

CAPÍTULO I
MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1 Generalidades de los carbones activados.

El carbón activado es producto del tratamiento térmico de material carbonáceo que se obtiene de la naturaleza, el cual posee un área superficial alta pudiéndose multiplicar hasta 300 veces dicha área superficial desde su precursor, esto le permite atraer una gran cantidad de compuestos muy diversos, tanto en fase gaseosa como en disolución.

Esta propiedad es conocida como *adsorción* la cual es un proceso por el que los átomos en la superficie de un sólido, atraen y retienen moléculas de otros compuestos. Estas fuerzas de atracción son conocidas como *fuerzas de Van Der Waals*. Por lo tanto al ser un fenómeno que ocurre en la superficie mientras mayor área superficial disponible tenga un sólido, mejor adsorbente podrá ser.

1.2 Estructura y características del carbón activado.

El carbón activado puede llegar a tener hasta un 97% de carbono, además de hidrógeno, oxígeno, ceniza y a veces nitrógeno, estos porcentajes dependen del material de partida y del método utilizado para su obtención.

La estructura química está constituida por placas graníticas de carbono de forma irregular con espacios huecos, estos huecos son creados por el plegamiento de las placas graníticas y es lo que constituye la porosidad del carbón activado.

FIGURA 1-1

Representación esquemática de la estructura de un carbón activado.

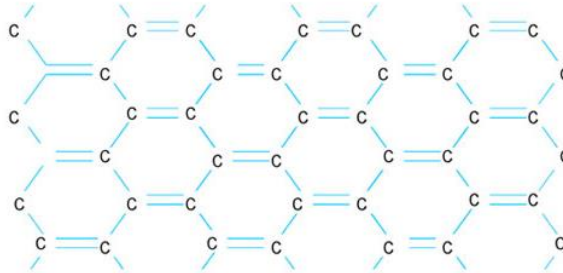


Fuente: Martínez de Yuso Ariza (2012).

En el caso del carbón activado, una placa granítica se representa en la siguiente figura.

FIGURA 1-2

Estructura química del carbón activado.



Fuente: <http://www.carbonactivo.com/introduccion.html> (2017).

1.3 Clasificación del carbón activado.

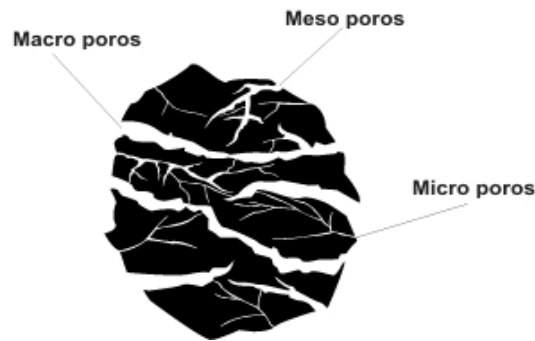
1.3.1 Clasificación según la distribución de sus poros.

Para clasificar un carbón activado basado en el radio de sus poros se presentan 3 grupos principales:

- Microporos ($r < 2$ nm).
- Mesoporos ($2 > r > 50$ nm).
- Macroporos ($r > 50$ nm).

FIGURA 1-3

Gránulo de carbón activado.



Fuente: Martínez de Yuso Ariza (2012).

1.3.1.1 Microporos

Son poros con un diámetro, menor que 2 nm y son los que más área proporcionan, alrededor del 95% del área superficial total del carbón activado. Son útiles para adsorber moléculas muy pequeñas que generalmente, se encuentran presentes en la purificación de gases.

1.3.1.2 Mesoporos

Están en el rango de (2 hasta 50) nm y aunque su contribución al área superficial total es menor que los microporos, aproximadamente 5 % (Bansal y Goyal, 2005); su tamaño les permite adsorber moléculas grandes que generalmente están presentes en la purificación de líquidos.

1.3.1.3 Macroporos

Los macroporos con un diámetro mayor que 50 nm apenas contribuyen al área total de un carbón, pero su importancia radica en que actúan como vías de acceso hacia los mesoporos y microporos, afectando la velocidad de difusión de las impurezas en el carbón activado.

1.3.2 Clasificación según el tamaño de la partícula.

Para esta clasificación los carbones activados se sitúan en dos grupos:

- Carbón activado en polvo (CAP).
- Carbón activado granular (CAG).

1.3.2.1 Carbón activado en polvo (CAP)

Los CAP presentan tamaños menores a 100 nm, siendo los tamaños típicos entre 15 nm y 25 nm.

1.3.2.2 Carbón activado granular (CAG)

Los CAG presentan un tamaño medio de partícula entre 1 mm y 5 mm a su vez pueden dividirse en dos categorías:

1. Carbón activado troceado (o sin forma)

Los carbones activados troceados se obtienen por molienda, tamizado y clasificación de briquetas de carbón o de trozos más grandes.

2. Carbón activado conformado (o con una forma específica, cilindros, discos, etc.).

Los carbones conformados pueden obtenerse por peletización o por extrusión de carbón en polvo mezclado con distintos tipos de aglomerantes.

1.4 Procesos de obtención del carbón activado.

Los procesos de obtención de carbón activado se pueden dividir en dos tipos:

- Activación física o térmica.
- Activación química.

1.4.1 Activación física del carbón activado.

Normalmente se lleva a cabo en dos etapas: la carbonización del precursor y la gasificación controlada del carbonizado. La carbonización es la transformación de la materia prima a carbón, en la cual se eliminan elementos como el hidrógeno y el oxígeno del precursor, para dar lugar a un esqueleto carbonoso con una estructura porosa rudimentaria. Este proceso se realiza en ausencia de oxígeno a temperaturas inferiores a 700°C.

En la activación (gasificación) del material sólido, este se expone a una atmósfera oxidante

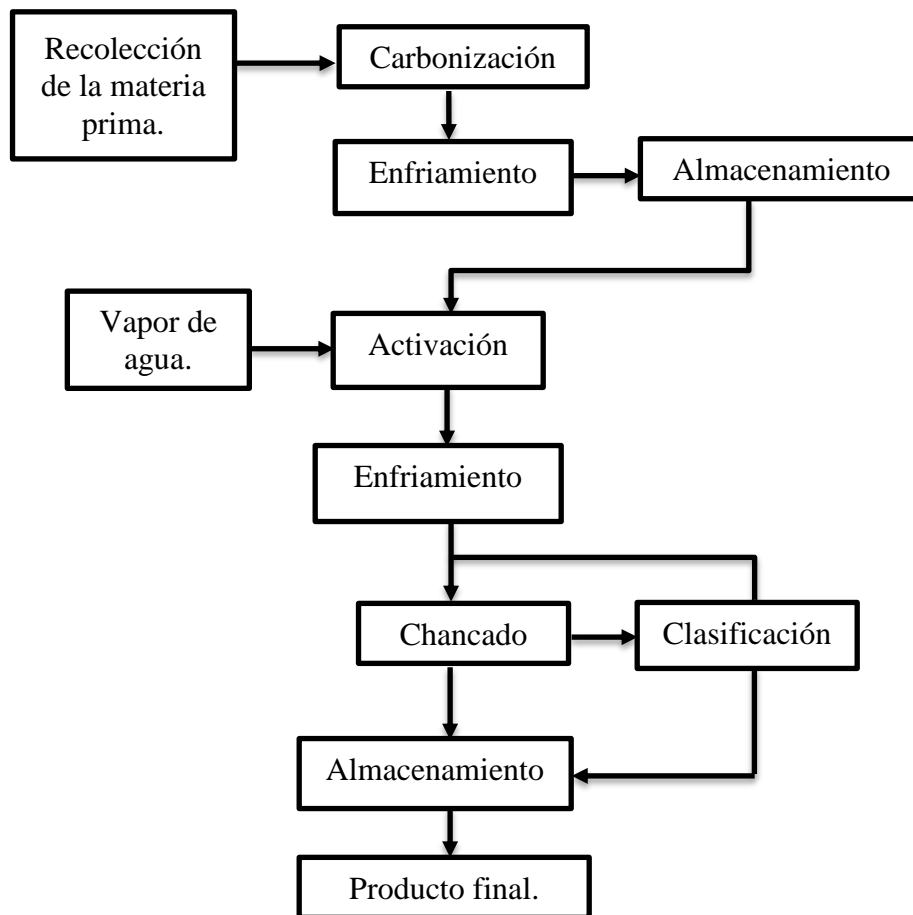
(Oxígeno, vapor de agua, dióxido de carbono, o una mezcla de éstos) a temperaturas entre 800°C y 1000°C, que elimina los productos volátiles, aumentando el volumen de poros y la superficie específica al oxidar parte de las moléculas de carbono. La activación es el proceso de oxidación lenta del carbón resultante por medio del cual se forman millones de poros microscópicos en la superficie del carbón.

La carbonización y la activación (gasificación) a escala industrial se realizan principalmente en hornos rotatorios construidos en acero inoxidable y materiales refractarios para soportar las altas temperaturas de activación, cercanas a 1000°C.

Cuando se utiliza como materia prima un material orgánico el proceso debe comenzar con la carbonización del material. Es en estos casos en el cual se debe optar por la fabricación de carbón activado mediante activación física. El siguiente diagrama muestra a las etapas involucradas en la obtención de carbón activado mediante activación física.

DIAGRAMA I-1

Diagrama de bloques del proceso de producción mediante activación física



Fuente: Elaboración propia.

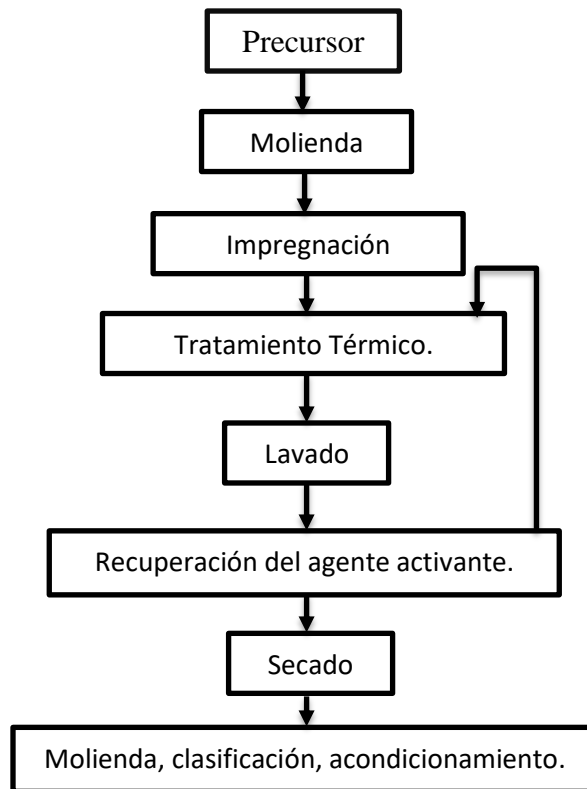
1.4.2 Activación química del carbón activado.

