

# Generación de Carbón activado a partir de residuos de la piña (*Ananás comosus*) para la remoción de metales pesados, $Zn^{2+}$ y $Cu^{2+}$

Angela Luciany Rivera Rivas  
angela.rivera02@usc.edu.co

**Director**

Yesid Zambrano Salgado  
yesid.zambrano00@usc.edu.co

**Codirector**

Jorge Enrique Castillo  
jorge.castillo01@usc.edu.co

Universidad Santiago de Cali, Facultad de Ciencias Básicas, Programa de Química

## **Resumen**

El negocio de la piña está alcanzando un alto grado de apogeo en el mundo, cada vez aumenta más su producción, sobre todo en Colombia donde constantemente se unen más empresarios. Al final de la etapa de cultivo se obtienen más de 300 toneladas de biomasa por hectárea la cuál en su mayoría se eliminan mediante combustión, este proceso produce contaminantes gaseosos tóxicos para el medio ambiente. El carbón activado es una de las técnicas convencionales existentes para la remoción de metales pesados, se puede producir mediante activación física o química y ha demostrado ser un adsorbente eficiente para la eliminación de una amplia variedad de contaminantes orgánicos e inorgánicos. Se preparó carbón activado en polvo a partir de la planta residual de la cosecha de piña, para ello, se estableció un diseño experimental dos factores con tres niveles cuyas variables fueron: la concentración del agente activante (KOH al 1, 3 y 5 %) y la temperatura de pirólisis evaluada en 500, 600 y 700 °C. Los carbones activados obtenidos se usaron para la remoción de Zn (II) y Cu (II) presentes en soluciones de 10 ppm cada uno respectivamente. Al evaluarlos se obtuvo un máximo de 0,15 mg de Cu adsorbido y 0,06 mg de Zinc adsorbido por gramo de carbón activado. Los resultados revelaron que el carbón activado generado no resulto eficiente para la remoción de zinc y cobre, pero, podrían resultar eficaces para la adsorción de otros metales pesados.

**Palabras Clave:** ananás comosus, hidróxido de sodio, metales pesados, carbón activado.

## **Abstract**

The pineapple business is reaching a high degree of apogee in the world, its production is increasing more and more, especially in Colombia where more businessmen are constantly joining. At the end of the cultivation stage, more than 300 tons of biomass per hectare are obtained, most of which are eliminated by combustion, this process produces toxic gaseous pollutants for the environment. Activated carbon is one of the existing conventional techniques for the removal of heavy metals, it can be produced by physical or chemical activation and has proven to be an efficient adsorbent for the removal of a wide variety of organic and inorganic contaminants. Powdered activated carbon was prepared from the residual plant of the pineapple harvest, for this, an experimental design was established with two factors with three levels whose variables were: the concentration of the activating agent (KOH at 1, 3 and 5%) and the pyrolysis temperature evaluated at 500, 600 and 700 °C. The activated carbons obtained were used for the removal of Zn (II) and Cu (II) present in solutions of 10 ppm each, respectively. When evaluating them, a maximum of 0.15 mg of adsorbed Cu and 0.06 mg of adsorbed Zinc per gram of activated carbon was obtained. The results revealed that the activated carbon generated was not efficient for the removal of zinc and copper, but could be effective for the adsorption of other heavy metals.

**Keywords:** ananás comosus, sodium hydroxide, heavy metals, activated carbón.

## I. INTRODUCCIÓN

La piña pertenece a la familia *Bromeliaceae*, genero *ananás*, especie *comosus*. Es una planta *monocotiledónea herbácea*, con tallo corto y hojas cuyo número oscila entre 70 y 100 formando una roseta (Rojas, Liliana; Carol, Carabali; Clever, 2019).

El cultivo de la piña se encuentra en aumento en el mundo y se ha incrementado su producción en Colombia constantemente en las últimas décadas. De hecho, el auge de la piña promete seguir creciendo, según estudios realizados por la PTP y ASOHOFrucol, el comercio internacional podría superar los 2.000 millones de dólares en el 2029. Actualmente la producción mundial es de 27 millones de toneladas con un área cosechada de 1 millón de hectáreas (Micanquer-Carlosama et al., 2020). En Colombia el suelo y clima permiten características únicas como su color y sabor (Blasnilo & Ramírez, 2016). Dentro del país, en Santander y Norte de Santander se concentra más del 50% de la zona sembrada con un total de 12.027 hectáreas y un rendimiento del 31,1 ton/ha, le sigue; Risaralda, Caldas, Boyacá, Valle del cauca, Cauca, Caquetá, Tolima, Huila y Cundinamarca con un área de 6.905 hectáreas y un rendimiento de 31,8 ton/ha, los departamentos de Meta, Arauca y Casanare con un área de 5.760 hectáreas y un rendimiento de 31,5 ton/ha. y Antioquia, Córdoba y sucre con una área de 1.027 hectáreas y un rendimiento de 30,28 ton/ha (MinAgricultura, 2018).

Los desechos industriales de la piña constituyen hasta el 64%. El fruto, la corona, el corazón, la cáscara y todo el material vegetal de la planta se elimina después del ciclo comercial sin contar los excedentes de la cosecha y los frutos rechazados (verdes y maduros). Se obtienen cerca de 300 toneladas de desechos por hectárea de cultivo (Rojas et al., 2018); (Micanquer-Carlosama et al., 2020).

El ciclo de producción a nivel comercial de la planta de piña es de 27 meses, tiempo durante el cual se cosechan 2 piñas por planta: la primera cosecha se da en los primeros 15 meses y la segunda en los próximos 12, finalizando este periodo se elimina toda la biomasa mediante combustión, este proceso no solo produce contaminantes gaseosos tóxicos para el medio ambiente, sino que también perjudica el suelo en el cual se realiza, es decir, el suelo queda afectado tanto por la producción de piña como por el proceso de combustión (Pimphor & Roddecha, 2021; La et al., 2014). Se eliminarían muchos de estos problemas si los desechos de los cultivos de la piña fueran reutilizados de manera sostenible para otros procedimientos que contribuyan al medio ambiente. En la piña el 85% es agua, el 2% fibra y solo un 0,5% es proteína (*Tutor Del Proyecto De Investigación: Econ. Luis Landy Campos*, 2020) y químicamente está compuesta por grasas, celulosa, hemicelulosa, lignina, entre otros; en la tabla 1 se muestra de forma general la composición química en base seca de la planta de piña.

**Tabla 1.** Muestra la composición química de la fibra lignocelulósica de la planta de piña

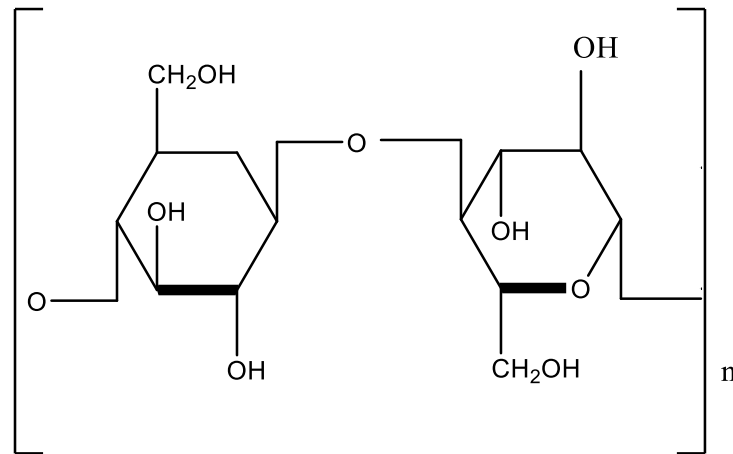
Parámetro	% en base seca
<b>Celulosa</b>	79-83
<b>Hemicelulosa</b>	19
<b>Lignina</b>	5-15
<b>Cenizas</b>	1

Fuente: (Mohd Ali et al., 2020)

La lignocelulosa es el principal componente de la pared celular de las plantas, esta biomasa es producida mediante la fotosíntesis y es la fuente de carbón renovable más prometedora para solucionar problemas actuales de contaminación (Ramachandran et al., 2020). La biomasa lignocelulósica es comprendida como el conjunto de residuos de procesos industriales, agro industriales, forestales, etc. los cuales son generados en grandes cantidades y desaprovechados al ser generalmente eliminados mediante combustión (Hafemann et

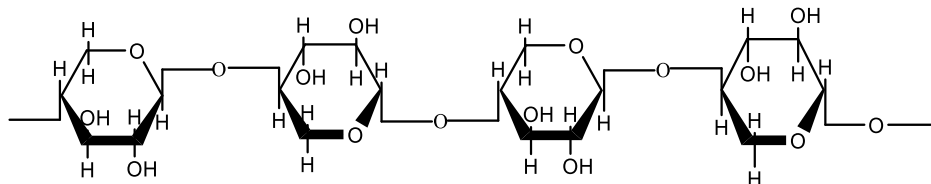
Generación de Carbón activado a partir de residuos de piña (*Ananás comosus*) para la remoción de metales pesados. Programa de Química 2021 al., 2019);(Clarkson, 2018). Estos residuos generan problemas medio ambientales como la producción de gases de efecto invernadero, por esta razón durante años se han buscado formas de aprovechamiento de esta biomasa que se encuentra constituida principalmente por tres componentes: (celulosa 40-60%), Hemicelulosa (20-30%) y lignina (15-30%)(Fan et al., 2021).

