017). Standard Test Methods for Moisture in Activated Carbon. West Conshohocken, PA: ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D2867-09.2>
- ASTM.D3172-13. (2013). Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke. West Conshohocken, PA: ASTM International. Retrieved from www.astm.org
- ASTM.D4607-94. (2011). Standard Test Method for Determination of Iodine Number of Activated Carbon. West Conshohocken, PA: ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D4607-94R11.2>
- ASTM.D5832-98. (2014). Standard Test Method for Volatile Matter Content of Activated Carbon Samples. West Conshohocken, PA: ASTM International. Retrieved from www.astm.org
- Bastidas Moncayo, J. L. (2016). *Producción de carbón activado físicamente a escala de laboratorio a partir de cuesco de palma africana y su aplicación en el tratamiento de aguas residuales*. Universidad del Valle.

- Bridwater, A. V., & Boocock, D. G. B. (1997). *Developments in Thermochemical Biomass Conversion* (1997th Edi). United Kingdom: Chapman & Hall.
- Carbotecnia. (2016). Carbón activado para otros usos. Retrieved from <https://www.carbotecnia.info/>
- DANE. (2016). Encuesta Nacional Agropecuaria ENA 2015. Retrieved from <http://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario/encuesta-nacional-agropecuaria-ena>
- DANE. (2017). Cuarto Censo Nacional Arrocerero 2016. Retrieved from <http://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario/censo-nacional-arrocerero>
- Doloksaribu, M., Prihandoko, B., & Triyana, K. (2017). Preparation and Characterization of Activated Carbon Based on Coconut Shell for Supercapacitor. *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research*, 35(3), 430–437.
- Goez Sierra, J., & Santacoloma Martinez, A. (1974). *Obtencion de carbon activado a partir de cascarilla de arroz*. Universidad del Valle.
- Hernández-Montoya, V., García-Servin, J., & Bueno-López, J. I. (2012). Thermal Treatments and Activation Procedures Used in the Preparation of Activated Carbons. *Lignocellulosic Precursors Used in the Synthesis of Activated Carbon - Characterization Techniques and Applications in the Wastewater Treatment*, (2), 19–36. <https://doi.org/10.5772/39365>
- Hu, Z., & Srinivasan, M. . (1999). Preparation of high-surface-area activated carbons from coconut shell. *Microporous and Mesoporous Materials*, 27(1), 11–18. [https://doi.org/10.1016/S1387-1811\(98\)00183-8](https://doi.org/10.1016/S1387-1811(98)00183-8)
- Hui, T. S., & Zaini, M. A. A. (2015). Potassium hydroxide activation of activated carbon: a commentary. *Carbon Letters*, 16(4), 275–280. <https://doi.org/10.5714/CL.2015.16.4.275>
- Jiménez, J., & Gonzáles, D. (2014). *Producción de Carbón Activado Química Y Fisicamente a Escala de Laboratorio a Partir de Carbón Mineral Y Su Aplicación En La Adsorción de Oro de Soluciones Cianuradas Sintéticas*. Universidad del Valle.
- Jiménez, V. (2011). *Síntesis, activación química y aplicaciones de nanoestructuras de carbono*. Universidad de Castilla - La Mancha.
- Knappe, D. R. U., Li, L., Quinlivan, P., & Wagner, T. (2003). *Effects of activated carbon characteristics on organic contaminant removal*. North Carolina: Awwa Research Foundation.

- Kolasinski, K. (2012). *Surface Science: Foundations of Catalysis and Nanoscience* (Third edit). West Chester, PA, USA: Wiley.
- Li, W., Yang, K., Peng, J., Zhang, L., Guo, S., & Xia, H. (2008). Effects of carbonization temperatures on characteristics of porosity in coconut shell chars and activated carbons derived from carbonized coconut shell chars. *Industrial Crops and Products*, 28(2), 190–198.
- Logsdon, M. J., Hagelstein, K., & Mudder, T. (2001). *El Manejo del cianuro en la extracción de oro. International Council on Metals and the Environment*. Ontario, Canada.
- Marsh, H., & Rodriguez-Reinoso, F. (2006). *Activated Carbon* (First Edit). Great Britain: Elsevier Ltd.
- Martínez, M. (2012). *Preparación y caracterización de carbón activado a partir de lignita para su aplicación en procesos de descontaminación de aguas*. Universidad Autónoma de Madrid.
- Monteiro de Castro, M. C. (2013). *Preparación de Carbones Activados con KOH a Partir de Residuo de Petróleo. Adsorción de Hidrógeno*. Universidad de Alicante.
- Montenegro, D., & Muñoz, J. (2010). *Obtención de Carbón Activado a Partir de La Cascara de Coco a Nivel Piloto Para La Adsorción de Oro*. Universidad del Valle.
- Muniandy, L., Adam, F., Rahman, A., & Ng, E. (2014). The synthesis and characterization of high purity mixed microporous / mesoporous activated carbon from rice husk using chemical activation with NaOH and KOH. *Microporous and Mesoporous Materials*, 197, 316–323.
- Muñoz, E., & Grau, M. (2013). *Ingeniería Química* (Primera ed). Madrid: Universidad Nacional de Educacion a Distancia.
- Navarro, P., & Vargas, C. (2010). Efecto de las propiedades físicas del carbón activado en la adsorción de oro desde medio cianuro. *Revista de Metalurgia*, 46(3), 227–239.
- Nogués, F., García-Galindo, D., & Rezeau, A. (2010). *Energía de la biomasa* (Volumen I). Zaragoza, España: Pressas Universitarias de Zaragoza.
- NTC4467. (1998). *Productos químicos industriales. Carbón Activado. Metodos de ensayo*. Bogota, Colombia: Icontec.
- Pogaku, R., Bono, A., & Chu, C. (Eds.). (2013). *Developments in Sustainable Chemical and Bioprocess Technology*. Malaysia: Springer.