En este caso el precursor, normalmente un material lignocelulósico como madera, se impregna con un agente químico, preferentemente ácido fosfórico (aunque también

se puede utilizar cloruro de cinc), y el material impregnado se calienta en un horno a 500-700°C. Los agentes químicos utilizados reducen la formación de material volátil y alquitranes, aumentando el rendimiento en carbono. El carbón resultante se lava profundamente para eliminar los restos del agente químico usado en la impregnación. Adicionalmente, estos carbones pueden ser activados térmicamente por gasificación parcial con dióxido de carbono o vapor de agua para obtener carbones activados con elevadas áreas superficiales para aplicaciones como el almacenamiento de gas natural. El siguiente diagrama muestra a grandes rasgos las etapas involucradas en la obtención de carbón activado mediante activación química.

DIAGRAMA I-2

Diagrama de bloques del proceso de producción mediante activación química.



Fuente: Instituto Nacional del Carbón, España.

1.5 Ventajas y desventajas de los métodos de activación.

A continuación se mencionan una lista de ventajas y desventajas según el método de activación a emplear.

CUADRO I-1

Ventajas y desventajas de los métodos de activación

	ACTIVACIÓN FÍSICA	ACTIVACIÓN QUÍMICA
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> · Tiene bajos costos de operación de planta. · No utiliza reactivos químicos, por consiguiente tiene un impacto ambiental menor que el químico. 	<ul style="list-style-type: none"> · La temperatura de tratamiento es relativamente baja, menor a 700 °C. · El carbón activado se obtiene en una sola etapa de conversión. · Gran parte del agente activante se pueden recuperar. · Los costos de maquinaria de activación son relativamente menores. · Tiene bajo costo energético.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> · La temperatura media de activación es elevada, mayor a 900°C. · Requiere de doble etapa para convertir materia prima (madera) en carbón activado. · Tiene costo energético elevado. · Tiene costo elevado en capital de trabajo (equipo de activación). 	<ul style="list-style-type: none"> · Tiene mayor costo de operación durante la activación. · Utiliza reactivos químicos que pueden ser contaminantes o corrosivos.

Fuente: Elaboración propia.

1.6 Descripción del mecanismo de adsorción.

En la adsorción los átomos y las moléculas se mantienen juntos en un sólido (carbón activado) por fuerzas de cohesión llamadas; fuerzas débiles de atracción de Van Der Waals.

Si bien la adsorción es vista como un fenómeno de superficie y es bien comprendido como un concepto significativo, subconscientemente pensamos en la superficie como el exterior de una sustancia material.

Sin embargo, al referirse al carbón activado la superficie del material es el límite donde la masa de un cuerpo termina y la masa de otro empieza, ya que la estructura del carbón activado permite que la adsorción ocurra en las múltiples capas gráficas del carbón activado (Ver: FIGURA 1-1).

Considerando un sólido inmerso en un líquido, allí la superficie del líquido y la región encerrada por esas dos superficies es una interfase. En vista de esto es posible desafortunadamente que nosotros nos refiramos a la adsorción que ocurre sobre una superficie.

Las moléculas en fase de gas o de líquido son unidas física o químicamente a la superficie de carbón activado. El proceso de la adsorción ocurre en tres pasos:

- Macrotransporte: Movimiento del material orgánico a través del sistema de macroporos del carbón activado.
- Mesotransporte: Movimiento del material orgánico a través del sistema de mesoporos del carbón activado.
- Microtransporte: Movimiento del material orgánico a través del sistema de microporos del carbón activado.

El nivel de actividad de la adsorción depende de la concentración de la sustancia en el agua, la temperatura y la polaridad de la sustancia. Una sustancia polar (soluble en agua) no puede ser eliminada o es malamente eliminada por el carbón activado, una sustancia no polar puede ser totalmente eliminada por el carbón activado.

1.6.1 Tipos de adsorción.

Existen 2 tipos de adsorción en función de las fuerzas intermoleculares presentes tales como: la fisisorción y la quimisorción.

1.6.1.1 Fisisorción o adsorción física.

En la fisisorción las moléculas del adsorbato se mantienen unidas en la superficie del sólido; por medio de las fuerzas intermoleculares de van der Waals, o sea, son similares a las fuerzas de cohesión y están involucradas en la condensación de vapores en líquidos. Los principales aspectos que caracterizan la fisisorción son los siguientes:

- Entalpías de adsorción desde (-4 hasta -40) kJ/mol-1.
- Solo se aprecia a temperaturas inferiores a la de ebullición de la sustancia adsorbida.
- La cantidad de la adsorción sobre una superficie depende más de la sustancia que se adsorbe, que del adsorbente.
- No se aprecia energía de activación de adsorción.
- Se forman capas múltiples adsorbidas.
- No es específica.

1.6.1.2 Quimisorción o adsorción química.

En la quimisorción se produce una reacción química entre el adsorbato y la superficie del adsorbente; originándose enlaces relativamente fuertes, que conducen a procesos irreversibles.

Este tipo de adsorción se caracteriza por:

- Entalpías de adsorción que van desde (-40 hasta -800) kJ/mol.
- Se observa a temperaturas elevadas.
- La cantidad de adsorción sobre una superficie depende, tanto de la sustancia que se adsorbe, como del adsorbente.
- Se manifiesta energía de activación de adsorción.

- La adsorción da lugar a lo sumo a una monocapa.
- Es específica.

1.6.2 Parámetros de adsorción del carbón activado.

Los siguientes parámetros influyen en la capacidad de adsorción del carbón activado:

- Área de la superficie.
- Tamaño de los poros.
- Tamaño de partículas.
- Temperatura.
- Concentración del adsorbato.
- pH.
- Tiempo de contacto.

Área de la superficie: La capacidad de adsorción es proporcional al área de la superficie.

Tamaño de los poros: La correcta distribución de los tamaños de poros es necesaria para facilitar el proceso de adsorción proveyendo sitios de adsorción y apropiados canales para transportar el adsorbato.

Tamaño de partículas: Partículas más pequeñas entregan mayores radios de adsorción. El área total de la superficie es determinada por el grado de activación y la estructura de los poros y no del tamaño de las partículas

Temperatura: Temperaturas menores incrementan la capacidad de adsorción excepto en el caso de líquidos viscosos.

Concentración del adsorbato: La capacidad de adsorción es proporcional a la concentración del adsorbato.

pH: La capacidad de adsorción se incrementa bajo condiciones de pH, los cuales disminuyen la solubilidad del adsorbato (normalmente a menor pH)

Tiempo de contacto: Un suficiente tiempo de contacto es requerido para alcanzar el equilibrio de adsorción y para maximizar la eficiencia de adsorción.

1.7 Índices Asociados a los Carbones Activados.

Los niveles de adsorción de un carbón activado pueden ser medidos mediante los siguientes índices:

Índice de yodo.

- Es el parámetro usado para caracterizar el funcionamiento del carbón activado.
- Medida del nivel de actividad (números más grandes indican mayor grado de activación).
- Medida del contenido del microporo.
- Equivalente al área de superficie del carbón activado en m^2/g .
- Medida estándar para aplicaciones en fase líquida.

Índice azul de metileno.

- Medida de la estructura de mesoporos.
- Determina el porcentaje de adsorción de sustancias que dan color a otra sustancia en fase líquida.
- Al determinar los mesoporos, este índice permite analizar la capacidad del adsorbente para remover sustancias indeseadas en fase líquida, principalmente contaminantes de le dan color a una sustancia en fase líquida.

Índice de melaza.

- Medida de la estructura de macroporos.
- Importante para la decoloración.

Área de la superficie.

- Medida de la capacidad de adsorción. La razón tamaño de los poros/volumen del poro es también importante para determinar el funcionamiento.

Densidad aparente.

- Densidades mayores entregan un mejor volumen de actividad y normalmente indica carbones activados de mejor calidad.

Tamaño de partículas.

- Tamaños menores proveen radios de adsorción más rápidos el cual reduce la cantidad de tiempo de contacto requerida.

Dureza

- Medida de la resistencia al agotamiento de los carbones activados.
- Indicador importante para mantener su integridad física, mantener las fuerzas friccionales impuestos por repercusiones, etc.

Contenido de ceniza.

- Reduce toda la actividad del carbón activado.
- Reduce la eficiencia de reactivación.

1.8 Regeneración del carbón activado.

La viabilidad económica de la aplicación del carbón activado depende de la existencia de un medio eficaz para su regeneración y recuperación, una vez agotada su capacidad de adsorción. El carbón activo granular se regenera fácilmente por oxidación de la materia orgánica y su posterior eliminación de la superficie del carbón en un horno. En este proceso se destruye parte del carbón, entre un 5 y un 10%, y es necesario reemplazarlo por carbón nuevo o virgen. Es conveniente aclarar que la capacidad de adsorción del carbón regenerado es ligeramente inferior a la del carbón virgen, también en algunos casos puede que un pequeño porcentaje del material absorbido continúe presente en el carbón activado aun después de su regeneración.

1.9 Usos principales del carbón activado.

Las principales aplicaciones del carbón activado se detallan en el CUADRO AII-1. (Ver: ANEXO II).

Gonzales & Teruya (2004), señalan que en la práctica, ningún tipo de carbón tiene capacidad para diferentes usos: dos carbones activados pueden contener el mismo porcentaje de carbón activo, uno puede ser valioso como adsorbentes de gases, mientras que el otro es adecuado como un medio decolorante de azúcar, pero ambos

llegan a ser casi inútiles cuando se intenta intercambiar sus aplicaciones. Aunque, para facilitar la comercialización, se suele agrupar por criterios similares de uso; se toma como referencia si el carbón es granular o en polvo, de activación física o activación química.

Así por ejemplo, el carbón activado en polvo, se le utiliza para la adsorción en fases líquidas para la decoloración de líquidos y refinación de azúcar, purificación de agua, clarificador de disolventes, recuperación de caucho, etc.

En cambio, el carbón activado para fases gaseosas se lo asocia al carbón granular y denso, obtenido a partir de cáscara de coco, turba, carbón mineral y residuos de petróleo, se aplican para recuperación de disolventes volátiles, purificación y separación de gases, también para aplicaciones catalíticas en la industria química.

TABLA I-1

Rangos típicos de tamaño de carbón activado granular y en polvo para distintas aplicaciones.

Aplicación	Granulometrías
Tratamiento de agua y de líquidos en general, a nivel industrial municipal.	8x30, 12x40, 14x30, 14x40
Purificadores de agua caseros.	12x40, 14x40, 20x50
Acondicionamiento de aire, purificación de gases (como: CO ₂ , He, acetileno), recuperación de vapores de solventes, campanas de cocina.	4x6, 4x8, 4x10
Mascarillas de gases.	12x20
Recuperación de oro.	6x12, 6x16, 8x16, 10x20
Boquillas de cigarrros.	8x14, 12x20, 20x50

Fuente: Gonzales & Teruya (2004).

Mancilla (1982), indica que los carbones activados se pueden clasificar en cuatro grupos. La primera y quizá la más significativa, es la distribución de tamaños de poro, que permite la clasificación:

- Carbones para adsorción en fase gaseosa.
- Carbones para adsorción en fase líquida.

En el primer tipo se incluyen aquellos con estructura esencialmente microporosa, presentando una ausencia total de mesoporos. En el segundo grupo se encuentran aquellos cuyo porcentaje de mesoporos es comparable al de micro y macroporos, siendo, por tanto, capaces de adsorber moléculas de tamaño relativamente grande.

La segunda que se indica es la del tamaño de partículas en función de la cual se pueden clasificar en:

- Carbones activados granulares.
- Carbones activados en polvo.