La celulosa es el compuesto orgánico de mayor abundancia en la naturaleza y de gran importancia a nivel biológico (Abou-Yousef et al., 2021). Es el componente principal de la biomasa y un polisacárido difícil de degradar en condiciones de tratamientos moderados (Xiaomeng Chen et al., 2021). A la celulosa se le responsabiliza de muchas de las propiedades de la fibra como las propiedades de carácter mecánico, estas dependen del tipo de celulosa que la biomasa contenga; la agrupación de largas cadenas de celulosa mantienen unidas por puentes de hidrogeno entre los grupos- OH cercanos, los cuales forman estructuras que constituyen la fibra (Baghel et al., 2021);(Roy et al., 2020).



**Figura 1.** Estructura química de la celulosa

La Hemicelulosa es uno de los componentes no cristalinos de la fibra. Un polisacárido de cadenas cortas que forma parte de las células vegetales. Se identifica como sustancia de reserva y presentan menor resistencia química y mecánica que la celulosa (Doctoral, 2015). La hemicelulosa sirve como conexión entre la lignina y las fibras de la celulosa. Debido a su naturaleza ramificada es amorfa y relativamente fácil de hidrolizar a sus azúcares constitutivos (Qaseem et al., 2021).



**Figura 2.** Estructura química de la Hemicelulosa

La lignina es un heteropolímero amorfo que consta de tres unidades de fenilpropano, los cuales se mantienen unidos por diferentes enlaces. La lignina es insoluble en agua y ópticamente inactiva (Ramirez, Sandra; Reyes, 2017). Su función principal es dar soporte estructural a la planta, impermeabilidad, resistencia contra los ataques microbianos y al estrés oxidativo (Pellera & Gidaracos, 2018). La lignina puede ser utilizada para la generación de energía térmica, su valor energético depende de la fuente de biomasa y estas varían entre 20.934 y 27.912 KJ/Kg. También puede ser procesada en productos de alto valor económico como polímeros conductores de electricidad o resinas (Tecnológico & Rica, 2019).

En las últimas décadas la contaminación de metales pesados en recursos hídricos, inclusive en suelos y aire plantea una gran problemática ambiental que atenta contra la seguridad alimentaria y la salud pública a nivel mundial (Universidad et al., 2016). Los metales pesados se atribuyen unas características químicas semejantes, tales como: un mismo estado de oxidación, igual distribución electrónica de las capas externas, pesos atómicos comprendidos entre 63,55 y 200,59 g mol<sup>-1</sup>; estos elementos forman parte de las aguas de mar en muy bajas concentraciones, por eso se conocen como oligoelementos o elementos traza (Xiaoyu Chen et al., 2021). Aunque algunos metales traza como hierro manganeso, zinc, cobre cobalto son nutrientes esenciales que sirven como cofactores de numerosas enzimas, también son tóxicos en elevadas concentraciones (Wang et al., 2020). El aporte de estos metales al ciclo hidrológico procede de diversas fuentes, una de ellas es litogénica, es decir que se deriva a partir de los minerales que por causa de erosión y lluvia son arrastrados al agua, no obstante ahora la mayor parte se debe a la actividad humana, mediante: procesos industriales, la minería, etcétera (Zhang et al., 2021). Todos estos tienen su origen en la revolución industrial y desde entonces los esfuerzos para lograr la eliminación de los contaminantes generados por el hombre no han sido capaces de ajustarse ni al ritmo de incremento en la cantidad de desechos industriales ni al crecimiento demográfico.

El zinc es un metal que a diferencia del hierro y cobre se comporta como un metal inerte. Es uno de los constituyentes de más de 300 metaloproteínas catalíticamente activas y de más de 2000 factores de transcripción, y su participación en el metabolismo abarca una gran variedad de reacciones. El zinc fue reconocido como esencial para un sistema biológico en 1869, en humanos las primeras referencias se registraron en 1956 (Odalís et al., 2011). Actualmente las concentraciones de zinc en el agua están aumentando, no por causas naturales sino por actividad humana en la industria minera, en la combustión de carbón y residuos, en el proceso del acero entre otros, generando efectos sobre la salud humana como: problemas en la sangre, los riñones, pequeñas llagas y erupciones cutáneas. En el medio acuático generalmente contamina los fangos, las orillas de los ríos y acidifica las aguas superficiales, algunos peces acumulan zinc en sus órganos y luego son consumidos por humanos, también tiene un efecto tóxico en las plantas impidiendo su crecimiento y desarrollo, limitando sus condiciones de supervivencia (España, 2020).

El cobre es un metal no ferroso, su mayor utilidad se debe a la combinación de sus propiedades químicas, eléctricas, físicas y mecánicas. La mayor parte de cobre del mundo se obtiene de los sulfuros minerales como la calcita. De cientos de compuestos utilizados de manera industrial el más importante es el sulfato de cobre (Londoño-franco et al., 2016). El cobre es utilizado en construcción, utensilios de cocina, joyería, instrumentos musicales, techos, pinturas, inclusive como pesticida, etcétera (Editorial et al., 2019). La inhalación en niveles altos de cobre puede producir irritación en nariz y garganta, la ingestión en niveles altos daña los riñones e hígado, puede producir cáncer e incluso causar la muerte (Salud, 2016).

En la actualidad existen diferentes métodos convencionales en el tratamiento de remoción de metales pesados, algunos de ellos son: **la filtración por membrana** cuya técnica no es selectiva, se usa mucho para el tratamiento de agua potable, aguas residuales industriales, dicha técnica se emplea normalmente para recuperar y tratar sales metálicas de residuos generados en procesos galvanoplásticos, en reciclaje de aceites o en producción de aceites o bebidas (González-García, 2018). **La electrodiálisis** consiste en extraer iones en solución por medio de membranas selectivas de intercambio iónico bajo la influencia de un campo eléctrico, el mecanismo de separación se da en función del campo eléctrico y de la carga de los electrolitos (Corti & Paladino, 2016). **La osmosis inversa** se basa en una membrana porosa que retiene las especies disueltas mientras el agua pasa por ella y así obtener un agua limpia y en buen estado para consumo humano (Darvishmanesh et al., 2017). Dichas membranas retienen elementos de hasta 0,0001 nm otorgándole una amplia capacidad a la técnica en diversos tratamientos. **La nanofiltración** es una tecnología en la cual se realizan combinaciones de tamaños de poros pequeños (de rango nanométrico, MWCO <2000 Da) y también se usa carga para eliminar de forma selectiva cationes divalentes de la disolución mientras permite que los iones monovalentes puedan penetrar teniendo así grandes aplicaciones en alimentos, bebidas, tratamientos de aguas residuales, entre otros (Vendrell-Puigmitja et al., 2020). **La ultrafiltración** es uno de los avances más recientes e importantes de la nanofiltración, consiste en separar sistemas complejos de solución de manera eficiente con membranas de peso molecular precisas y a temperatura ambiente (C. yu Li et al., 2021), los materiales comerciales de membranas de ultrafiltración más conocidos son la polietersulfona (PES) y el fluoruro de polivinilideno (PVDF), dichas membranas porosas con un tamaño de poro nominal específico se utilizan como barreras para asegurar una separación sólido-líquido de manera eficaz (Chew & David Ng, 2019). **El intercambio iónico** es una técnica de separación física en la que los iones intercambiados no se modifican químicamente, es un método muy selectivo y cuenta con una alta recuperación del metal (Ivan et al., 2015).