- Ramirez, J., & Velasco, R. (1981). *Produccion de carbon activado a partir de cascarilla de arroz usando K₂CO₃ y NaOH como catalizadores*. Universidad del Valle.
- Sevilla, U. de. (2002). Manual Del Carbón Activo. *Aguapedia*, 1–89. Retrieved from http://aula.aguapedia.org/pluginfile.php/10339/mod_resource/content/1/CARBoN ACTIVO DEFINITIVO tar.pdf
- Shamsuddin, M. S., Yusoff, N. R. N., & Sulaiman, M. A. (2016). Synthesis and Characterization of Activated Carbon Produced from Kenaf Core Fiber Using H₃PO₄ Activation. *Procedia Chemistry*, 19, 558–565. <https://doi.org/10.1016/j.proche.2016.03.053>
- Solís Fuentes, J. A., Morales Téllez, M., Ayala Tirado, R. C., & Durán de Bazúa, M. D. C. (2012). Obtención de carbón activado a partir de residuos agroindustriales y su evaluación en la remoción de color del jugo de caña Activated carbon from agroindustrial wastes for color removal from sugarcane juice. *Tecnología Ciencia (IMIQ)*, 27(1), 36–48. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48224413006>
- Soltani, N., Bahrami, A., Pech-Canul, M. I., & González, L. A. (2015). Review on the physicochemical treatments of rice husk for production of advanced materials. *Chemical Engineering Journal*, 264, 899–935.
- Teirlinck, P. A. M., & Petersen, F. W. (1996). The nature of gold-iodide adsorption onto coconut-shell carbon. *Minerals Engineering*, 9(9), 923–930.
- Velásquez, J., Mejía, L. A., Carrasquilla, F., López, R., & Garcés, B. (2007). Obtencion de carbon activado a partir de cáscara de coco pretratada con vapor. *Revista Investigaciones Aplicadas*, 1(1), 1–5.
- Viswanathan, B., Neel, I., & Varadarajan, T. K. (2009). *Methods of activation and specific applications of carbon materials. Methods of Activation and Specific Applications of Carbon Materials*. Indian Institute of Technology Madras. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Methods+of+Activatio n+and+Specific+Applications+of+Carbon+Materials#0>
- Zibetti, G., Benítez, R., & Calandri, E. (2000). Elaboración de Carbón Activado: Contenidos celulares vs. Carbón fijado en tres especies de interés forestal de la Provincia de Formosa. *II Jornadas de Investigación En Ingeniería Del NEA Y Países Limítrofes*. Argentina: Universidad Tecnológica Nacional.