Combinando los cuatro grupos mencionados se obtienen sólo tres tipos de carbones activados con aplicación industrial.

Así pues, se pueden establecer los siguientes tres grupos para el estudio de las aplicaciones de los carbones activados:

- Carbones activados granulares para fase gaseosa.
- Carbones activados granulares para fase líquida.
- Carbones activados en polvo para fase líquida.

Hasta ahora solamente se han considerado las propiedades de adsorción. Sin embargo, existen otra serie de características que los habilitan para otro tipo de procesos, las cuales, en definitiva, están relacionadas con su gran superficie específica.

a) Carbones activados granulares para fase gaseosa.- En primer lugar destaca su aplicación en la recuperación de disolventes. Así, en muchas industrias en las que se

han de dar formas específicas a los materiales que éstas elaboran, tal como plásticos, fibras, etc., para conseguirlo se emplean soluciones o geles de tales productos en disolventes orgánicos; posteriormente se eliminan los disolventes por tratamiento con aire o vapor, obteniéndose unas corrientes en estado muy diluido, siendo preciso para la economía del proceso la recuperación de los disolventes. Hoy por hoy, resulta más ventajoso el tratamiento con carbón activado, que supera en eficacia a la absorción y condensación.

Esta característica (alta efectividad a bajas concentraciones) los hace utilizables en acondicionamiento de aire, donde haya productos indeseables en bajas concentraciones. Así, se utilizan para eliminar olores, para mantener por debajo de los límites explosivos mezclas de aire con sustancias orgánicas.

Otra aplicación importante es en respiradores, máscaras antigás, aunque en este caso se precisa de un acondicionamiento del carbón activado. Se impregna con óxidos de cobre, cinc, plata (Hormats y col., 1951; Patente alemana, 1956) que catalizan diversas reacciones aumentando la efectividad de los filtros. Combinándose la retención de los compuestos con la reacción química.

b) Carbones activados para adsorción de fase líquida.- La adsorción de fase líquida es, quizá, el campo más importante de aplicación de los carbones activados. Se utiliza en muchas industrias, pero el proceso que más auge está teniendo en los últimos años es el tratamiento de aguas residuales con diversos usos.

Se utiliza ampliamente en el acondicionamiento de vinos, licores y cervezas. Elimina sabores y olores indeseables producidos por un gran número de sustancias, todas ellas en bajas concentraciones. Sin embargo, hay que ajustar muy bien las dosis, ya que un tratamiento excesivo disminuiría considerablemente la calidad de los productos.

Se requieren carbones con una cierta selectividad.

El origen del desarrollo industrial de los carbones activados se encuentra en la industria azucarera, donde se sigue utilizando ampliamente, tanto en la industria del azúcar de caña como de remolacha.

1.10 Materia prima: bagazo de caña de azúcar.

El bagazo de caña de azúcar es un material lignocelulósico constituido principalmente por celulosa, hemicelulosa ligadas fuertemente a la lignina, que tiene en su composición como promedio un 20% de lignina, y 80% entre celulosa y hemicelulosa.

El bagazo completo está integrado por tres componentes principales:

- El recubrimiento, en el que se incluye la epidermis, la corteza y el periciclo.
- Los mazos de fibra vascular, entre los que figuran las células conductoras de pared delgada asociadas con fibras de pared relativamente con estrecho lumen.
- El tejido básico (parénquima) o médula, con mazos de fibra distribuidos irregularmente.

1.10.1 Disponibilidad del bagazo de caña de azúcar.

El rendimiento de caña de azúcar cosechada en la región es de 50 a 51 toneladas por hectárea.

Prácticamente toda la producción de caña de azúcar cultivada en el municipio de Bermejo es vendida al Ingenio Azucarero de Bermejo (IABSA) para su industrialización y obtención de azúcar procesada y alcohol, aunque también existe caña de azúcar que es rechazada por el ingenio azucarero de Bermejo, si es que no cumplen con los requerimientos que se necesitan para el proceso de obtención de azúcar procesada.

CUADRO I-2

Producción de la oferta de caña de azúcar en la región de Bermejo.

Periodo	Caña molida (TM./caña)	Caña rechazada (TM./caña)	% bagazo de caña de azúcar.	Bagazo de caña de azúcar TM./caña.	% Humedad del bagazo.
2006	548315.66	844	32	175461.011	51
2007	526269.55	246	33	173668.952	51.8
2008	474847.23	1750.59	32.8	155749.891	51.7
2009	515534.87	2547.74	31.7	163424.554	51.2
2010	407570.46	560.46	30.7	125124.131	51.6
2011	536259.4	1185.99	31	166240.414	52
2012	559072.85	1062.63	31	173312.584	50.5
2013	374610.22	5192.23	39	146097.986	53

Fuente: Información proporcionada por IABSA (Julio, 2017).

Durante la extracción de jugo alrededor del 32%, de la caña de azúcar procesada, se transforma en bagazo, el cual posee en promedio 51% de humedad a la salida del proceso.

En los ingenios azucareros de Bolivia el uso principal que se le está dando al bagazo, es el de la quema directa en los hornos de cada ingenio para la producción de vapor de agua en los calderos y está contribuyendo con el 80% de la cantidad de calor producido en ellos en época de zafra, en cambio los hidrocarburos sólo contribuyen con el 18.5% y la leña con el 1.5%.

En IABSA alrededor del 85% del total del bagazo es utilizado para la quema directa, el restante o excedente 15% es vendido generalmente como follaje con un precio de alrededor de 100 bs por tonelada.

1.10.2 Ubicación de IABSA.

Las Industrias Agrícolas de Bermejo S.A. - IABSA, es el principal Ingenio Azucarero de Tarija, se encuentra a 190 kilómetros de la ciudad Capital. Ubicada en la localidad del mismo nombre, Bermejo, fronteriza con Argentina, provee de azúcar al sur de Bolivia y es generadora de una inusitada actividad y empleo en la región chapaca donde está ubicada. Directa e indirectamente emplea alrededor de 12 mil personas entre zafreros, cañeros, cargadores, transportistas, comerciantes, sin contar toda la gama del rubro de gastronomía, según informó el Presidente del Ingenio azucarero Pastor Ferreira Tórrez.

CAPÍTULO II

PROCEDIMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

CAPÍTULO II

PROCEDIMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

2.1 Selección del proceso de obtención del carbón activado.

La activación química y activación física (Ver: 1.4 Procesos de obtención del carbón activado) son procesos térmicos con diferentes cualidades, ventajas y desventajas cuya finalidad en común es la obtención de carbón activado.

En un principio se planteó llevar a cabo el procedimiento de activación física, por ello se construyó un pequeño reactor de acero inoxidable. (Ver: ANEXO III).

Se elaboró el diseño factorial del proceso de activación física y se intentó llevar a cabo la obtención bajo ciertas medidas de seguridad, pero el proceso de activación física no fue exitoso, la descripción de estos inconvenientes y sucesos están descritos en otro apartado. (Ver: ANEXO IV).

Por esto sólo se llevó a cabo el proceso de activación química.

2.2 Diseño factorial del proceso de obtención del carbón activado

2.2.1 Planteamiento del problema.

Bajo la revisión bibliográfica de trabajos relacionados a la obtención de carbón activado se determinan los factores involucrados en la activación química. A continuación se muestra una tabla donde se aprecian los distintos factores involucrados del proceso de obtención mediante la activación química del bagazo de caña de azúcar además de otras materias primas a fin de tener una base de comparación.

TABLA II-1

Factores evaluados en el proceso de activación química.

Material de	Activante utilizado	Activación	Autor
--------------------	----------------------------	-------------------	--------------

partida			Compuesto químico.	Concentración (p/v).	Temperatura (°C).	Tiempo (Minutos).	(es)
BCA*	12	3	Ácido Fosfórico	41	300 - 600	60 - 180	[15]
BCA*	No se indica	15	Ácido fosfórico, ácido sulfúrico, cloruro de zinc	Relación 10-1 10-2 1-1 10-1	450	30	[25]
BCA*, cascara de naranja y cascarilla de café	16	No se indica	Ácido fosfórico	20, 40, 85	500	60	[4]
BCA* y zuro de maíz	28.5	10	Ácido fosfórico	21	450	120	[6]
Cascara de almendra	24	3 - 15	Cloruro de zinc	10 - 52	400 - 700	80 - 480	[20]
Cuesco de palmiste	8	No se indica	Cloruro de zinc	40, 50, 60	450 - 600	60 - 180	[17]
Residuos de madera; caoba, cedro y pino	1 + agitación	2 - 10	Ácido clorhídrico, ácido sulfúrico, cloruro de calcio y cloruro de zinc	5, 10, 15, 20	400 - 700	60	[14]
Cascara de almendra	No se indica	No se indica	Ácido fosfórico	85	400 - 800	30 - 120	[28]
Pino pátula, chingalé, pino tecunuma-ni y roble	48	No se indica	Ácido fosfórico	85	400 - 500	30 - 60	[36]
Cascara de algarrobo	6 - 12	No se indica	Ácido fosfórico	49 - 73	500 - 600	60	[19]
Zuro de		No se	Cloruro de	20	200 -	120	[24]

maíz	72	indica	zinc		600	- 300	
Residuos de piña: cascara y corona	16	No se indica	Ácido fosfórico	85	500 - 600	60	[32]
Cascara de coco (carbonizado)	No se indica	No se indica	Tratamiento con hidróxido de sodio	1 mol/L	900	60	[21]

Fuente: Elaboración propia. BCA*: Bagazo de caña de azúcar.

Con la construcción de esta tabla se determina lo siguiente:

- 1) Que el activante empleado sea el ácido fosfórico (H_3PO_4). Martínez de Yuso Ariza, A. (2012) [28], señala que el H_3PO_4 , como agente activante de materiales lignocelulósicos, aumenta el volumen de microporos, pero también permite el desarrollo de los demás tamaños de poro de una forma proporcional, lo que produce carbones activados con diferentes volúmenes de microporo pero con una misma distribución de la microporosidad.
El uso de H_3PO_4 como agente activante permite obtener carbones activados con altas capacidades de retención para compuestos orgánicos volátiles, superiores a las que se consiguen empleando otros agentes activantes.
Con relación al cloruro de zinc ($ZnCl_2$) es empleado para materias primas con una densidad más alta con relación al bagazo de caña de azúcar, la bibliografía consultada también indica que su uso está en declive debido a la contaminación que puede resultar de su mal manejo a escala industrial y que el costo del mismo es mayor que el de otros activantes.
- 2) Que se utilice la fracción más fina del bagazo de caña de azúcar, es decir, la que presenta menor tamaño gravimétrico con relación al total de la masa del bagazo de caña de azúcar, debido a que se favorece la impregnación del ácido fosfórico.
- 3) El tiempo de impregnación entre el bagazo de caña de azúcar y el ácido fosfórico sea de 24 horas.

- 4) Que las variables de importancia a tomar en cuenta sean la temperatura de activación y la concentración del activante.
- 5) Que la relación entre el activante diluido y el bagazo de caña de azúcar sea de 2:1, es decir; 2 ml de disolución de H_3PO_4 por 1 gramo de bagazo de caña de azúcar.
- 6) El tiempo de activación sea de 40 minutos para cada una de las muestras, ya que tomando en cuenta el tiempo de calentamiento y enfriamiento dentro del horno eléctrico, se tiene un tiempo suficiente para que ocurra la reacción de activación.