El carbón activado es otra técnica convencional existente para la remoción de metales pesados y ha demostrado ser un adsorbente eficiente para la eliminación de una amplia variedad de contaminantes orgánicos e inorgánicos (Karnib et al., 2014). El carbón activado es un compuesto microcristalino, carbonoso y no grafico obtenido mediante el proceso de carbonización a partir de material orgánico, sus materiales pueden ser de origen vegetal o mineral. El proceso de activación puede darse a partir de gases oxidantes o por la adición de productos químicos con el objetivo de aumentar su porosidad ya que está altamente relacionada con su capacidad de adsorción (Abuelnoor et al., 2021).

El carbón es sometido a tratamientos en condiciones específicas con el fin de aumentar su porosidad, a su vez el área superficial, de allí se deriva el término “activado” y esto es lo que determina la característica del producto final que incluye su rendimiento en el tratamiento de aguas residuales, la purificación de gases, la extracción de disolventes y la eliminación de sustancias nocivas (Tian et al., 2021). Algunos estudios realizados muestran que más del 40% del carbón activado producido a nivel mundial se emplea en procesos en fase líquida apuntando al futuro con una alta demanda sostenible. Las propiedades intrínsecas del carbón son dependientes de la fuente de materia prima utilizada (Lobato-Peralta et al., 2021). Teniendo en cuenta la importancia del carbón activado en las aplicaciones industriales, los estudios que se han propuesto para su elaboración a partir de distintos materiales y con diferentes tipos de activación han tenido en los últimos años un crecimiento importante en el área de la investigación. El carbón activado se puede producir por activación física (también llamada térmica) o por activación química (Guclu et al., 2021).

En la activación física se realiza inicialmente la carbonización de la materia prima y seguidamente se ejecuta un tratamiento térmico en altas temperaturas de activación que van desde 800°C a 1100°C bajo un flujo de gas como: Vapor de agua, CO<sub>2</sub>, o una mezcla de cualquier gas que garantice una atmosfera ligeramente reactiva (Vidal et al., 2018). En la activación química la materia prima cruda se impregna con agentes activantes químicos como: H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub>, ZnCl<sub>2</sub>, NaOH y KOH; en este periodo se controla estrictamente la temperatura, la concentración de agente activante, el tiempo de pirolisis ya que la función de los agentes deshidratantes es inhibir la formación de alquitrán y otros productos no deseados durante el proceso de carbonización (Amran et al., 2021)(González-García, 2018). Algunas de las ventajas que presenta la activación química con respecto a la física son: el tiempo de pirolisis generalmente más cortos, temperatura de activación más baja y normalmente dichos carbones presentan un mayor rendimiento(Vidal et al., 2018).

Existen diferentes materiales potenciales para elaboración de carbón activado, algunos de ellos son: Las cáscaras de nuez, su propiedad de alta densidad de la biomasa la hace favorable para la producción de carbones activados con buena estructura microporosa (Lee et al., 2021). la cáscara de arroz también es un buen precursor para preparar carbón activado, se usa como adsorbente de CO<sub>2</sub> ya que el carbón activado obtenido posee una alta superficie (de 1097 m<sup>2</sup>/g), mostrando una buena capacidad adsorción con una alta selectividad (Melliti et al., 2021). Entre otros materiales potenciales se tienen los desechos agrícolas, como las semillas de granada (Rashtbari et al., 2018), el té de desecho (Kan et al., 2017), los residuos de hierbas (S. Li et al., 2017), las algas (Liu et al., 2019), bagazo de uva (Demiral & Güngör, 2016) y las cáscaras de coco, entre otros (Ahmad et al., 2011). Se han estudiado eficazmente como un precursor económico para la preparación de carbón activado.

Se han realizado estudios para la elaboración de carbón activado en los cuales se usa como fuente la biomasa de la planta de piña (Pimphor & Roddecha, 2021) utilizando activación química con KOH. Este agente activante ha mostrado resultados prometedores porque aumenta el desarrollo de la porosidad del carbón y a su vez su capacidad de adsorción, llegando a obtener carbones con porcentajes de rendimiento del 27% para unos casos (Astuti et al., 2019). Otros activados con ZnCl<sub>2</sub> presentan rendimientos hasta del 76% (Foo & Hameed, 2012).

Carbones hechos con biomasa de piña han mostrado capacidad de adsorción hasta de 462,10 mg / g. Por otro lado carbones activados con NaOH mostraron una adsorción mínima y máxima de 9,7 y 24,5 mg de Cu por g de carbón activado respectivamente, para el Zinc se obtuvieron valores de adsorción mínimos de 0 y máximos de 8,3 mg de Zn por g de carbón activado (Souza et al., 2018). Carbones obtenidos de bagazo de uva, activados con H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> presentaron un adsorción máxima de Cu de 31,25 mg/g (Demiral & Güngör, 2016). El carbón hecho de las semillas de *Stryax officinalis* y activado con KOH presentó un adsorción límite de zinc de 10,05mg/g (Sellaoui et al., 2016).

El presente trabajo consistió en elaborar carbón activado a partir de la biomasa residual de la cosecha de piña que es desechada en grandes cantidades, se determinaron las condiciones de preparación más amigables con el medio ambiente, y una vez obtenidos dichos carbones se utilizaron para la remoción de Zn y Cu en solución.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Recolección y preparación de la materia prima

El material orgánico resultante de la cosecha de piña fue recolectado de la empresa de Bengala en el municipio de miranda, las hojas de la planta de piña fueron recolectadas del suelo ya que se encontraban desprendidas, antes de ser guardadas fueron secadas al sol para evitar descomposición, aunque dichas muestras habían perdido humedad al exponerse al sol, era necesario llegar un porcentaje de humedad igual o menor al 10%, por esta razón se introdujo la muestra en un horno durante 84 horas a 60°C. El material seco se molió hasta obtener un tamaño de partícula inferior a malla No.10 serie Taylor.

### 2.2. Porcentaje de Humedad

Es importante tener en cuenta que el agua es uno de los principales compuestos de las plantas, esta puede llevar al deterioro rápido las muestras a analizar, por esa y otras razones se hace necesario eliminar la mayor cantidad de agua posible. La humedad del material se midió según la norma **ASTM E871**, en esta se coloca una cantidad de muestra previamente pesada en el horno a 105°C por 24 o el tiempo requerido para alcanzar un peso constante, luego se calcula el porcentaje de humedad por diferencia de peso como lo muestra la ecuación 1 (López et al., 2013).

$$CH = \frac{PV - PS}{PS} \times 100 \quad \text{Ec. 1}$$

Dónde: CH= es el contenido de humedad, PV= el peso inicial de la muestra antes del secado, PS= peso final después de ser la muestra sometida al horno durante 24 horas.

### 2.3. Determinación de extractivos, lignina y cenizas en Biomasa

Para conocer el porcentaje de extractivos de la biomasa se secuenciaron los cálculos de las ecuaciones 2, 3 y 4.(Erick et al., 2014).

$$Extractivos = \frac{\frac{(PMAE)}{1 + \left(\frac{CH}{100}\right)} - (PMDE) \times 100}{\frac{(PMAE)}{1 + \left(\frac{CH}{100}\right)}} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde: CH= contenido de humedad, PMAE= Peso de la muestra antes de la extracción, PMDE=Peso de la muestra después de la extracción y secado.

$$\% AIR = \frac{((Peso_{crisol} + AIR) - Peso_{crisol})}{ODW_{simple}} \times 100 \quad \text{Ec. 3}$$

Donde: AIR=Porcentaje en peso de residuo insoluble en acido, ODW simple=Peso seco en horno de la muestra libre de extractos

$$\%AIL = \frac{((Peso_{crisol} + AIR) - Peso_{Crisol})(Peso_{crisol} + ASH) - Peso_{Crisol}}{ODW_{simple}} \times 100 \quad \text{Ec. 4}$$

Donde: %AIL= porcentaje de lignina insoluble en acido, AIR=Porcentaje en peso de residuo insoluble en acido, ASH=ceniza, ODW simple=Peso seco en horno de la muestra libre.