APÉNDICES

APÉNDICE A. Procedimiento para la producción de carbón activado

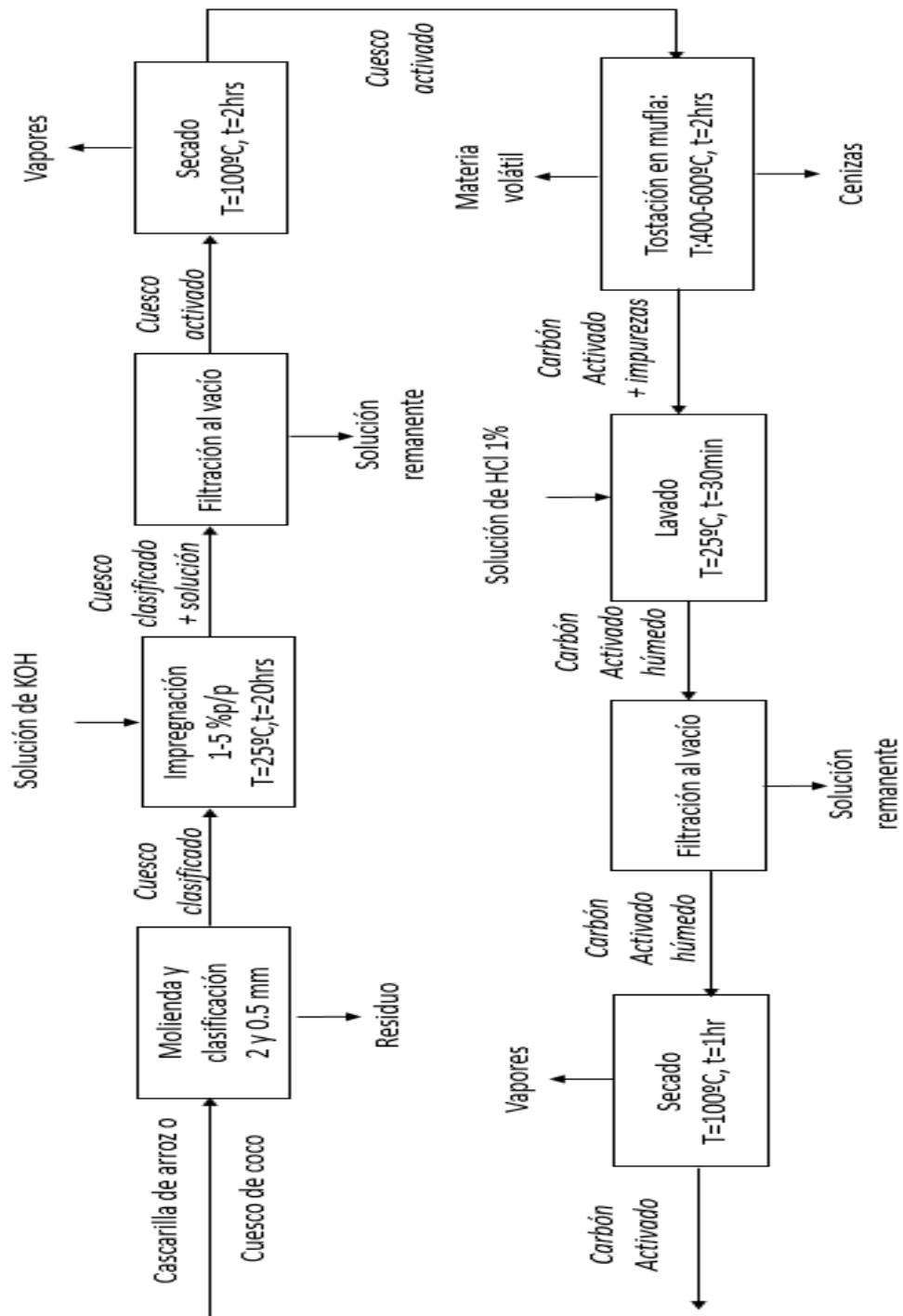


Figura A1. Procedimiento para la obtención de carbón activado

APÉNDICE B. Diseño experimental

Con las variables de control, concentración de agente activante A y temperatura de carbonización B se realizó un diseño factorial rotacional compuesto (ver Tabla B1).

Tabla B1. Ensayos aleatorios, para el diseño experimental

Valores Numero	Normalizados		Reales	
	A	B	A	B
1	0	1.41	3	641
2	0	0	3	500
3	1	1	5	600
4	0	-1.41	3	358
5	1.41	0	5.85	500
6	-1	1	1	600
7	1	-1	5	400
8	0	0	3	500
9	0	0	3	500
10	-1	-1	1	400
11	-1.41	0	0.17	500
1	0	1.41	3	641
2	0	0	3	500

APÉNDICE C. Modelo de regresión para diseño experimental

La ecuación del modelo de regresión ajustado para el % de adsorción de oro es:

$$\% \text{ Adsorción de oro} = A + B (\%KOH) + C (T) + D(\%KOH)^2 \quad (C.1.)$$

Tabla C1. Coeficientes del modelo de regresión

	A	B	C	D
CA cascarilla de arroz	-143.66	9.34	0.61	-1.27
Ca cuesco de coco	45.78	0.085	-0.14	0.22

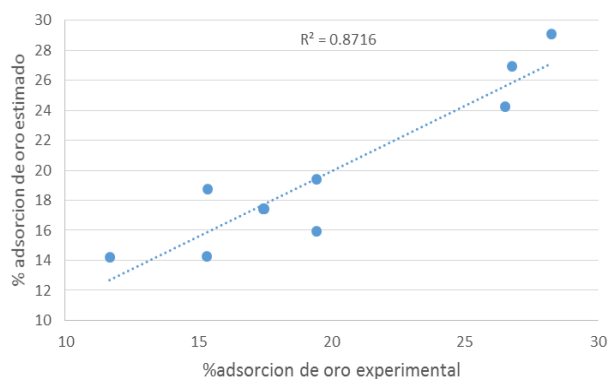
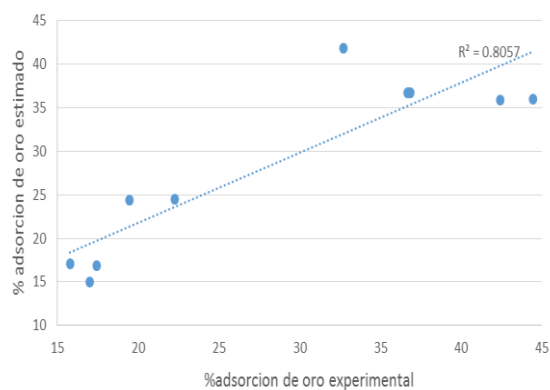


Figura C1. Rendimiento estimado por el modelo estadístico con el rendimiento experimental a. Cascarilla b. Cuesco.

Al graficar los datos experimentales versus los predichos por la ecuación modelo (Ver figura C1), se obtienen desviaciones estándar menores al 10%.

APÉNDICE D. Pruebas preliminares con azul de metileno

Según varios estudios, la temperatura es una variable significativa en la producción de carbón activado así que esta variable se incluirá en el diseño experimental, pero no en estas pruebas preliminares. Primero se cambió la relación solido/ líquido, y no se observaron variaciones en el poder adsorbente con relaciones desde 4:1 hasta 9:1, luego se cambió el tiempo de impregnación y la concentración del agente activante, dejando la temperatura de carbonización en 500 °C durante 2 horas.

Para los ensayos con azul de metileno, primero se obtuvo la curva de calibración (ver Figura D1) con su respectiva ecuación característica:

$$C = 5.861A + 0.0189 \quad (D.1)$$

Donde C es la concentración de azul de metileno en mg/L y A es la absorbancia en el espectrofotómetro.