2.2.2 Factores y dominio experimental.

Los factores escogidos por el experimentador y su dominio experimental se muestran en la TABLA II-1. El dominio experimental de un factor continuo se expresa con los valores mínimo, medio y máximo que puede tomar, y se asigna la notación codificada: **1** al nivel inferior, **2** al nivel medio y **3** al nivel superior (1, 2 y 3 para simplificar).

TABLA II-2

Factores y dominio experimental para la etapa de activación.

Factores	Dominio experimental.		
	Nivel (1)	Nivel (2)	Nivel (3)
A: temperatura (°C)	350	450	550
B: Concentración (%)	10	30	60

Fuente: Elaboración propia.

2.2.3 Matriz de experimentos para la etapa de activación: el diseño factorial completo 3^2

Con los factores y niveles seleccionados para esta etapa se realiza la matriz correspondiente.

TABLA II-3

Matriz de experimentos de un diseño factorial completo 3^2 , plan de experimentación

Prueba	Matriz de experimentos.		Plan de experimentación.	
	A ₁	B ₂	Temperatura (°C)	Concentración (%)
1	a ₁	b ₁	350	10
2	a ₂	b ₁	450	10
3	a ₃	b ₁	550	10
4	a ₁	b ₂	350	30
5	a ₂	b ₂	450	30
6	a ₃	b ₂	550	30
7	a ₁	b ₃	350	60
8	a ₂	b ₃	450	60
9	a ₃	b ₃	550	60

Fuente: Elaboración propia.

A partir de este punto se le da una codificación a las muestras para la obtención del carbón activado.

TABLA II-4

Codificación de los experimentos de obtención del carbón activado.

Muestra	Temperatura (°C)	Concentración (%)
T350C10	350	10
T350C30	350	30
T350C60	350	60
T450C10	450	10
T450C30	450	30
T450C60	450	60
T550C10	550	10
T550C30	550	30
T550C60	550	60

Fuente: Elaboración propia.

También se realizaron otras 3 pruebas adicionales en las cuales no se utilizó el activante (H_3PO_4), para verificar y/o justificar las características de los carbones activados con el empleo del activante, con la siguiente codificación.

TABLA II-5

Codificación de los experimentos sin uso de ácido fosfórico.

Muestra	Temperatura (°C)	Concentración (%)	Fracción de BCA*
T450C0	450	0	Fracción fina
T450C0-0	450	0	Fracción gruesa
T550C0	550	0	Fracción fina

Fuente: Elaboración propia. BCA*: Bagazo de caña de azúcar.

La codificación **T450C0** y **T550C0** indica que las pruebas se realizaron con la fracción más fina del bagazo de caña de azúcar.

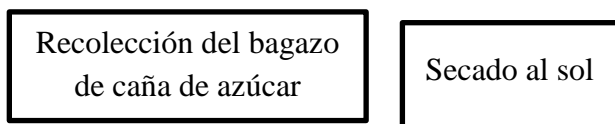
La codificación **T450C0-0** indica que las pruebas se realizaron con la fracción más gruesa del bagazo de caña de azúcar.

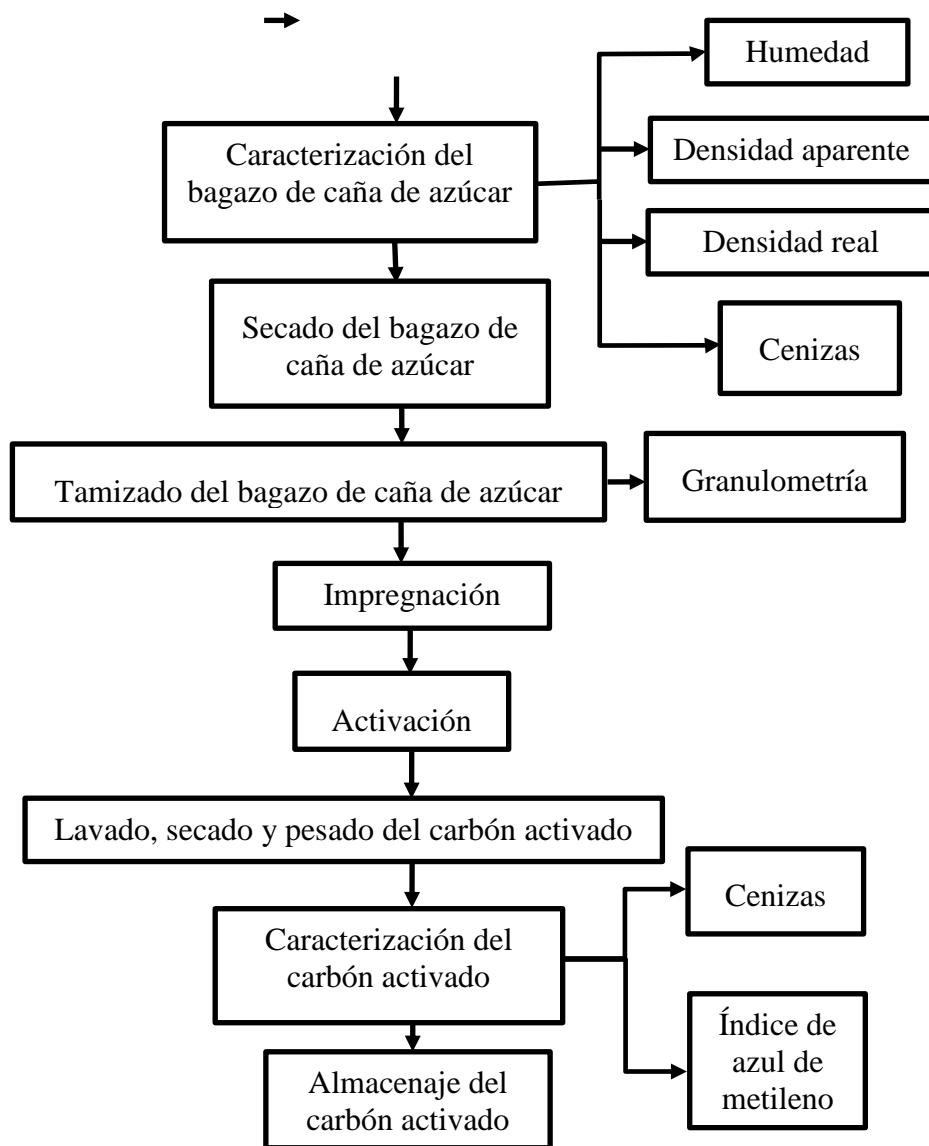
2.3 Descripción del proceso de obtención del carbón activado.

El siguiente diagrama de bloques describe de forma general el proceso de obtención realizado.

DIAGRAMA II-1

Diagrama de bloques del proceso de obtención del carbón activado.





Fuente: Elaboración propia.

2.3.1 Recolección del bagazo de caña de azúcar.

Se recolecto una cantidad abundante de bagazo de caña de azúcar de IABSA.

FOTO II-1

Sección del patio de acopio del bagazo de caña de azúcar en IABSA.



Fuente: Propio. En fecha: Octubre del 2016.

El cual fue transportado desde la ciudad de Bermejo hasta la ciudad de Tarija.

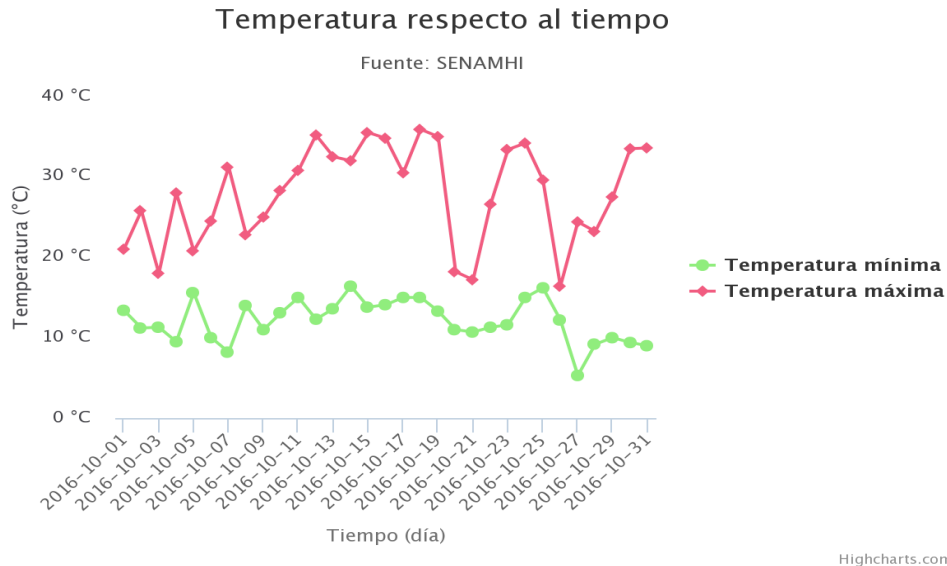
2.3.2 Secado al sol

El bagazo de caña de azúcar se secó al sol por un lapso de dos semanas.

Los días en los que se realizó el secado del bagazo de caña de azúcar fueron desde el 15 al 30 de octubre del 2016, donde la temperatura máxima promedio fue de 28.50°C y la temperatura mínima promedio de 12.07°C.

FIGURA 2-1

Temperaturas de Tarija-Bolivia durante el secado al sol del bagazo de caña de azúcar.



Fuente: www.senamhi.gob.bo

2.3.4 Caracterización del bagazo de caña de azúcar.

Se pudo determinar los siguientes parámetros:

- Humedad.
- Densidad real.
- Densidad aparente.
- Cenizas.
- Granulometría.

Los cálculos para cada análisis (si lo ameritan) se encuentran en el ANEXO V.

2.3.4.1 Análisis de contenido de humedad.

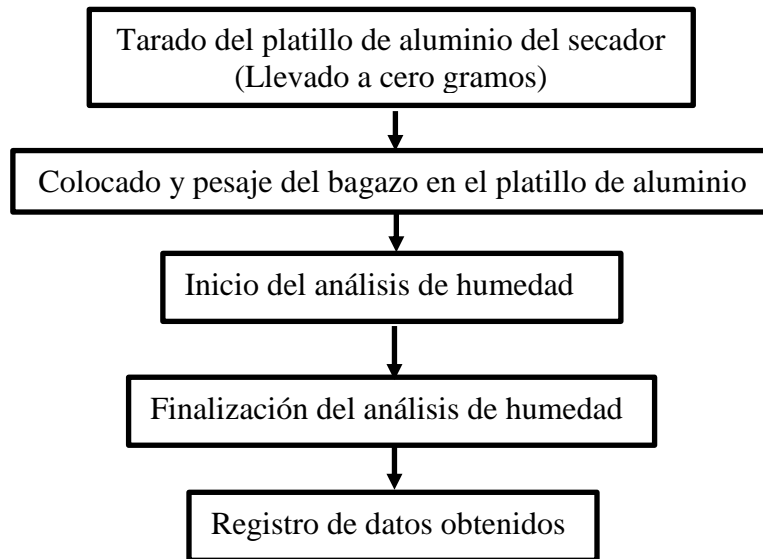
El análisis de humedad se realizó en el secador de infrarrojos Sartorius perteneciente al Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU), a una temperatura de 105°C.