### 2.3.1. Extractivos en Agua

Técnica basada en el método **TAPPI 207**. Para este análisis se pesaron 8 g de la materia prima previamente tratados, se cubrieron con una tela delgada para evitar tener pérdidas del material, la muestra se colocó dentro del extractor Soxhlet y se llenó el balón de ebullición con 250mL de agua destilada, se ajustó el equipo y se puso a ebullición durante 8 horas aproximadamente  $100 \pm 105^\circ\text{C}$ . Una vez finalizado el tiempo se sacó la muestra contenida en la tela protectora, se secó en un horno 24 horas a  $65^\circ\text{C}$  y luego se registró su peso(*PULPA Y PAPEL I (En Preparación)*, 2008).

### 2.3.2. Extractivos en Etanol

Técnica basada en el método **TAPPI 264**. Se utilizó la muestra obtenida luego de realizarle la extracción con agua, se cubrió nuevamente con la tela para introducirla en el extractor Soxhlet, esta vez, se llenó el balón de ebullición con 250 mL de etanol al 96%, se dejó en ebullición por 8 h entre  $80 \pm 85^\circ\text{C}$  y una vez completado el proceso se extrajo la muestra se puso a secar y se registró su peso(Buchanan, 2007).

### 2.3.3. Porcentaje de lignina

Técnica basada en el método **TAPPI 222**. En el método de Hidrólisis cuantitativa acida se realiza una hidrólisis en dos etapas, la primera es con ácido sulfúrico al 72% y la segunda con el mismo acido diluido al 4%. Se pesaron 0.3 g de la muestra, se le adiciónó 3 mL de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  al 72%, una vez impregnada se colocó en baño maría a  $30^\circ\text{C}$  por 1 h, Se dejó enfriar unos minutos y con mucho cuidado se agregaron 86 mL de agua destilada para disminuir la concentración de la solución de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  al 4%. Para completar la segunda fase de hidrólisis, esta mezcla se introdujo en un autoclave y se mantuvo a  $121^\circ\text{C}$  por un periodo de 1 h; una vez concluido se filtró con papel filtro previamente pesado y se llevó al horno por 24 horas a  $60^\circ\text{C}$  para finalmente registrar el peso (Sluiter et al., 2012).

### 2.3.4. Determinación de ceniza

Técnica basada en la norma **UNE 57050**. Para esta prueba los crisoles a utilizar se secaron previamente en la mufla a  $525^\circ\text{C}$  hasta mantener peso constante, seguidamente se dejaron en el desecador hasta enfriar. Dichos crisoles fueron ocupados con la muestra restante de la extracción de lignina previamente pesada, se colocaron en la mufla a  $525^\circ\text{C}$  durante 15h. Una vez culminado el proceso y fríos los crisoles se pesaron(Erick et al., 2014).

## 2.4. Análisis termogravimétrico

Para asentar los parámetros de concentración de agente activante y temperatura mínima y máxima a establecer en el diseño experimental, se requirió de una prueba TGA tanto de la materia prima como de la mezcla de la materia prima y la solución a máxima concentración del agente activante (5%) para poder conocer el tiempo de descomposición. Se utilizaron 2 mg de muestra por cada análisis. La rampa de calentamiento fue de  $10^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$  y el rango de temperatura de análisis abarcó desde la temperatura ambiente hasta  $900^\circ\text{C}$  en atmósfera de nitrógeno con un flujo de  $50 \text{ml} \cdot \text{min}^{-1}$ . Se utilizó el equipo de análisis térmico simultaneo sistema DSC/ TGA de TA instrumentos modelo Discovery SDT 650 de la Universidad Santiago de Cali sede Pampalinda.

## 2.5. Diseño Experimental

Se utilizó un modelo experimental de dos factores con tres niveles ( $3^2$ ) para un total de 9 combinaciones de las variables (tabla 1), se escogieron como variables independientes la temperatura (500, 600 y  $700^\circ\text{C}$ ) y la concentración de agente activante (KOH al 1, 3 y 5%). Las variables de respuesta fueron el rendimiento y el porcentaje de remoción de los metales. Para el presente trabajo se dejaron

Generación de Carbón activado a partir de residuos de piña (*Ananás comosus*) para la remoción de metales pesados. Programa de Química 2021  
 constantes el tiempo de impregnación de 24 horas y el tiempo de pirólisis de una hora, los cuales corresponden a valores habituales encontrados en la literatura. La relación másica biomasa/agente activante se trabajó constante en una proporción de 1:8,3 necesariamente para que la muestra completa pudiera tener contacto con el agente activante, es decir, por cada 6 g de materia prima se le agregaron 50 mL de solución KOH.

**Tabla 1.** Datos de variables de análisis según el diseño experimental.

		Temperatura de Carbonización °C		
		500	600	700
Concentración de Agente Activante (KOH)	1%	CA 1	CA 4	CA 7
	3%	CA 2	CA 5	CA 8
	5%	CA 3	CA 6	CA 9

## 2.6. Elaboración del Carbón activado

Para la elaboración del carbón activado se utilizó como agente activante el hidróxido de sodio en concentraciones del 1, 3 y 5%. La materia prima fue puesta en contacto con una solución de hidróxido de sodio. Se dejó en contacto por 24 horas a temperatura ambiente, seguidamente la muestra fue llevada a la mufla por 1 hora a las temperaturas indicadas según el diseño experimental, se usaron crisoles con tapa para evitar el ingreso de aire. Una vez realizada la pirólisis se realizó un lavado con abundante agua y una solución de HCl para ajustar su pH. Posteriormente la muestra fue sometida a un proceso de secado en un horno por 24 horas a 60°C para finalmente ser macerada y almacenada en un desecador a fin de ser usada en la remoción de los metales de Zn (II) y Cu (II).

## 2.7. Pruebas de adsorción de metales

### 2.7.1. Preparación de soluciones

Tanto la solución de zinc como la de cobre se realizaron con reactivos grado analítico marca MOL LABS. A partir de un reactivo patrón madre de Nitrato de cobre de 1000 ppm se prepararon 500 mL de una solución de  $\text{Cu}^{2+}$  a 10 ppm, esta, se aforó con una solución de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) 5M. También se prepararon 500 mL de una solución de  $\text{Zn}^{2+}$  a 10 ppm a partir de un patrón estándar de sulfato de Zinc de 1000 ppm, esta de igual forma se aforó con una solución de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) 5M.

### 2.7.2. Estudios de remoción

Todas las pruebas desarrolladas en estos procedimientos según el diseño experimental se realizaron por duplicado para tener más precisión en los resultados. Para comprobar si el carbón activado cumplía su función de adsorción de los metales de zinc y cobre se evaluó mediante el siguiente procedimiento: a 25 mL de las soluciones indicadas anteriormente de zinc y cobre se les agregaron 0.2 g de carbón activado, dichas soluciones se colocaron en agitación constante por 2 horas a 320 rpm. Una vez pasado el tiempo, se filtraron inicialmente con papel filtro, seguidamente con un filtro de membrana de 0.22  $\mu\text{m}$ , se embazaron las muestras en tubos de ensayo para luego ser analizadas en el espectrofotómetro de adsorción atómica marca SHIMADZU AA-6300. Para la determinación de ambos metales se utilizó la técnica en llama acetileno-aire.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Porcentaje de humedad

Realizando una prueba por duplicado la humedad de la muestra se calculó mediante la ecuación 1 (Costa et al., 2014). La muestra de residuo de piña obtuvo un porcentaje de humedad final de 9.8%, es decir, se eliminó más del 90% del agua presente. Un 10% de humedad en la muestra es lo máximo requerido para poder realizar las pruebas correspondientes para la elaboración del carbón activado.

#### 3.2. Determinación de extractivos en biomasa

Para determinar los porcentajes de extractivos tanto en etanol como en agua, se consideró el peso de las muestras antes y después del tratamiento, así como el contenido de humedad mediante Ecuación 2. Se determinó el porcentaje en peso del residuo insoluble en ácido mediante la Ecuación 3, para finalmente calcular el porcentaje de lignina insoluble en ácido (Ecuación 4) según la norma **TAPPI 222** (Sluiter et al., 2012). El contenido de cenizas se calculó mediante termogravimetría. (tabla 2).