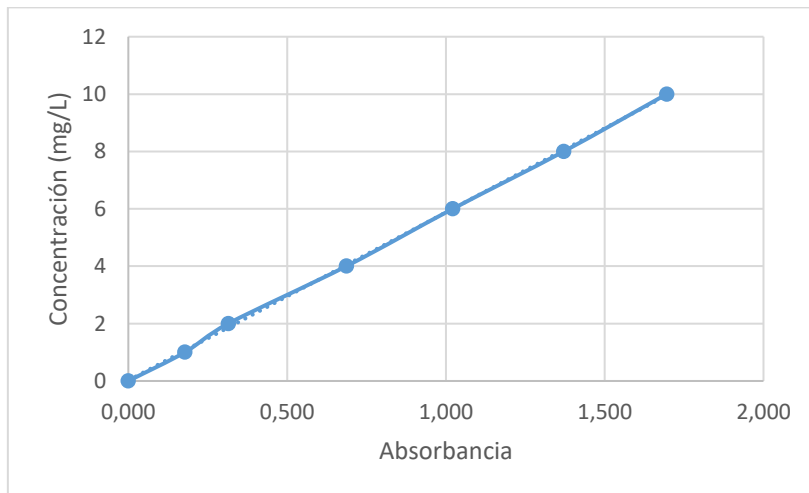


Figura D1. Curva de calibración del azul de metileno

En las tablas D1 y D2, se encuentran los análisis Anova de estos ensayos, los P valores obtenidos indican que solo la concentración del agente activante para el cuesco, influye significativamente en la adsorción de azul de metileno con un nivel de confianza del 95%. Las interacciones que están más alejadas del valor P 0.05, indican que la cantidad de adsorción de azul de metileno puede catalogarse como independiente del tiempo de impregnación. Según el estadístico R-

cuadrado, la proporción de adsorción de azul de metileno que puede explicarse es solo del 42.04% para la cascarilla y 78.65% para el cuesco.

Tabla D1. Análisis Anova para la cascarilla de arroz

Análisis de Varianza para remocion

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:concentracion	28.8596	1	28.8596	1.22	0.3190
B:tiempo	18.1436	1	18.1436	0.77	0.4206
AB	21.6983	1	21.6983	0.92	0.3815
Error total	117.912	5	23.5825		
Total (corr.)	203.46	8			

R-cuadrada = 42.0464 por ciento
R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 7.2742 por ciento
Error estándar del est. = 4.85618
Error absoluto medio = 2.75191
Estadístico Durbin-Watson = 2.61939 (P=0.6836)
Autocorrelación residual de Lag 1 = -0.333633

Tabla D2. Análisis Anova para el cuesco de coco

Análisis de Varianza para remocion

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:concentracion	864.579	1	864.579	17.44	0.0087
B:tiempo	0.0712818	1	0.0712818	0.00	0.9712
AB	0.404952	1	0.404952	0.01	0.9315
Error total	247.895	5	49.579		
Total (corr.)	1161.28	8			

R-cuadrada = 78.6534 por ciento
R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 65.8454 por ciento
Error estándar del est. = 7.04123
Error absoluto medio = 4.84222
Estadístico Durbin-Watson = 2.28112 (P=0.4657)
Autocorrelación residual de Lag 1 = -0.198802

Para la cascarilla de arroz se alcanzó la mayor remoción de 98.29% a una concentración de 3% de KOH, relación solido/liquido 9:1 y con un tiempo de impregnación de 1 hora. Se encontró que en general este carbón activado adsorbe el azul de metileno porque el mínimo porcentaje de remoción fue de 74.26% de una solución inicial de 50 ppm, aunque en el diagrama de Pareto para la cascarilla de arroz (ver Figura D2), se observa que la concentración del agente activante y el tiempo de impregnación no son variables significativas.

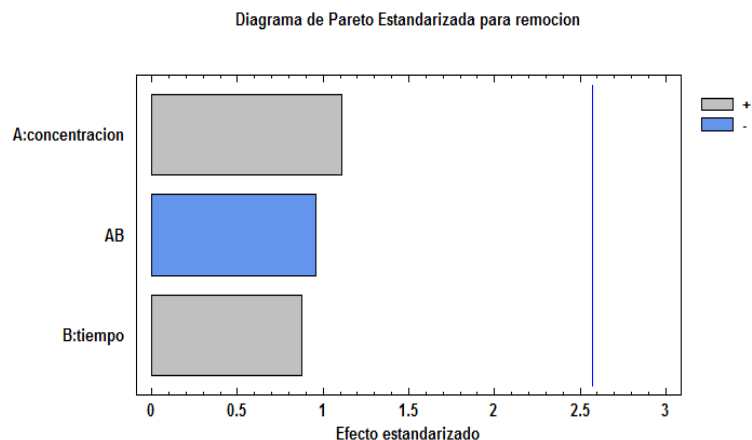


Figura D2. Diagrama de pareto para la cascarilla de arroz

Para el cuesco se alcanzó la mayor remoción de 88.69% a una concentración de 1% con una relación 4:1 y un tiempo de impregnación de 4 horas. Se encontró que en general este carbón activado adsorbe el azul de metileno, en el diagrama de Pareto para el cuesco de coco (ver Figura D3), se observa que la concentración del agente activante es una variable significativa, y el tiempo de impregnación no es una variable significativa.

En el diseño se incluirá la concentración del agente activante, aunque para la cascarilla no es representativo, una hipótesis es que ésta concentración podría afectar la adsorción de oro, y el tiempo de impregnación será de 20 horas que es un tiempo suficiente para garantizar el contacto del material.