El análisis se realizó por triplicado.

El procedimiento se describe en el siguiente diagrama de bloques.

DIAGRAMA II-2

Procedimiento de la determinación del contenido de humedad.



Fuente: Elaboración propia.

FOTO II-2

Realización del ensayo de contenido de humedad del bagazo de caña de azúcar.



Fuente: Propio. En fecha: Noviembre del 2016.

2.3.4.2 Determinación de la densidad aparente.

Se utilizó una probeta (seca y limpia) de 50 ml y una balanza analítica.

El análisis se realizó por triplicado.

FOTO II-3

Realización de los ensayos de la densidad aparente del bagazo de caña de azúcar.

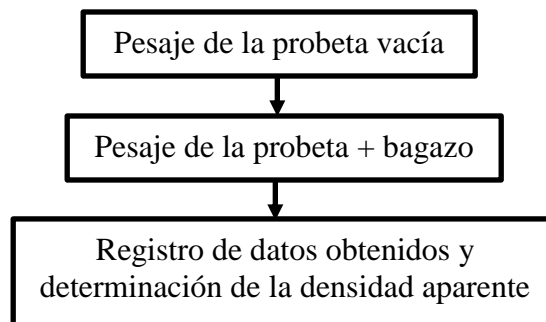


Fuente: Propio. En fecha: Noviembre del 2016.

El procedimiento se describe en el siguiente diagrama de bloques.

DIAGRAMA II-3

Procedimiento de la determinación de la densidad aparente.



Fuente: Elaboración propia.

2.3.4.3 Determinación de la densidad real (Método picnómetro).

Se empleó un picnómetro de tipo Weld con tapón capilar de una capacidad 50 ml, una balanza analítica, capsula de vidrio y agua destilada a 20°C (d: 0.99829 gr/ml).

El análisis se realizó por triplicado.

Se pesa el picnómetro vacío, se coloca la muestra de bagazo en su interior y llena de agua destilada y nuevamente se pesa.

Posteriormente se pesa el picnómetro solamente con agua destilada.

FOTO II-4

Realización de los ensayos de la densidad real del bagazo de caña de azúcar.

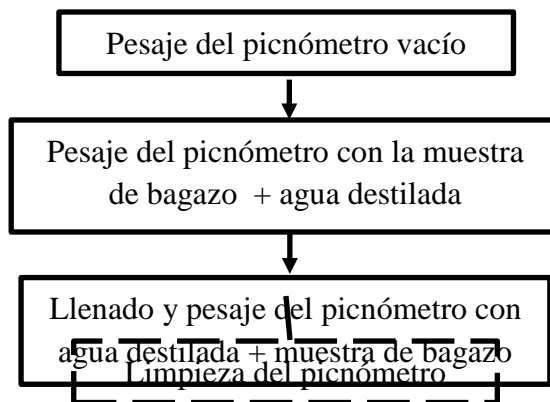


Fuente: Propio. En fecha: Noviembre del 2016.

El procedimiento se describe en el siguiente diagrama de bloques.

DIAGRAMA II-4

Procedimiento de la determinación de la densidad real.



↓

Llenado y pesaje del picnómetro sólo con agua destilada

Fuente: Elaboración propia.

2.3.4.4 Determinación del contenido de cenizas.

Para el análisis del contenido de cenizas del bagazo de caña de azúcar se recurrió al laboratorio del CEANID, para esto se llevó una muestra de alrededor de 50 gramos en un frasco de plástico con tapa de la fracción más gruesa del bagazo de caña de azúcar.

También se realizó un análisis propio con la fracción más fina del bagazo de caña de azúcar, siguiendo el mismo procedimiento del contenido de cenizas del carbón activado (2.3.10.1 Determinación del contenido de cenizas).

2.3.5 Secado del bagazo de caña de azúcar.

El secado se realizó en un secador de bandejas (Marca: J. P. Selecta. De 2000w de potencia), perteneciente al LOU (Laboratorio de Operaciones Unitarias) de la carrera de Ingeniería Química.

FOTO II-5

Secado del bagazo de caña de azúcar en el secador de bandejas.



Fuente: Propio. En fecha: Noviembre del 2016.

Procedimiento

El procedimiento fue el siguiente:

- Se colocó el bagazo de caña de azúcar en bandejas metálicas de 30 x 40 cm, de forma que el bagazo de caña de azúcar se encontraba con un espesor o altura de llenado de 5 cm aproximadamente.
- Se realizó el secado a una temperatura de 105°C.
- El tiempo de secado fue de una hora.

2.3.6 Tamizado del bagazo de caña de azúcar.

Dada la variedad de tamaños y volumen del bagazo de caña, el proceso de tamizado se realizó de manera manual.

FOTO II-6

Realización del análisis granulométrico del bagazo de caña de azúcar.



Fuente: Propio. En fecha: Noviembre del 2016.

El proceso de tamizado se realizó con los tamices de 4 m/m y 5 m/m de norma española.

Procedimiento

El procedimiento fue el siguiente:

- Se colocó el bagazo seco en el tamiz de 5 m/m y se procedió al tamizado manual con agitación constante aproximadamente durante 30 segundos.

- Al finalizar el bagazo retenido en el tamiz de 5 m/m se guardó en una bolsa plástica y el bagazo que paso el tamiz se volvió a colocar ahora en el tamiz de 4 m/m y realizo el tamizado manual de igual forma.
- Se repitieron ambos procedimientos hasta tamizar todo el bagazo disponible y se pesó el bagazo retenido por cada tamiz de forma aproximada.

2.3.7 Impregnación

Para el proceso de impregnación se empleó ácido fosfórico al 85% de concentración. Se utilizó la fracción más fina del bagazo, puesto que por su tamaño es más rápida y fácil la absorción del ácido diluido a la estructura porosa del bagazo de caña de azúcar. Este método consiste en adicionar lentamente sobre una muestra de bagazo de caña de azúcar un volumen de disolución de ácido fosfórico, de tal forma que la disolución es embebida por capilaridad hacia los poros del bagazo y dejada reposar por 24 horas a temperatura ambiente.

FOTO II-7

Impregnación del ácido diluido con el bagazo de caña de azúcar.

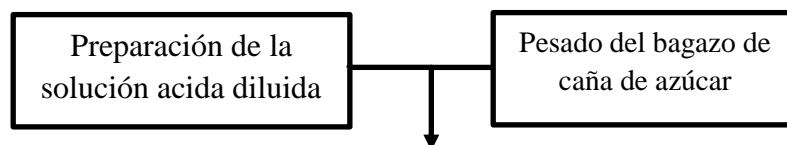


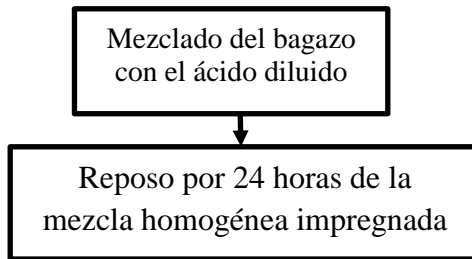
Fuente: Propio. En fecha: Abril del 2017.

El procedimiento se describe en el siguiente diagrama de bloques.

DIAGRAMA II-5

Procedimiento de impregnación del bagazo de caña de azúcar.





Fuente: Elaboración propia.

2.3.8 Activación

Para el proceso de activación se utilizó un reactor de acero inoxidable y una mufla eléctrica perteneciente al laboratorio de química de la UAJMS.

El proceso comenzó con la mufla a temperatura ambiente, se colocó el reactor de acero inoxidable y se encendió hasta que alcance la temperatura de activación, la velocidad de calentamiento promedio de la mufla fue de $8.68^{\circ}\text{C}/\text{min}$ y estuvo así por espacio de 40 minutos posterior a esto se dejó enfriar a temperatura ambiente.

FOTO II-8

Realización de las pruebas de activación del bagazo de caña de azúcar.

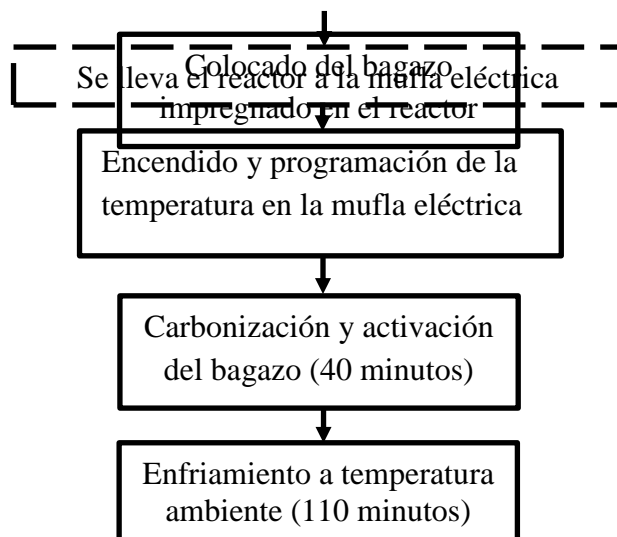


Fuente: Propio. En fecha: Mayo del 2017.

El procedimiento se describe en el siguiente diagrama de bloques.

DIAGRAMA II-6

Procedimiento de carbonización y activación.



Fuente: Elaboración propia.

2.3.9 Lavado, secado y pesaje del carbón activado.

El lavado consiste en la remoción del ácido diluido impregnado y alquitrán residual en el carbón activado con agua destilada a una temperatura determinada.

En un vaso de precipitados, al carbón activado se le adiciono agua destilada en una relación aproximada de 1:25 (Por cada gramo de carbón activado se adicionó 25 ml de agua destilada).

FOTO II-9

Realización del lavado y secado del carbón activado.

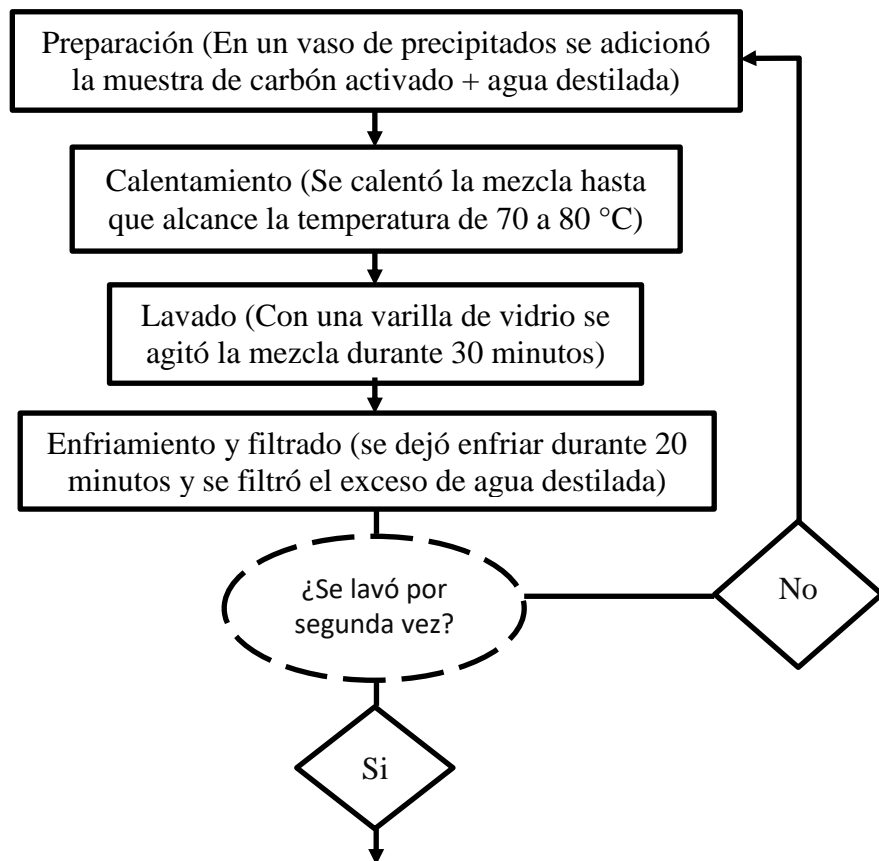


Fuente: Propio. En fecha: Junio del 2017.