Aunque el contenido de cenizas es generalmente pequeño, puede influir significativamente en el proceso de pirólisis, especialmente si las cenizas contienen metales alcalinos como potasio o haluros como cloruros, generalmente cantidades de cenizas superiores al 5% en carácter básico ocasionan resistencias térmicas al paso del calor y originan oxidación (Rojas-González, 2008)

**Tabla 2.** Resultados de la caracterización de la muestra

<b>Análisis</b>	<b>Resultado (%)</b>
% Extractivos en Agua	24,7
% Extractivos en Etanol	1,5
% de Lignina insoluble en ácido	12,1
% de cenizas	6,7

#### 3.3. Análisis TGA de la mezcla de la materia prima con solución de KOH al 5%

La materia prima posee naturalmente una baja estabilidad térmica, no conocerla limita el procedimiento de obtención de carbón activado, debido a esto, es necesario evaluar la estabilidad térmica de la materia prima en tratamiento alcalino, es decir, impregnada con solución de KOH en su mayor concentración (5%) (figura 1). De acuerdo con los resultados obtenidos en la prueba TGA teniendo en cuenta que la línea azul da la curva del flujo de calor normalizado y la línea verde el peso de la muestra, se pudieron observar varias etapas significativas de pérdida de masa: La región comprendida entre 60 y 100°C corresponde a pérdida de peso atribuida a la evaporación del agua superficial tanto de la fibra como de la solución de KOH, entre otros compuestos volátiles (Betancourt, 2017) y este caso correspondió a una pérdida de peso del 21,74%. Más adelante se observa otro cambio significativo en la zona comprendida entre 110 y 300°C la literatura reporta datos de pérdida de peso del 47,66% y se deduce que esto se debe a la descomposición de los componentes principales de la fibra como: lignina, hemicelulosa, pectina y celulosa (Cagnon et al., 2009), en este rango se obtuvo un valor de pérdida de peso de 47,72% concordando con los datos mencionados en la literatura. Por último, se denota una región entre 300 y 500°C con una pérdida de peso del 3.23% que corresponde a la degradación de la celulosa. Después de calentar de 25 a 900°C el material residual del 3,78% corresponde a residuos carbonáceos ( $\text{CaCO}_3$  o carbonato de Calcio) y fibras sin degradar (Betancourt, 2017), junto con la ceniza obtenida en el proceso (Graw, 2002).

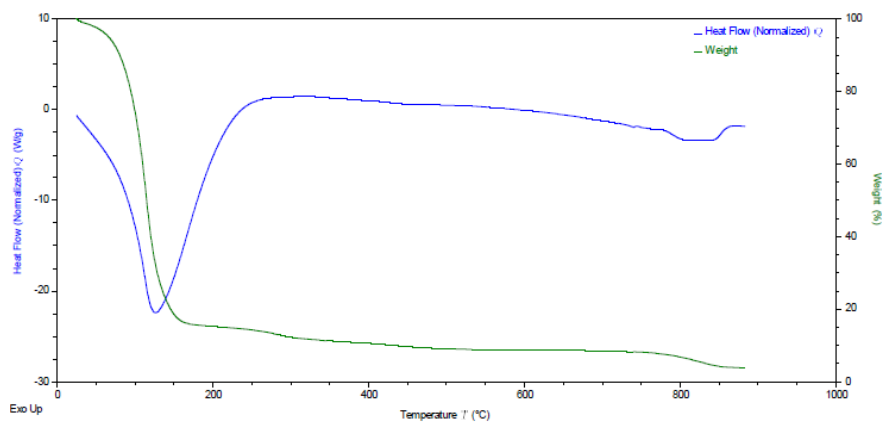


Figura 3. Resultados TGA de la mezcla de la muestra con el agente activante.

### 3.4. Análisis de adsorción de metales pesados

Tabla 3. Adsorción de Zn y Cu.

No. De Carbón Activado	Concentración de la solución de KOH %	Temperatura (°C)	Cantidad de Cu adsorbido por Cantidad de carbón (mg/g)	Cantidad de Zn adsorbido por Cantidad de carbón (mg/g)
1	1	500	0,06	0,00
2	3	500	0,05	0,00
3	5	500	0,15	0,00
4	1	600	0,09	0,00
5	3	600	0,05	0,01
6	5	600	0,12	0,03
7	1	700	0,06	0,03
8	3	700	0,04	0,06
9	5	700	0,09	0,03

Los datos de remoción de Zn y Cu observados en la tabla 3, muestran que el carbón 8 tuvo la máxima adsorción de zinc con 0,06mg/g. En general los carbones no presentaron una buena remoción de zinc ya que muchos carbones no adsorbieron y los que sí lo hicieron no presentaron un alto grado de remoción. Sin embargo, en la adsorción de cobre podemos analizar que todos los carbones adsorbieron, el de menor adsorción con una cantidad de 0,04mg de Cu por g de carbón y el de máxima adsorción con 0,15 mg de Cu por cada gramo de carbón siendo el carbón activado No.3 de concentración al 3% y de temperatura de pirólisis de 500 °C el que presenta la mejor capacidad de adsorción.

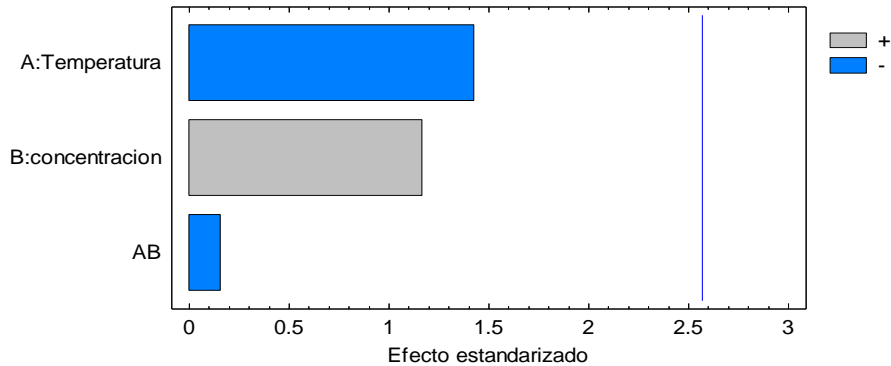
Tabla 4. Análisis de Varianza para la adsorción de cobre

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Temperatura	0.00201667	1	0.00201667	2.03	0.2134
B: concentración	0.00135	1	0.00135	1.36	0.2962
AB	0.000025	1	0.000025	0.03	0.8801
Error total	0.00496389	5	0.000992778		
Total (corr.)	0.00835556	8			

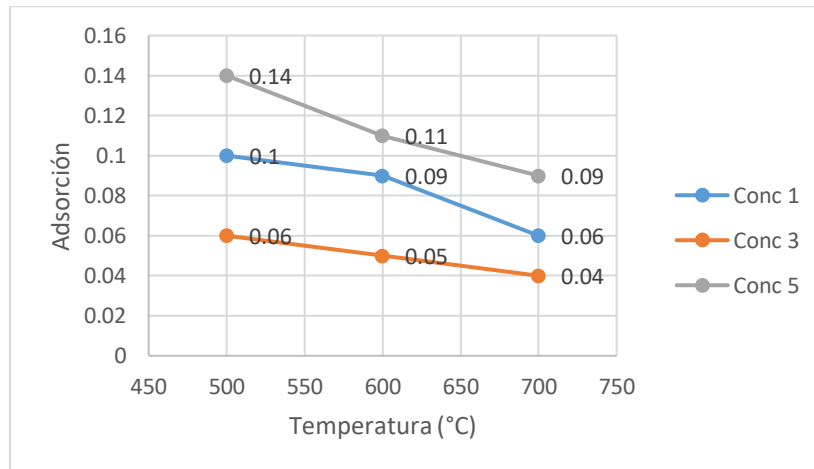
De acuerdo con los resultados del análisis de varianza (ANOVA) no hay una correlación significativa para la variable adsorción, puesto que el modelo estadístico ajustado explica tan solo un 40.5918% de la variabilidad (Ver Gráfico 1). De acuerdo a lo que se puede observar en la tabla 3, los carbones que obtuvieron mejor valor de remoción de Cobre fueron los que se prepararon con mayor concentración de agente activante, es decir, que se realizaron con la solución de KOH al 5% (Ver gráfico 2).

Aunque el ANOVA no mostró una buena correlación entre la adsorción y la temperatura, una buena tendencia para futuros ensayos sería aumentar la concentración de KOH tal como lo muestra las líneas de tendencia en el gráfico 3.