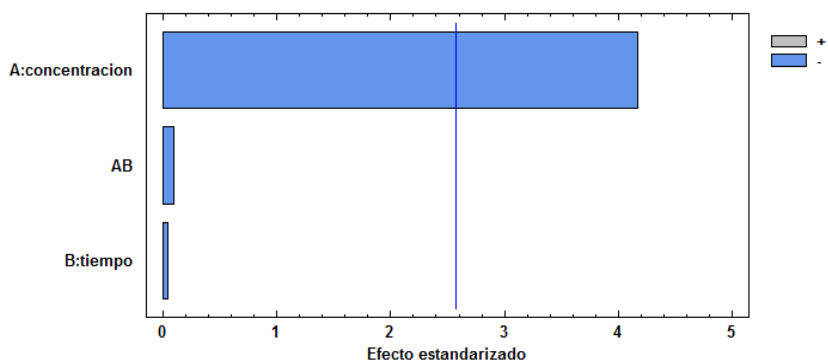


Figura D3. Diagrama de pareto para el cuesco de coco

APÉNDICE E. Procedimiento para la obtención de solución aurocianurada

Se realizó un tratamiento de lixiviación con cianuro para recuperar oro de un mineral residual de una mina de Suarez (ver Figura E1) y se obtuvo una solución con una concentración de oro de 1ppm. Como se tiene una curva de calibración de 1 a 10 ppm, se decidió preparar una solución aurocianurada sintética, de aproximadamente 40 ppm (ver Figura E2).

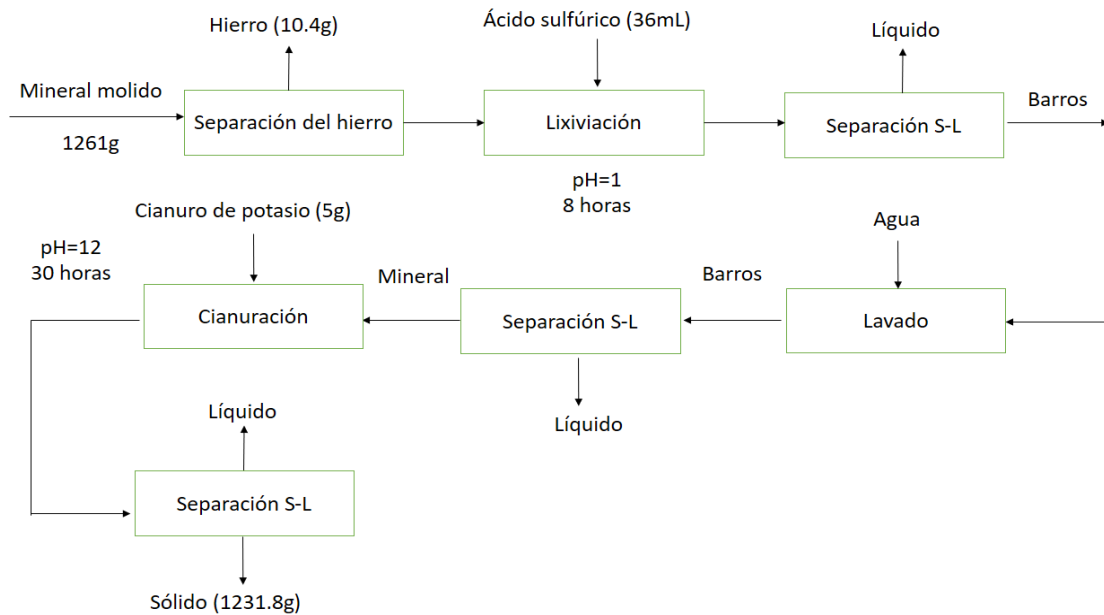


Figura E1. Preparación de solución aurocianurada de mineral residual

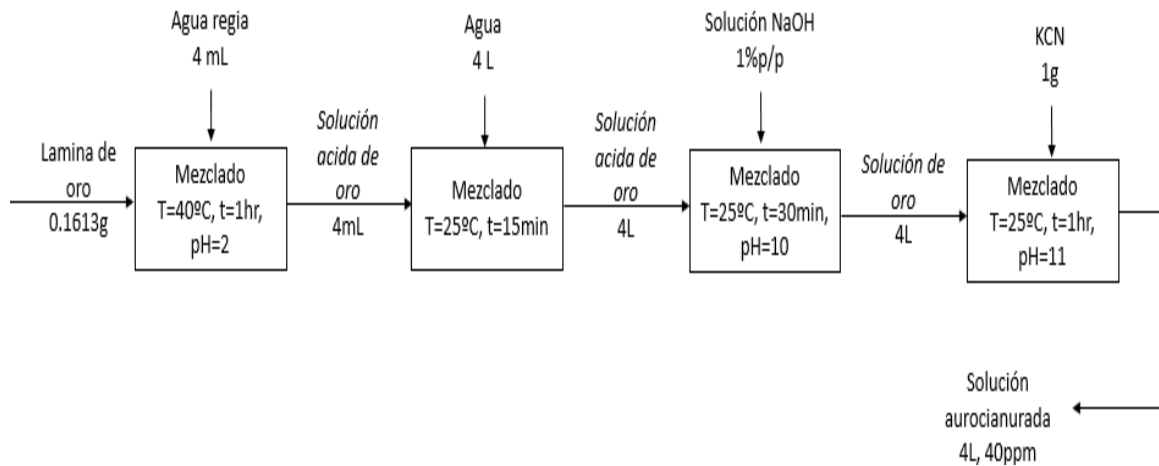


Figura E2. Preparación de solución aurocianurada sintética

APÉNDICE F. Efecto de las variables controlables de operación en el rango experimental

Tabla F1. ANOVA del diseño experimental para la capacidad de adsorción de oro del CA a partir de cascarilla.