El procedimiento se describe en el siguiente diagrama de bloques.

DIAGRAMA II-7

Procedimiento de lavado, secado y pesaje del carbón activado.



Secado y pesado (Se secó la muestra en una mufla eléctrica a 155°C durante 3 horas, se pesó y registró)

Fuente: Elaboración propia.

2.3.10 Caracterización del carbón activado.

2.3.10.1 Determinación del contenido de cenizas.

La técnica empleada se basa una norma venezolana efectuada a partir de varias normas internacionales. Esta norma se menciona en la bibliografía en el número [27].

Los cálculos realizados para determinación del carbón activado se encuentran en el ANEXO VII.

FOTO II-10

Realización de las pruebas del contenido de cenizas del carbón activado.



Fuente: Propio. En fecha: Junio del 2017.

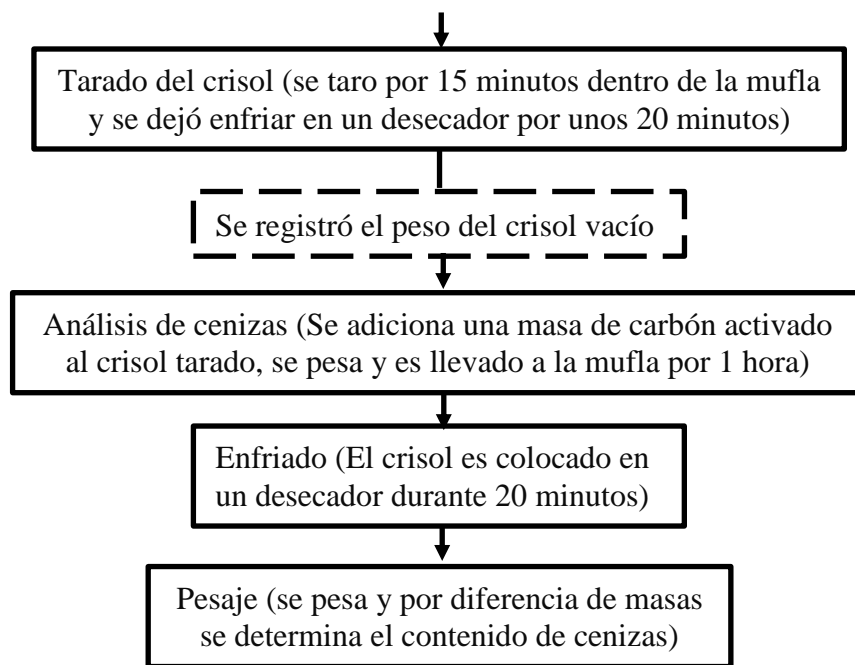
Cada determinación se realizó por duplicado.

El procedimiento se describe en el siguiente diagrama de bloques.

DIAGRAMA II-8

Procedimiento de la determinación del contenido de cenizas.

Preparación de la mufla eléctrica (Se encendió la mufla hasta que alcance la temperatura de 815 ± 1 °C)



Fuente: Elaboración propia.

2.3.10.2 Determinación del Índice de azul de metileno.

El procedimiento consiste en determinar la capacidad de adsorción del carbón activado sobre el azul de metileno en solución haciendo uso de un espectrofotómetro.

El procedimiento descrito a continuación es similar al realizado por Zenteno C., W. R. (2009) [41], aunque se realizaron algunas modificaciones en función a la investigación bibliográfica realizada. Puesto que esta fue la determinación más sobresaliente del presente trabajo se describe a detalle el proceso de adsorción a continuación.

Preparación de las muestras de carbón activado.

En un mortero se pulverizaron las muestras de carbón activado hasta que las muestras pasen el tamiz número 0.25 m/m (Norma española).

Luego se secaron las muestras de carbón activado en una mufla a 140°C durante 1 hora, se guardaron adecuadamente en frascos de plástico con tapa hasta el día del

análisis de adsorción, esto para prevenir que el carbón activado a analizar adsorba humedad.

También se realizó el proceso de secado y guardado de la muestra de carbón activado obtenida de la empresa de EMBOL TJA, para tener datos en igualdad de condiciones de análisis con un carbón activado utilizado en la región por una empresa local.

FOTO II-11

Molienda y tamizado de las muestras de carbón activado.



Fuente: Propio. En fecha: Julio del 2017.

Preparación de la solución de azul de metileno.

Se secó 1 gramo de azul de metileno a 140°C durante 1 hora en una mufla eléctrica, de esta muestra seca se pesaron 0.0371 gramos, se colocaron en un matraz aforado y se diluyó hasta un litro con agua destilada, se agitó la solución durante 10 minutos y se dejó reposar durante 5 días a temperatura ambiente.

Esta solución se la denominó como **solución madre**, la cual tenía una concentración de 37.1 ppm de azul de metileno.

FOTO II-12

Preparación de la solución madre de azul de metileno.



Fuente: Propio. En fecha: Julio del 2017.

Elaboración de la curva patrón de calibración.

Luego de transcurrido los 5 días se determinó la curva patrón de calibración (absorbancia vs concentración), para esto se prepararon diluciones de 2, 4, 6 y 8 ppm de azul de metileno a partir de la **solución madre**.

FOTO II-13

Realización de experimentos de adsorción de azul de metileno.



Fuente: Propio. En fecha: Julio del 2017.

Con la dilución de 2 ppm de azul de metileno se hizo un barrido espectral para determinar la máxima absorción del azul de metileno en el espectrofotómetro, la cual es la longitud de onda óptima para realizar lecturas de absorbancias, con las demás disoluciones se determinó la curva de calibración, la ecuación de la concentración y su respectivo coeficiente de correlación.

TABLA II-6

Lecturas de absorbancias para distintas concentraciones de azul de metileno.

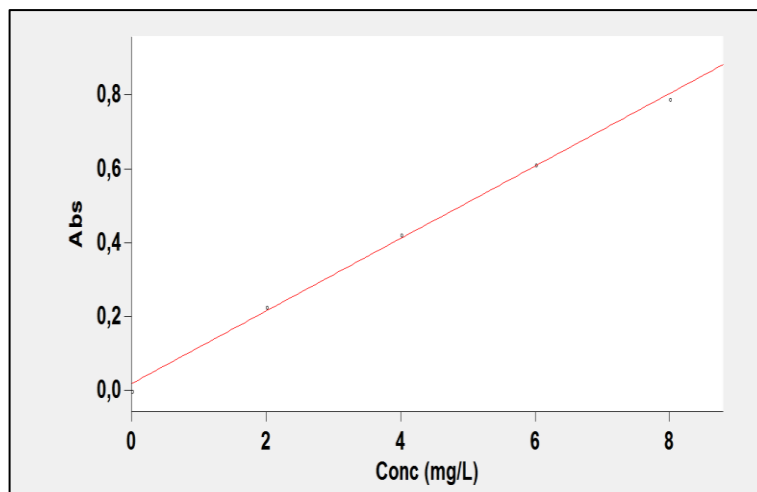
Estándar	Concentración (mg/L)	Absorbancia
Patrón 1	0.0	0.0001
Patrón 2	2.0	0, 2281
Patrón 3	4.0	0.4223
Patrón 4	6.0	0.6122
Patrón 5	8.0	0.7916

Fuente: Elaboración propio.

Dando como resultado la siguiente gráfica de calibración.

GRÁFICA 2-1

Curva de calibración “Concentración vs Absorbancia”.



Fuente: Resultados obtenidos del espectrofotómetro.

El espectrofotómetro también muestra la ecuación de la calibración:

$$\text{Abs} = 0.09836 * \text{Conc} + 0.01744$$

Con su respectivo coeficiente de correlación:

$$R^2 = 0.99792$$

El espectrofotómetro determinó la longitud de onda óptima para realizar lecturas de absorbancias con la solución de azul de metileno, esta fue de 656 nm.

Descripción del procedimiento de adsorción.

Se tuvieron en total 13 muestras (12 muestras obtenidas en laboratorio y una obtenida de una empresa local) y se realizaron en total 3 experimentos de absorción para cada una.

Se utilizaron soluciones de 100 ml con concentraciones de 4 ppm de azul de metileno y se agregaron muestras de 0.02 gramos de carbón activado.

FOTO II-14

Realización de los experimentos del índice de azul de metileno.



Fuente: Propio. En fecha: Julio del 2017.

Luego de terminado el proceso de agitación se dejaron reposar las muestras un par de horas hasta el momento de su análisis en el espectrofotómetro.

FOTO II-15

Solución de 4 ppm de azul de metileno.



Fuente: Propio. En fecha: Julio del 2017.

Las muestras se filtraron en erlenmeyers de 100 ml con embudos de vidrio y papel filtro No. 40 Whatman, para poder realizar las lecturas en el espectrofotómetro.

FOTO II-16

Realización de las lecturas de las absorbancias en el espectrofotómetro.



Fuente: Propio. En fecha: Julio del 2017.

Las lecturas de absorbancias determinadas por el espectrofotómetro se encuentran después de los ANEXOS de este proyecto.

También se incluyen en el ANEXO IX los certificados de calibración del espectrofotómetro que datan del 2013, aunque se debe mencionar que el mismo proceso de *Elaboración de la curva patrón de calibración* es la forma con la cual se verifica el

estado del espectrofotómetro, y como se demostró cumple la Ley de Beer-Lambert con la determinación de la recta en función de las soluciones patrón.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Presentación de los resultados de la caracterización del bagazo de caña de azúcar.

3.1.1 Resultados del análisis de contenido de humedad.

Como se indicó en el anterior capítulo (2.3.4.1 Análisis de contenido de humedad) el análisis se realizó por triplicado, de esta manera se obtuvieron los siguientes resultados.

TABLA III-1

Resultados obtenidos del contenido de humedad.