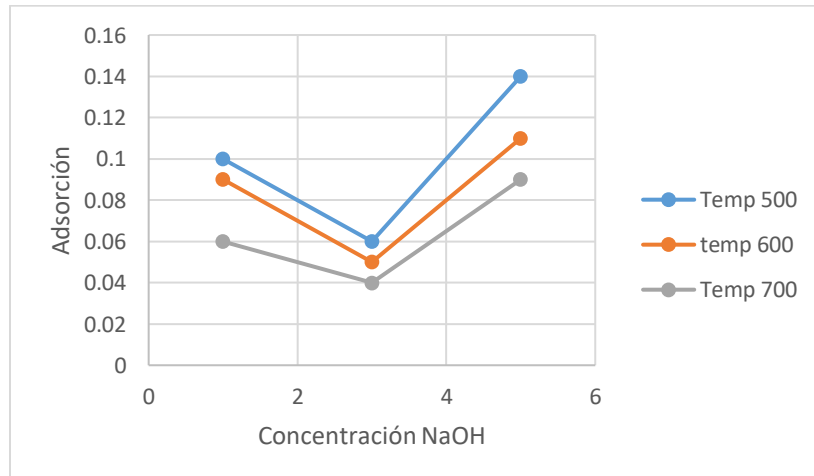
**Gráfico 1.** Diagrama de Pareto estandarizada para adsorción de cobre.



**Gráfico 2.** Muestra la relación entre la temperatura y la adsorción en base a las concentraciones de agente activante.



**Gráfico 3.** Muestra las líneas de tendencia de la concentración de agente activante versus adsorción a 500, 600 y 700°C.



**Tabla 5.** Rendimiento de formación de carbón activado.

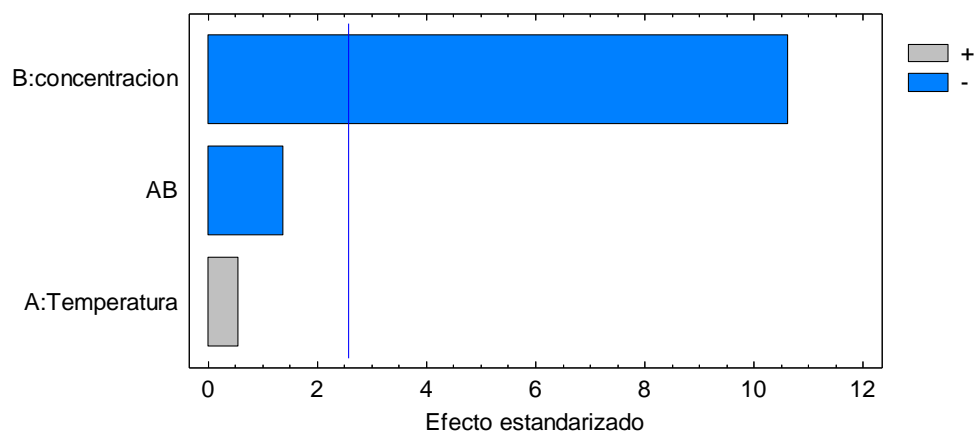
No. De Carbón Activado	Concentración de la Solución de KOH (%)	Temperatura °C	Rendimiento Base seca de carbón/g de biomasa seca
1	1	500	0,18
2	3	500	0,16
3	5	500	0,13
4	1	600	0,19
5	3	600	0,15
6	5	600	0,12
7	1	700	0,20
8	3	700	0,15
9	5	700	0,13

**Tabla 6.** Análisis de varianza (ANOVA) para el rendimiento

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Temperatura	0.0000166667	1	0.0000166667	0.31	0.6003
B: concentración	0.00601667	1	0.00601667	112.81	<b>0.0001</b>
AB	0.0001	1	0.0001	1.87	0.2292
Error total	0.000266667	5	0.0000533333		
Total (corr.)	0.0064	8			

El ANOVA indica que la concentración de agente activante tiene un efecto significativo en el rendimiento del carbón activado ya que el modelo, así, ajustado explica 95.8 de la variabilidad en Rendimiento (Ver Gráfico 4). El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0.007y el error medio absoluto (MAE) de 0.005 es el valor promedio de los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Según la tabla 5 los carbonos de concentraciones al 1% (1,4 y 7), comprenden los mejores rendimientos seguidos por los de concentración al 3% (2,5 y 8) y 5% (3, 6 y 9). Esto se debe a que el agente activante deshidrata en mayor proporción la muestra a mayor concentración, por esa razón en cada grupo de carbonos de igual temperatura se nota el descenso del rendimiento a medida que aumenta la concentración de KOH. A pesar de que la literatura registra que a mayores temperaturas disminuye el porcentaje de rendimiento debido al cambio de contenido del material volátil, este experimento parece tener un comportamiento contrario, pues se puede observar de forma más clara con las concentraciones al 1% que aumenta su rendimiento a pesar que también aumenta su temperatura (Pimphor & Roddecha, 2021);(Echeverry & Fonthal, 2011).

**Gráfico 4.** Diagrama de Pareto estandarizada para rendimiento.



Se realizó la prueba de capacidad de adsorción máxima para los carbones que obtuvieron mayor grado de remoción de cobre cuyos resultados se observan en la tabla 7. Dicha prueba consistió en dejar por 6 horas en agitación constante a 320 rpm el carbón activado con la solución de nitrato de cobre de 10 ppm para finalmente poder determinar la adsorción máxima que se puede llegar a tener de cobre con dichos carbones. El tiempo de contacto fue estimado según los valores presentados en la literatura en los que se puede llegar a tener niveles máximos de remoción (Demiral & Güngör, 2016); (Mondal & Majumder, 2019).

**Tabla 7.** Muestra los resultados de adsorción de Cu de los carbones 3,4,6 y 9.

No. De Carbón Activado	Concentración De la solución de KOH (%)	Temperatura (°C)	Cantidad de Cu Adsorbido por Cantidad de Carbón (mg/g)
3	5	500	0,17
4	1	600	0,09
6	5	600	0,14
9	5	700	0,09

Con base a los resultados reflejados la tabla 7 se puede observar que la adsorción de cobre no tuvo ningún cambio significativo a pesar que se aumentó al triple el tiempo de contacto entre el carbón y la solución de cobre estimado para la remoción, se puede concluir que la capacidad máxima de adsorción de los carbones no supera los 0,17 mg de Cu por gramo de carbón activado.

En este orden de ideas los carbones activados realizados no mostraron buena eficiencia a la hora de remover zinc y cobre debido a que los datos de otros carbones registrados en la literatura reportan niveles mínimos de adsorción de Cu 9,7 mg/g mientras que en el desarrollo del presente trabajo se obtuvieron valores de adsorción de Cu máximos de 0,17mg/g (Souza et al., 2018). Y aunque la adsorción de zinc a nivel general no es tan elevada para algunos carbones, 0,06 mg/g que fue el valor máximo obtenido sigue siendo muy bajo en comparación con otros carbones que muestran efectividad de 10,05mg/g en adsorción de zinc (Sellaoui et al., 2016).

#### IV. CONCLUSIONES

Aunque se logró generar carbón activado a partir de la biomasa de desecho de la cosecha de piña (que es una fuente de energía renovable con poco uso), no se obtuvieron buenos niveles de remoción de los metales cobre y Zinc en los intervalos de temperatura y concentración de catalizador utilizados en esta investigación. Sin embargo, de acuerdo a los resultados obtenidos, se puede abrir la

Generación de Carbón activado a partir de residuos de piña (*Ananás comosus*) para la remoción de metales pesados. Programa de Química 2021 brecha a nuevos estudios modificando la variable de concentración de agente activante aumentado la concentración de catalizador y disminuyendo la temperatura para mejorar la remoción de cobre. También podrían estudiarse el efecto de otras variables como el tiempo de pirolisis u otro catalizador.

El rendimiento de obtención de carbón activado disminuye al aumentar la concentración de catalizador, sin embargo, la temperatura presentó poco efecto en el rendimiento en el intervalo de valores estudiados en esta investigación.

A pesar que el carbón activado generado no resulto eficiente para la remoción de zinc y cobre, podría resultar eficaz para la adsorción de otros metales pesados.