Análisis de Varianza para Adsorción de oro					
<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:Concentracion KOH	389,758	1	389,758	8,60	0,0325
B:Temperatura de Carbonizacion	394,342	1	394,342	8,70	0,0319
AA	95,1007	1	95,1007	2,10	0,2072
AB	8,0656	1	8,0656	0,18	0,6907
BB	99,5556	1	99,5556	2,20	0,1984
Error total	226,647	5	45,3293		
Total (corr.)	1169,25	10			

R-cuadrada = 80,616 por ciento
R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 61,232 por ciento
Error estándar del est. = 6,73271
Error absoluto medio = 3,19721
Estadístico Durbin-Watson = 1,38304 (P=0,3675)
Autocorrelación residual de Lag 1 = 0,135424

Tabla F2. ANOVA del diseño experimental para la capacidad de adsorción de oro del CA a partir de cuesco.

Análisis de Varianza para Adsorción de oro					
<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:Concentracion KOH	234,717	1	234,717	35,24	0,0019
B:Temperatura de Carbonizacion	56,1069	1	56,1069	8,42	0,0337
AA	114,089	1	114,089	17,13	0,0090
AB	0,265225	1	0,265225	0,04	0,8497
BB	15,8475	1	15,8475	2,38	0,1836
Error total	33,2997	5	6,65994		
Total (corr.)	494,009	10			

R-cuadrada = 93,2593 por ciento
R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 86,5186 por ciento
Error estándar del est. = 2,58069
Error absoluto medio = 1,33613
Estadístico Durbin-Watson = 1,99167 (P=0,7576)
Autocorrelación residual de Lag 1 = 0,00263991

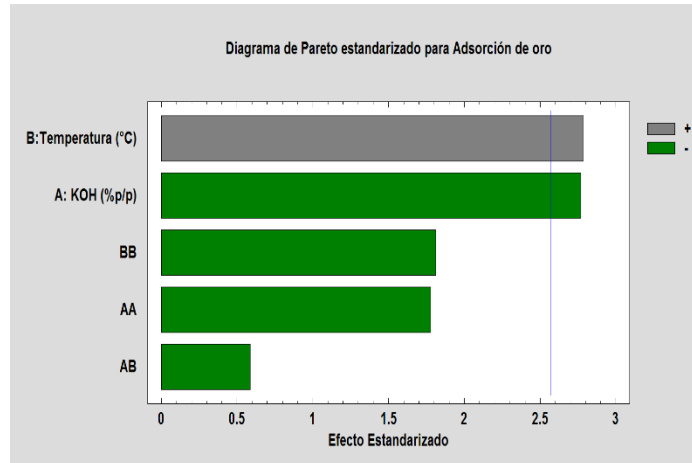


Figura F1. Diagrama de Pareto para el porcentaje de adsorción de oro con CA a partir de cascarilla de arroz.

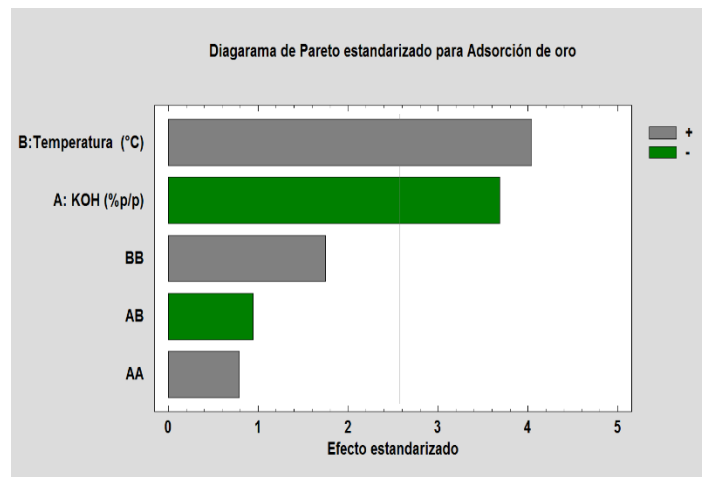


Figura F2. Diagrama de Pareto para el porcentaje de adsorción de oro con CA a partir de Cuesco de coco.

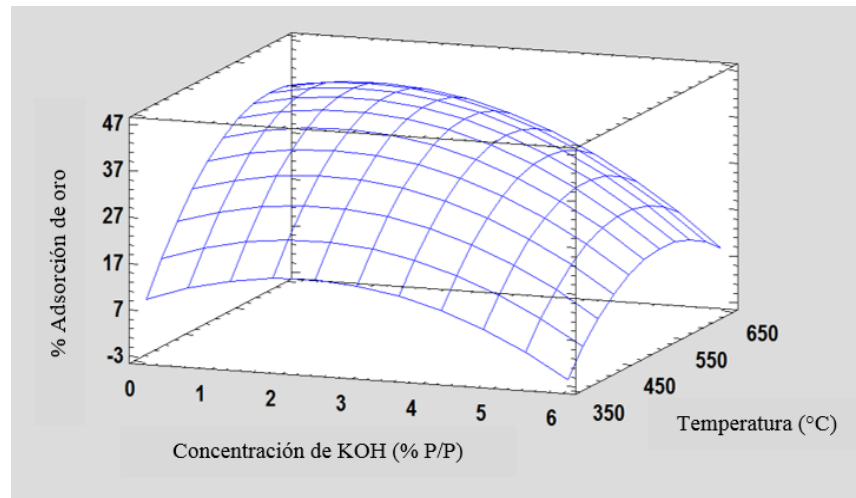


Figura F3. Superficie de respuesta para el porcentaje de adsorción CA a partir de cascarilla de arroz.