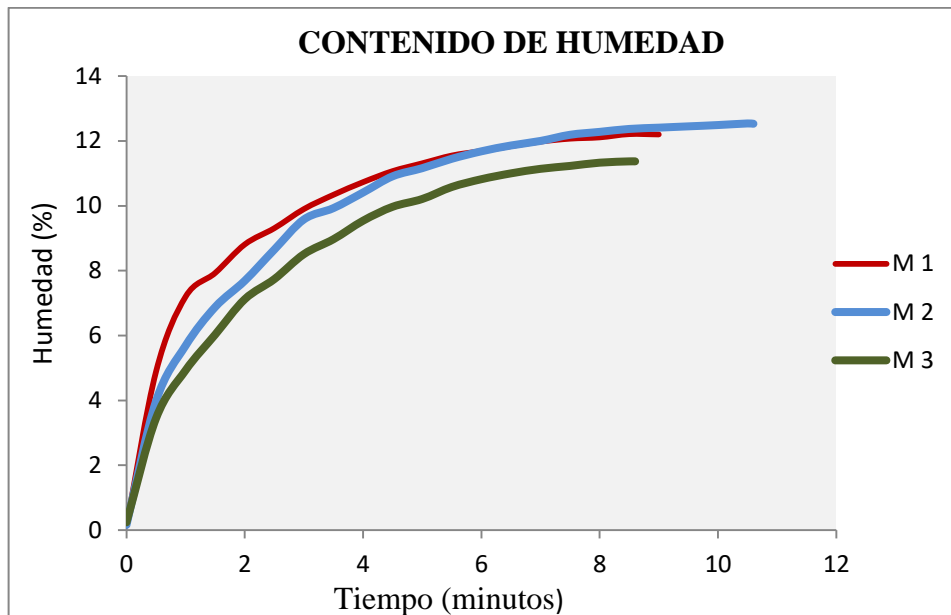
Muestra	Humedad (%)	Tiempo (minutos)
1	12.2	9
2	12.53	10.6
3	11.37	8.6
Promedio	12.03	9.4

Fuente: Elaboración propia.

La grafica de las curvas de secado que se presentan a continuación corresponde a los datos obtenidos que se localizan en el ANEXO V.

GRÁFICA 3-1

Humedad vs Tiempo, del secado del bagazo de caña de azúcar.



Fuente: Elaboración propia.

3.1.2 Resultados de la determinación de la densidad aparente.

Los datos obtenidos de este apartado se encuentran en el ANEXO V.

TABLA III--2

Resultados obtenidos de la densidad aparente.

Muestra	Densidad aparente (g/ml)
1	0.04606
2	0.0543
3	0.06036
Promedio	0.053573

Fuente: Elaboración propia.

3.1.3 Resultados de la determinación de la densidad real (Método picnómetro).

Los datos obtenidos de este apartado se encuentran en el ANEXO V.

Como se indicó en el anterior capítulo (2.3.4.3 Determinación de la densidad real) el análisis se realizó por triplicado, de ésta manera se obtuvieron los siguientes resultados.

TABLA III-3

Resultados obtenidos de la densidad real.

Muestra	Densidad real (g/ml)
1	0.463526637
2	0.433961485
3	0.466250057
Promedio	0.4545794

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos de la densidad real del bagazo de caña de azúcar de las muestras seleccionadas dan un resultado superior al encontrado en trabajos similares que utilizaron también bagazo de caña de azúcar.

3.1.4 Resultados de la determinación del contenido de cenizas.

Los resultados entregados por el laboratorio del CEANID dan como resultado de 1.99% de contenido de cenizas, aunque este resultado está relacionado con la fracción más gruesa del bagazo de caña de azúcar.

El documento escaneado se encuentra en el ANEXO VI.

También se realizó la determinación del contenido de cenizas de manera propia a la fracción más fina, el cual dio como resultado 3.65% de contenido de cenizas.

3.1.5 Resultados del análisis granulométrico (Tamizado) del bagazo de caña de azúcar.

Los resultados obtenidos del proceso de tamizado se presentan a continuación.

TABLA III-4

Resultados del análisis granulométrico.

Nombre	Tamiz			Unidades
	5	4	Pasa	m/m
Retenido	2480	300	2700	g
Total	5480			g

Fuente: Elaboración propia.

El variado tamaño de los trozos del bagazo de caña de azúcar tamizado muestra que existe una variada gama de posibles precursores de carbón activado, ya sean en polvo o en gránulos.

3.2 Presentación de los resultados de la obtención del carbón activado.

Los resultados se centran en los siguientes aspectos:

- Rendimiento del carbón activado.
- Contenido de cenizas del carbón activado.
- Índice de azul de metileno.

3.2.1 Resultados del rendimiento del carbón activado.

La siguiente tabla muestra los rendimientos alcanzados con el proceso de obtención de carbón activado.

TABLA III-5

Rendimiento del carbón activado.

Muestra	Peso BCA (g)	Peso CA (g)	Rendimiento (%)
----------------	---------------------	--------------------	------------------------

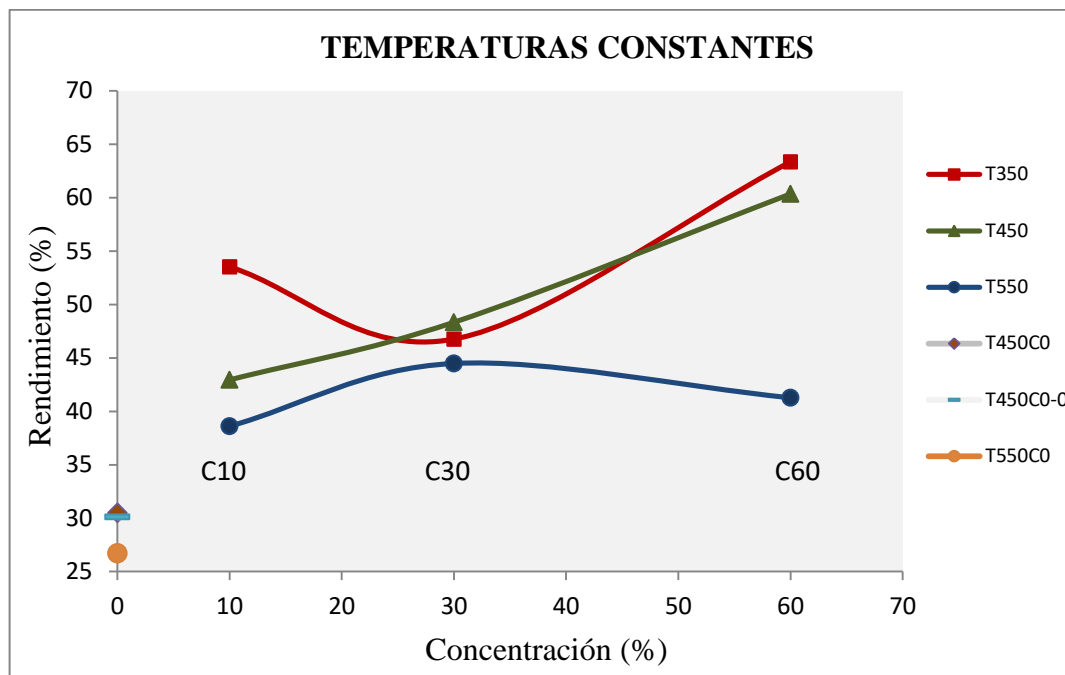
T350C10	15.0089	8.0342	53.5296
T350C30	3.0436	1.4233	46.7637
T350C60	3.0531	1.9342	63.3520
T450C10	7.0995	3.0486	42.9411
T450C30	7.1039	3.4338	48.3368
T450C60	7.3544	4.4381	60.3462
T550C10	8.0328	3.101	38.6042
T550C30	8.0178	3.5662	44.4785
T550C60	8.0033	3.3028	41.2680
T450C0	27.5574	8.3979	30.4742
T450C0-0	27.99	8.4193	30.0797
T550C0	12.9512	3.4596	26.7126

Fuente: Elaboración propia.

Con estos resultados se construyen dos gráficas de interacción para entender el comportamiento del rendimiento del proceso seleccionado, una a temperaturas constantes de proceso (variando la concentración del ácido fosfórico versus el rendimiento) y la segunda a concentraciones constantes del ácido fosfórico (variando la temperatura del proceso versus el rendimiento).

GRÁFICA 3-2

Rendimiento vs Concentración (temperaturas constantes).



Fuente: Elaboración propia.

A temperatura constante de 350°C se forma una curva, donde con 30% de ácido fosfórico diluido, hay un decaimiento en el rendimiento.

A temperatura constante de 450°C, el comportamiento del rendimiento es de un incremento lineal de 42.94% a 60.35%.

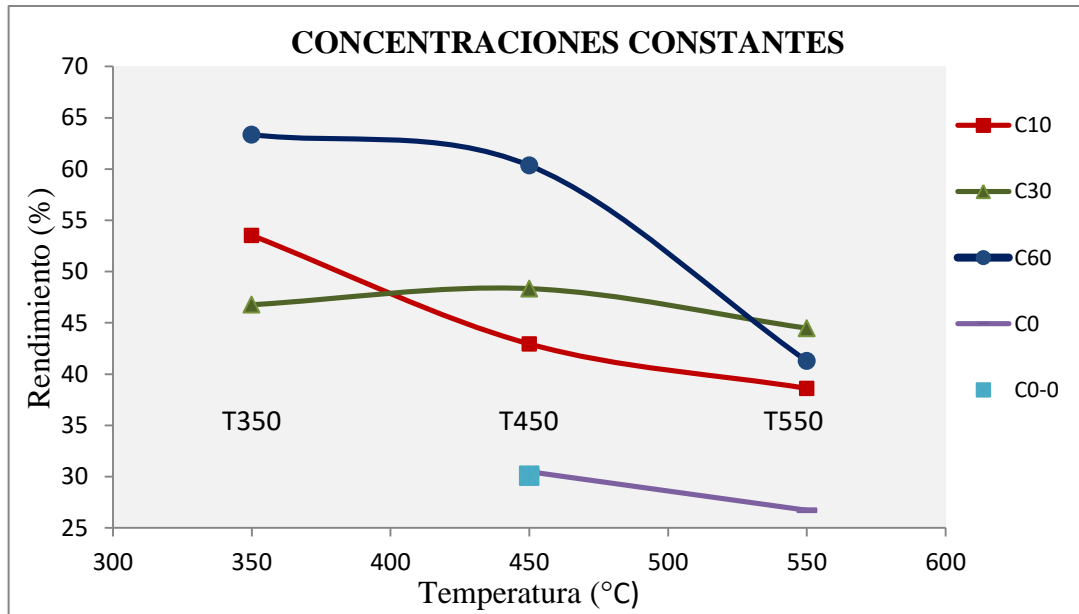
A temperatura constante de 550°C se da un caso contrario al de la temperatura de 350°C, donde esta vez se forma una curva de incremento a concentraciones de 30% de ácido fosfórico diluido y decaimientos a 10% y 60% con el ácido diluido.

Con respecto a las muestras en las cuales no se utilizaron ácido fosfórico, mostraron un rendimiento inferior en comparación a las muestras impregnadas con ácido fosfórico que decrece al aumentar la temperatura, con rendimientos del 26% al 30%.

En resumen el ácido fosfórico favorece a la obtención de carbón activado, en general mientras mayor sea la concentración de ácido fosfórico diluido mayores rendimientos se llegan a obtener del carbón activado.

GRÁFICA 3-3

Rendimiento vs Temperatura (concentraciones constantes).



Fuente: Elaboración propia.