## REFERENCIAS

- Abou-Yousef, H., Dacrory, S., Hasanin, M., Saber, E., & Kamel, S. (2021). Biocompatible hydrogel based on aldehyde-functionalized cellulose and chitosan for potential control drug release. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 21(October 2020), 100419. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2021.100419>
- Abuelnoor, N., AlHajaj, A., Khaleel, M., Vega, L. F., & Abu-Zahra, M. R. M. (2021). Activated Carbons from Biomass-Based Sources for CO<sub>2</sub> Capture Applications. *Chemosphere*, 282(March), 131111. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131111>
- Ahmad, F., Daud, W. M. A. W., Ahmad, M. A., & Radzi, R. (2011). Using cocoa (*Theobroma cacao*) shell-based activated carbon to remove 4-nitrophenol from aqueous solution: Kinetics and equilibrium studies. *Chemical Engineering Journal*, 178, 461–467. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.10.044>
- Amran, F., Abbas, M., & Zaini, A. (2021). Valorization of Casuarina empty fruit-based activated carbons for dyes removal – activators, isotherm, kinetics and thermodynamics. *Surfaces and Interfaces*, 101277. <https://doi.org/10.1016/j.surf.2021.101277>
- Astuti, W., Sulistyanyingsih, T., Kusumastuti, E., Thomas, G. Y. R. S., & Kusnadi, R. Y. (2019). Thermal conversion of pineapple crown leaf waste to magnetized activated carbon for dye removal. *Bioresourve Technology*, 287(February), 121426. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121426>
- Baghel, R. S., Reddy, C. R. K., & Singh, R. P. (2021). Seaweed-based cellulose: applications, and future perspectives. *Carbohydrate Polymers*, 267(March), 118241. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118241>
- Betancourt, C. (2017). *Utilización de fibras de hoja de piña como refuerzo para biocompuestos fabricados por modelo de compresión*.
- Blasnilo, E., & Ramírez, R. (2016). *Caracterización y diagnóstico de la cadena productiva de la piña en el departamento* *Characterization and diagnosis of the production chain of pineapple in the department of Casanare*. 5(1), 29–48.
- Buchanan, M. (2007). *Solvent extractives of wood and pulp (Proposed revision of T 204 cm-97)*.
- Cagnon, B., Py, X., Guillot, A., Stoeckli, F., & Chambat, G. (2009). *Contributions of hemicellulose, cellulose and lignin to the mass and the porous properties of chars and steam activated carbons from various lignocellulosic precursors*. 1, 292–298.
- Chen, Xiaomeng, Cheng, W., Li, S., Tang, X., & Wei, Z. (2021). The “quality” and “quantity” of microbial species drive the degradation of cellulose during composting. *Bioresourve Technology*, 320(PB), 124425. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124425>
- Chen, Xiaoyu, Seo, H., Han, H., Seo, J., Kim, T., & Kim, G. (2021). Conservative behavior of terrestrial trace elements associated with humic substances in the coastal ocean. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2021.05.020>
- Chew, C. M., & David Ng, K. M. (2019). Utilization of porous and non-porous polymeric materials in ultrafiltration and distillation for water treatment systems. *Materials Today: Proceedings*, 29(November 2018), 202–206. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.531>
- Clarkson, M. A. (2018). *Challenges of Chemical Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Biofuel Production*. III(2), 1–35.
- Corti, S. V., & Paladino, S. C. (2016). Estabilización tartárica en vinos: Comparación entre electrodiálisis y tratamiento de frío por contacto. *Revista de La Facultad de Ciencias Agrarias*, 48(1), 225–238.
- Costa, D., Tecnológico, I., Rica, D. C., & Forestal, E. D. I. (2014). *diez especies utilizadas como*. 27, 34–46.
- Darvishmanesh, S., Pethica, B. A., & Sundaresan, S. (2017). Forward osmosis using draw solutions manifesting liquid-liquid phase separation. *Desalination*, 421(June), 23–31. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.05.036>
- Demiral, H., & Güngör, C. (2016). Adsorption of copper(II) from aqueous solutions on activated carbon prepared from grape bagasse. *Journal of Cleaner Production*, 124, 103–113. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.084>

- Generación de Carbón activado a partir de residuos de piña (*Ananás comosus*) para la remoción de metales pesados. Programa de Química 2021
- Doctoral, T. (2015). *Capacidad de uso y evaluación de suelos para distintos usos forestales mediante SIG en el Valle de los Pedroches ( Córdoba )*.
- Echeverry, N. A., & Fonthal, G. (2011). *Identificación de las Variables Óptimas para la Obtención de Carbón Activado a partir del Precursor Guadua Angustifolia Kunth. June*.
- Editorial, I., Am, C., Program, S., Lecture, O., Lecture, G., Lecture, C., Speaking, L., Am, T., Safety, F., America, L., Jm, N., & Co, P. (2019). *Volumen 36 Número 1 (2019). 1, 1–97*.
- Erick, R., Gisela, M., Laura, T. L. P., & Triny, T. R. B. M. (2014). *Determinación de los principales componentes de la biomasa lignocelulósica ; celulosa , hemicelulosa y lignina de la paja de trigo para su posterior pretratamiento biológico. October*.
- España, G. de. (2020). *ZN (ZINC Y COMPUESTOS)*.
- Fan, H., Gu, J., Wang, Y., Yuan, H., Chen, Y., & Luo, B. (2021). Effect of potassium on the pyrolysis of biomass components: Pyrolysis behaviors, product distribution and kinetic characteristics. *Waste Management, 121*, 255–264. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.12.023>
- Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2012). Porous structure and adsorptive properties of pineapple peel based activated carbons prepared via microwave assisted KOH and K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> activation. *Microporous and Mesoporous Materials, 148*(1), 191–195. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2011.08.005>
- González-García, P. (2018). Activated carbon from lignocellulosics precursors: A review of the synthesis methods, characterization techniques and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82*(August 2017), 1393–1414. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.117>
- Graw, H. (2002). *MÉTODOS DE ANÁLISIS TÉRMICO 1. Introducción. 1–32*.
- Guclu, C., Alper, K., Erdem, M., Tekin, K., & Karagoz, S. (2021). Activated carbons from co-carbonization of waste truck tires and spent tea leaves. *Sustainable Chemistry and Pharmacy, 21*(February), 100410. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2021.100410>
- Hafemann, E., Battisti, R., Marangoni, C., & Machado, R. A. F. (2019). Valorization of royal palm tree agroindustrial waste by isolating cellulose nanocrystals. *Carbohydrate Polymers, 218*(April), 188–198. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.04.086>
- Ivan, D., Rubio, C., Adolfo, R., Calderón, M., & Gualtero, A. P. (2015). *Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales . Una Revisión Treatments for Removal of Heavy Metals Commonly Found in Industrial Wastewater . A Review. 13*(1), 73–90.
- Kan, Y., Yue, Q., Li, D., Wu, Y., & Gao, B. (2017). Preparation and characterization of activated carbons from waste tea by H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> activation in different atmospheres for oxytetracycline removal. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 71*, 494–500. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2016.12.012>
- Karnib, M., Kabbani, A., Holail, H., & Olama, Z. (2014). Heavy Metals Removal Using Activated Carbon , Silica and Silica Activated Carbon Composite. *Energy Procedia, 50*, 113–120. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.06.014>
- La, P., Etanol, P. D. E., Del, A. P., & Córdoba, M. E. M. (2014). *DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE LA CELULOSA , CELOBLASA Y DE NaOH EN LA HIDRÓLISIS. 24*(2), 35–51.
- Lee, C. L., Chin, K. L., H'ng, P. S., Rashid, U., Maminski, M., & Khoo, P. S. (2021). Effect of pretreatment conditions on the chemical–structural characteristics of coconut and palm kernel shell: A potentially valuable precursor for eco-efficient activated carbon production. *Environmental Technology and Innovation, 21*. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101309>
- Li, C. yu, Ma, Y., Ma, L., Zhi, X. lei, & Peng, G. ping. (2021). Improving the clarity and sensitization of polysorbate 80 by ultrasonic-assisted ultrafiltration technology. *European Journal of Pharmaceutical Sciences, 159*(October 2020). <https://doi.org/10.1016/j.ejps.2021.105719>
- Li, S., Yang, Q., & Ye, Y. (2017). Preparation of activated carbon from herbal residues and kinetics of cephalosporin antibiotic adsorption in wastewater. *BioResources, 12*(2), 2768–2779. <https://doi.org/10.15376/biores.12.2.2768-2779>
- Liu, Z., Adewuyi, Y. G., Shi, S., Chen, H., Li, Y., Liu, D., & Liu, Y. (2019). Removal of gaseous Hg<sup>0</sup> using novel seaweed biomass-based activated carbon. *Chemical Engineering Journal, 366*(February), 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.02.025>
- Lobato-Peralta, D. R., Duque-Brito, E., Ayala-Cortés, A., Arias, D. M., Longoria, A., Cuentas-Gallegos, A. K., Sebastian, P. J., & Okoye, P. U. (2021). Advances in activated carbon modification, surface heteroatom configuration, reactor strategies, and regeneration methods for enhanced wastewater treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering, 9*(4), 105626. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105626>
- Londoño-franco, L. F., Londoño-muñoz, P. T., & Muñoz-garcía, F. G. (2016). *EN LA SALUD HUMANA Y ANIMAL RISK OF HEAVY METALS IN HUMAN AND ANIMAL HEALTH RISCO DE METAIS PESADOS NA SAÚDE HUMANA E ANIMAL. 14*(2), 145–153. [https://doi.org/10.18684/BSAA\(14\)145-153](https://doi.org/10.18684/BSAA(14)145-153)
- López, L. M., Sarmiento, A. P., Fajardo, J. I., Valarezo, L. E., & Gallego, R. Z. (2013). *Determinación del porcentaje de humedad , solubles e insolubles en agua de la fibra de Carludovica Palmata ( paja toquilla )*. 23–27.
- Melliti, A., Srivastava, V., Kheriji, J., Sillanpää, M., & Hamrouni, B. (2021). Date Palm Fiber as a novel precursor for porous