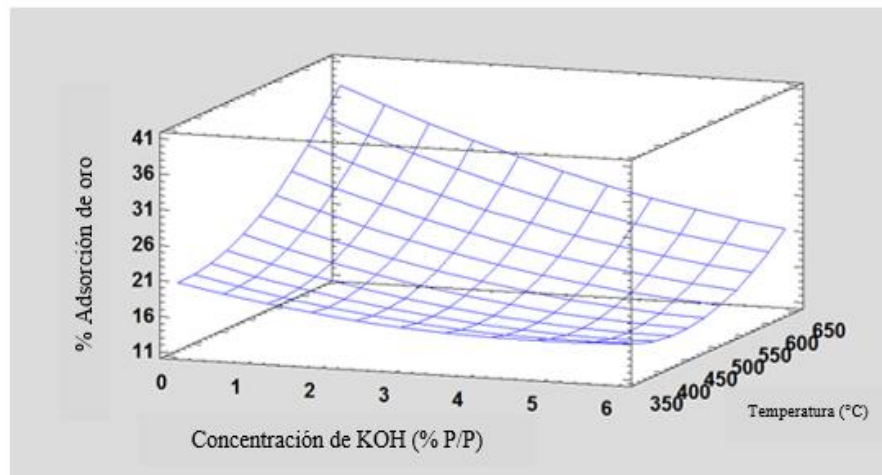


Figura F4. Superficie de respuesta para el porcentaje de adsorción CA a partir de cuesco de coco.

Para ambos precursores ambas variables del diseño experimental resultan significativas, la temperatura de activación tiene un mayor efecto en la capacidad de adsorción de oro. En las superficies de respuesta se permite visualizar simultáneamente la influencia que tiene la concentración del agente activante KOH y la temperatura de activación sobre el porcentaje de adsorción del oro en la solución cianurada.

APÉNDICE G. Aportes salariales legales vigentes en Colombia

En la estimación económica de una empresa, es necesario calcular el valor total de la nómina, por lo tanto, se debe tener en cuenta los aportes salariales vigentes en Colombia (ver Tabla G|1).

Tabla G1. Aportes salariales legales vigentes en Colombia

APORTES SALARIALES	
Salario Mínimo Legal	\$ 781 242
Subsidio de Transporte	\$ 88 211
SEGURIDAD SOCIAL	
EPS	8.50%
Pensión	12.00%
ARP	0.52%
Caja compensación	4.00%
Total seguridad social	25.02%
PRESTACIONES SOCIALES	
Cesantías	8.33%
Intereses/cesantías	1.00%
Primas	12.00%
Vacaciones	4.17%
Total prestaciones	25.50%
GRAN TOTAL %	50.52%

ANEXO 1: Método estándar para el índice de yodo aplicado al carbón activado

Reactivos necesarios:

- Ácido clorhídrico al 5%
- Tiosulfato de sodio 0.1N
- Solución de yodo 0.1N
- Indicador de almidón al 1%
- Agua destilada

Procedimiento:

1. Secar CA de acuerdo a método estándar ASTM D2867, que consiste en:

- Presecar 3 vasos de 50mL por 15 minutos y dejar enfriar a temperatura ambiente.
- Pesar los vasos, las tapas (capsulas) y 3g de CA en cada uno de estos. Anotar estos tres pesos con cuatro cifras significativas en la Tabla 1.1.
- Tapar los vasos cada vez que se termine de pesar el CA y llevarlos al horno, quitar la tapa y dejarla dentro del horno. El equipo debe estar a 145 °C, por 3 horas. (*Hora de inicio de secado:* _____)
- Abrir el horno y tapar los vasos inmediatamente. Dejar enfriar las muestras en el desecador. Pesar y anotar estos valores en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Humedad de muestras de CA

Muestra	M_{vaso} (g)	M_{tapa} (g)	M_{CA} (g)	$M_{\text{vaso+tapa+CA}}$ (g)	$M_{\text{vaso+tapa+CA seco}}$ (g)
1					
2					
3					

Para calcular la humedad de cada muestra se utiliza la siguiente ecuación, donde *CA* es el peso de la muestra original de carbón activado y *CAseco* es el peso de la muestra después de dejarla enfriar en el desecador.

$$H (\%) = \frac{CA (g) - CA \text{ seco} (g)}{CA (g)} \times 100$$

2. Preparación de soluciones:

2.1 Solución de ácido clorhídrico (5% p/p): agregar 70 mL de ácido clorhídrico concentrado a 550 mL de agua destilada y mezclar bien. Usar una probeta graduada.

2.2 Solución de tiosulfato de sodio (0.100N): disolver 24.820g de tiosulfato de sodio en aproximadamente 75±25mL de agua destilada fresca. Agregar 0.10±0.01g de carbonato de sodio para minimizar la descomposición bacteriana de la solución de tiosulfato. Transferir la mezcla a un vaso de 1 L y diluir hasta la marca. Permitir que la solución repose por lo menos durante 4 días antes de la estandarización. La solución debe ser almacenada en un recipiente ámbar.