- Generación de Carbón activado a partir de residuos de piña (*Ananás comosus*) para la remoción de metales pesados. Programa de Química 2021  
 activated carbon: Optimization, characterization and its application as Tylosin antibiotic scavenger from aqueous solution. *Surfaces and Interfaces*, 24(September 2020). <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2021.101047>
- Micanquer-Carlosama, A., Cortés-Rodríguez, M., & Serna-Cock, L. (2020). Formulation of a fermentation substrate from pineapple and sacha inchi wastes to grow *Weissella cibaria*. *Heliyon*, 6(4), 0–7. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03790>
- MinAgricultura. (2018). *Producción de Piña*.
- Mohd Ali, M., Hashim, N., Abd Aziz, S., & Lasekan, O. (2020). Pineapple (*Ananas comosus*): A comprehensive review of nutritional values, volatile compounds, health benefits, and potential food products. *Food Research International*, 137(July), 109675. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109675>
- Mondal, S., & Majumder, S. K. (2019). Honeycomb-like porous activated carbon for efficient copper (II) adsorption synthesized from natural source: Kinetic study and equilibrium isotherm analysis. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(4), 103236. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103236>
- Odalís, D., Guardia, D., García, C. U., & De, D. M. (2011). *Algunas aplicaciones clínicas del zinc y su acción sobre el sistema inmune*  
*Some clinical applications of zinc and its effect on the immune system*. 27(3), 367–381.
- Pellera, F. M., & Gidaracos, E. (2018). Chemical pretreatment of lignocellulosic agroindustrial waste for methane production. *Waste Management*, 71, 689–703. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.04.038>
- Pimphor, K., & Roddecha, S. (2021). The optimization and comparison of the electrochemical performances for the polyaniline and melamine doping onto activated porous carbon material derived from pineapple leaf fiber as anode material for lithium-ion batteries. *Materials Today: Proceedings*, xxx, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.259>
- PULPA Y PAPEL I (En preparación). (2008). 52–56.
- Qaseem, M. F., Shaheen, H., & Wu, A. M. (2021). Cell wall hemicellulose for sustainable industrial utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 144(September 2020), 110996. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110996>
- Ramachandran, V., Ismail, F. S., Noor, M. J. M. M., Akhir, F. N. M. D., Othman, N., Zakaria, Z., & Hara, H. (2020). Extraction and intensive conversion of lignocellulose from oil palm solid waste into lignin monomer by the combination of hydrothermal pretreatment and biological treatment. *Bioresource Technology Reports*, 11(March). <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100456>
- Ramirez, Sandra; Reyes, M. (2017). *APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS LIGNOCELULÓSICOS DE LA ANANAS COMOSUS (PIÑA) PARA LA PRODUCCIÓN DE XILITOL POR HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA*.
- Rashtbari, Y., Hazrati, S., Afshin, S., Fazlzadeh, M., & Vosoughi, M. (2018). Data on cephalixin removal using powdered activated carbon (PPAC) derived from pomegranate peel. *Data in Brief*, 20, 1434–1439. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.08.204>
- Rojas-gonzález, C. A. F. (2008). *Use prospects of some agroindustrial waste* Introducción.
- Rojas, Liliana; Carol, Carabali; Clever, G. (2019). *La producción de piña en Colombia llegaría a 1,18 millones de toneladas al finalizar el año*.
- Rojas, L. F., Cortés, C. F., Zapata, P., & Jiménez, C. (2018). Extraction and identification of endopeptidases in convection dried papaya and pineapple residues: A methodological approach for application to higher scale. *Waste Management*, 78, 58–68. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.05.020>
- Roy, R., Rahman, M. S., & Raynie, D. E. (2020). Recent advances of greener pretreatment technologies of lignocellulose. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 3(October), 100035. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2020.100035>
- Salud, D. de. (2016). *ToxFAQs™ - Cobre (Copper)*.
- Sellaoui, L., Depci, T., Kul, A. R., Knani, S., & Ben Lamine, A. (2016). A new statistical physics model to interpret the binary adsorption isotherms of lead and zinc on activated carbon. *Journal of Molecular Liquids*, 214, 220–230. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2015.12.080>
- Sluiter, A., Hames, B., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, J., Templeton, D., & Nrel, D. C. (2012). *Determination of Structural Carbohydrates and Lignin in Biomass* Determination of Structural Carbohydrates and Lignin in Biomass. April 2008.
- Souza, C., Majuste, D., Dantas, M. S. S., & Ciminelli, V. S. T. (2018). Effect of zinc ion on copper speciation and adsorption on activated carbon. *Hydrometallurgy*, 176(October 2017), 78–86. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2018.01.012>
- Tecnológico, I., & Rica, D. E. C. (2019). *Teresita melissa fallas rojas 2019*.
- Tian, H., Pan, J., Zhu, D., Guo, Z., Yang, C., Xue, Y., Li, S., & Wang, Y. (2021). Innovative one-step preparation of activated carbon from low-rank coals activated with oxidized pellets. *Journal of Cleaner Production*, 313(March), 127877. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127877>
- Tutor Del Proyecto De Investigación: Econ. Luis Landy Campos. (2020). 148.
- Universidad, P., Bogotá, J., Ingeniería, F. De, & Geofísico, I. (2016). *CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS : IMPLICACIONES EN SALUD , AMBIENTE Y SEGURIDAD ALIMENTARIA* Heavy metals contamination : implications for health and food safety. 16, 66-77Universidad, P., Bogotá, J., Ingeniería, F. D.

- Vendrell-Puigmitja, L., Abril, M., Proia, L., Espinosa Angona, C., Ricart, M., Oatley-Radcliffe, D. L., Williams, P. M., Zanain, M., & Llenas, L. (2020). Assessing the effects of metal mining effluents on freshwater ecosystems using biofilm as an ecological indicator: Comparison between nanofiltration and nanofiltration with electrocoagulation treatment technologies. *Ecological Indicators*, *113*(October 2019). <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106213>
- Vidal, M. V, Suarez, A. R., Barrios, K. M., & Pérez, J. O. (2018). Potencial de residuos agroindustriales para la síntesis de Carbón Activado: una revisión. *Scientia et Technica*, *23*(3), 412–420. <https://doi.org/10.22517/23447214.17031>
- Wang, R., Zhang, L., Chen, Y., Zhang, S., Zhuang, T., Wang, L., Xu, M., Zhang, N., & Liu, S. (2020). Elevated non-essential metals and the disordered metabolism of essential metals are associated to abnormal pregnancy with spontaneous abortion. *Environment International*, *144*(April), 106061. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106061>
- Zhang, X., Yu, M., Li, Y., Cheng, F., Liu, Y., & Gao, M. (2021). Effectiveness of discarded cigarette butts derived carbonaceous adsorbent for heavy metals removal from water. *Microchemical Journal*, *168*(January), 106474. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2021.106474>