2.3 Solución estándar de yodo (0,100±0,001N): pesar 12.700g de yodo y 19.100g de yoduro de potasio en un beaker. Mezclar. Agregar de 2 a 5mL de agua al beaker y mezclar bien. Continuar agregando pequeñas cantidades de agua (5mL aproximadamente) mientras mezcla hasta que el volumen total sea de 50 a 60 mL. Permitir que la solución repose por 4 horas mínimo para asegurarse de que los cristales se disuelvan completamente. Transferir a un balón aforado de 1 L y completar con agua destilada. Almacenar la solución en un recipiente ámbar.

2.4 Estandarización de solución de yodo 0.100±0.001N: sacar con pipeta 10 mL de solución de yodo en un beaker de 100mL. Titular con tiosulfato de sodio hasta que la solución de yodo tome un color amarillo claro. Añadir pocas gotas de indicador de almidón y continuar con la titulación hasta que una gota produzca una solución incolora.

Anotar el volumen usado de tiosulfato de sodio: _____

Determinar la normalidad de la solución de yodo así:

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

Donde,

$N_2 =$ solución de yodo, N

$S =$ tiosulfato de sodio, mL

$N_1 =$ tiosulfato de sodio, N

$I =$ solución de yodo, mL

La concentración de solución de yodo debe ser $0.100 \pm 0.0005N$ (el volumen de tiosulfato de sodio debe ser 9.95 mL). Si no se cumple con este requisito, repetir pasos 2.3 y 2.4

3. Presecar 3 erlenmeyer de 125 mL por mínimo 15 minutos. Dejar enfriar a temperatura ambiente. Pesar 3 muestras de carbón con la mayor precisión posible de acuerdo al CA estimado y anotar los pesos en la tabla 1.2. Tapar los erlenmeyers cada vez que se termine de pesar.

Tabla 1.2 Pesos de CA y volumen de titulación

Muestra	M _{CA.estimado} (g)*	M _{erlenmeyer} (g)	M _{CA.real} (g)	V _{titulacion} (mL)
1	1.2552			
2	1.1001			
3	0.9449			

*El carbón activado estimado se obtuvo suponiendo un valor inicial de índice de yodo de 900 mg I₂/g CA para cada valor de filtrado residual (C=0.01 0.02 0.03), aplicando las ecuaciones en la sección cálculos.

4. Sacar con pipeta 10 mL de solución de ácido clorhídrico al 5% en peso y colocarlos en cada erlenmeyer. Taparlo y mezclar suavemente hasta que todo el carbón se moje completamente.

5. En una campana de extracción colocar los erlenmeyers (sin la tapa) a hervir suavemente por 5 minutos para eliminar los sulfuros que pueden intervenir con los resultados del ensayo. Dejar enfriar a temperatura ambiente.

6. Sacar 100 mL de solución de yodo 0.100N con una pipeta y verterlo en cada erlenmeyer. Alternar la adición de yodo para que no haya demoras en el manejo de la solución. Una vez añadido, colocar la tapa inmediatamente y agitar el contenido vigorosamente por 60 ± 1 s. Filtrar rápidamente cada muestra por gravedad a través de un papel filtro Munktell.

7. Para cada filtrado, usar los primeros 20 a 30 mL para purgar una pipeta de 50 mL. Usar vasos limpios y secos para recolectar la muestra filtrada.

8. Mezclar cada filtrado agitando manualmente cada beaker y sacar con una pipeta 50 mL de cada filtrado a un erlenmeyer de 125 mL.

9. Titular cada filtrado con una solución estandarizada de tiosulfato de sodio al 0.100N, hasta que la solución sea de un amarillo pálido. Agregar 2 gotas de indicador de almidón y continuar titulación con tiosulfato de sodio hasta que una gota produzca una solución incolora. Anotar el volumen usado de tiosulfato de sodio en la Tabla 1.2. Se hace este procedimiento mientras se mantiene la solución en agitación.

Cálculos

Para estimar la dosis de carbón, se requiere calcular los valores del yodo absorbido por gramo de carbón (X/M) y concentración residual de yodo (C).

1. Para calcular el valor de X/M, primero reportar los siguientes valores:

- Parámetro A

$$A = (N_2)(12693.0)$$

Donde, $N_2 = \text{solución de yodo, } N$

- Parámetro B

$$B = (N_1)(126.93)$$

Donde, $N_1 = \text{tiosulfato de sodio, } N$

- Factor de dilución DF

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

Donde, $I = \text{solucion de yodo, mL}$

$H = \text{Acido clorhidrico al 5\%, mL}$

$F = \text{filtrado, mL}$

Por lo tanto, el valor de X/M se calcula así:

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

Donde, $S = \text{tiosulfato de sodio, mL}$

$M = \text{carbon usado, g}$

2. Para calcular el valor de C se usa la siguiente ecuación:

$$C = \frac{(N_1 \times S)}{F}$$

Donde,

$C = \text{filtrado residual, } N$

$N_1 = \text{tiosulfato de sodio, } N$

$F = \text{filtrado, mL}$

Graficar X/M vs. C para cada una de las tres dosis de carbón. Obtener la ecuación para la línea de tendencia y el coeficiente de determinación. El número de yodo es el valor de X/M evaluado a una concentración residual de yodo de 0.02 N.

3. La dosis de carbón se debería estimar así:

$$M = \frac{[A - (DF)(C)(126.93)(50)]}{E}$$

Donde,

$$M = \text{carbon, g}$$

$$A = (N_2)(12693.0)$$

$$DF = \text{factor de dilución}$$

$$C = \text{yodo residual}$$

$$E = \text{numero de yodo estimado del carbon}$$

Se calculan tres dosis de carbón usando tres valores de C (usualmente 0.01, 0.02 y 0.03).