El aumento de la temperatura tiene consecuencias negativas en el rendimiento del carbón activado, se observa que en los 3 casos en donde se utiliza ácido fosfórico el rendimiento baja con el aumento de la temperatura.

Con respecto al rendimiento de las muestras sin el empleo del ácido fosfórico (T450C0, T450C0-0 y T550C0), mostraron rendimientos inferiores con respecto a los logrados con el uso del ácido fosfórico a las mismas temperaturas, gráficamente se observa que a medida que aumenta la temperatura el rendimiento baja a consecuencia del proceso de carbonización del bagazo de caña de azúcar.

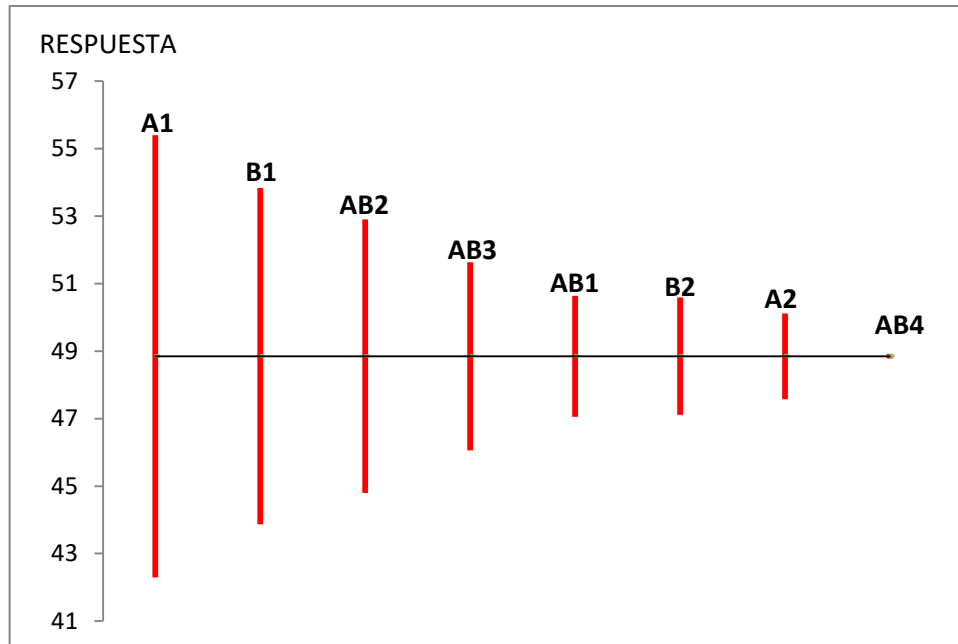
Efecto de la temperatura y la concentración sobre el rendimiento.

Los cálculos del siguiente diagrama se encuentran en el ANEXO VIII.

El siguiente diagrama se elaboró en base a una matriz de experimentos de 3^2 donde de izquierda a derecha se muestran en orden de magnitud los efectos de los factores (Temperatura y concentración) planteados al inicio del diseño experimental.

GRÁFICA 3-4

Diagrama de efectos del rendimiento del carbón activado.



Fuente: Elaboración propia.

A representa el factor temperatura.

B representa el factor concentración del ácido fosfórico diluido.

La línea llamada **A1** representa el primer contraste, sirve para comparar el efecto del nivel 1 con el efecto del nivel 3 del mismo factor **A**.

La línea **A2**, compara el efecto del nivel 2 (450°C) con los efectos de los niveles 1 (350°C) y 3 (550°C) en promedio, del mismo factor. Por eso, los dos primeros contrastes miden el efecto del factor **A**. De forma similar, los dos siguientes, **B1** y **B2**, miden el efecto del factor **B**.

Los cuatro restantes, **AB1**, **AB2**, **AB3** y **AB4**, comparan el efecto de las diferencias de niveles de un **factor** a diferentes niveles del otro. Por eso los cuatro miden diversos aspectos de la interacción entre **A** y **B**.

Con el diagrama de efectos se puede determinar que el efecto más significativo para el rendimiento del carbón activado es el factor **A1** (temperatura) desde el nivel 1 (350°C) al nivel 3 (550°C), luego le sigue el factor **B1** (concentración del ácido fosfórico diluido) desde el nivel 1 (10%) al nivel 3 (60%). Luego en menor medida le

siguen la combinación de estos factores, donde el que menor incidencia tiene en el rendimiento es **AB4**, es decir el promedio del nivel 2 de **A** y **B** comparado con sus respectivos nivel 1 y 3 de cada factor.

3.2.2 Resultados del contenido de cenizas del carbón activado.

Se hizo el procedimiento por duplicado. La siguiente tabla muestra el contenido de cenizas alcanzados con el proceso de obtención de carbón activado.

TABLA III-6
Contenido de cenizas del carbón activado.

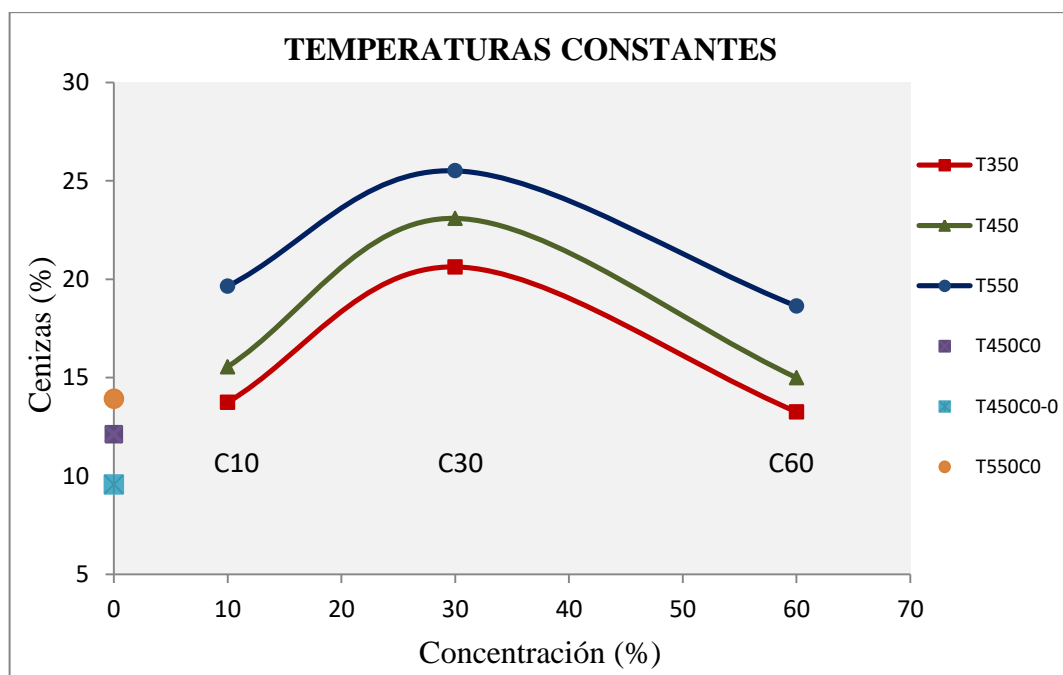
Muestra	% CENZ (1)	% CENZ (2)	Promedio de cenizas
T350C10	12.9464	14.5415	13.7440
T350C30	20.7675	20.4852	20.6263
T350C60	12.4450	14.0756	13.2603
T450C10	16.4716	14.6342	15.5529
T450C30	22.6380	23.5484	23.0932
T450C60	14.8527	15.1432	14.9979
T550C10	19.3822	19.9029	19.6426
T550C30	25.0325	25.9864	25.5095
T550C60	19.5495	17.7253	18.6374
T450C0	11.7865	12.4723	12.1294
T450C0-0	10.11838	9.0280	9.5732
T550C0	13.8365	14.0170	13.9267

Fuente: Elaboración propia.

Con estos resultados se construyen dos gráficas de interacción para entender el comportamiento del contenido de cenizas del proceso seleccionado, una a temperaturas constantes de proceso (variando la concentración del ácido fosfórico versus el contenido de cenizas) y la segunda a concentraciones constantes del ácido fosfórico (variando la temperatura del proceso versus el contenido de cenizas).

GRÁFICA 3-5

Cenizas vs Concentración (temperaturas constantes).



Fuente: Elaboración propia.

En las obtenciones en las cuales se utiliza ácido fosfórico se evidencia el mismo comportamiento, la formación de una curva con un incremento de cenizas con la concentración de 30% de ácido fosfórico diluido, esto debido seguramente a la formación de los poros de carbón activado que en su proceso de formación de su estructura microporosa, mesoporosa y macroporosa las cuales indican que retienen o concentran mayor contenido de cenizas en sus poros con la concentración del 30% de ácido fosfórico diluido.

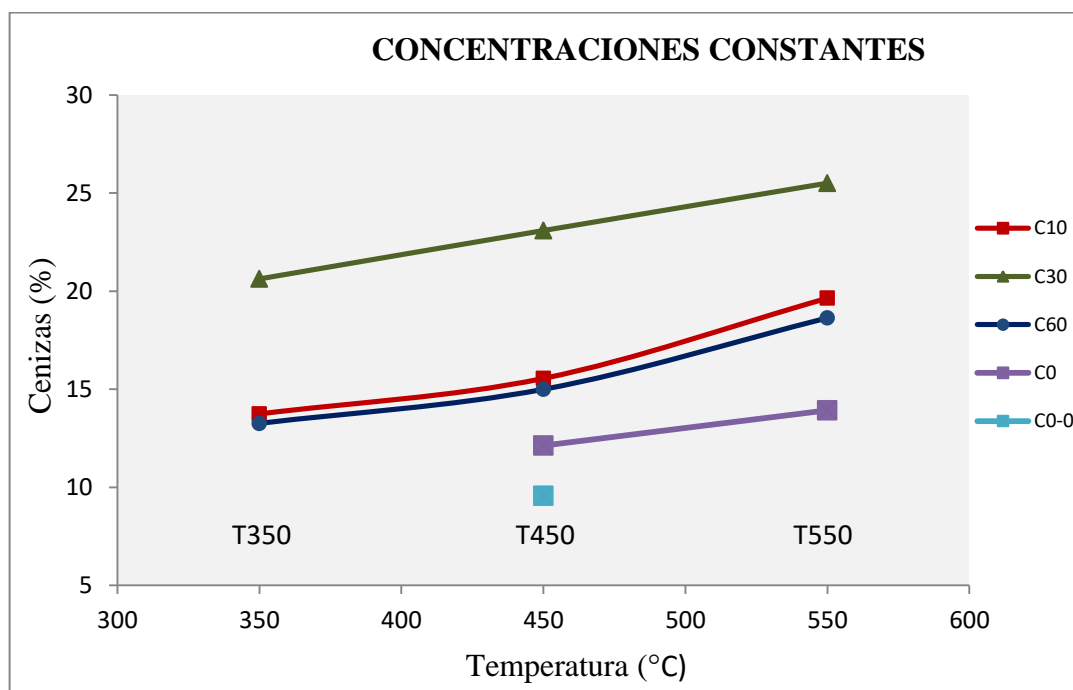
Cabe indicar que mientras se incrementa la temperatura incrementa el contenido de cenizas esto es comparable con la teoría y experiencias recopiladas de otros trabajos similares.

Las muestras en las cuales no se utilizó ácido fosfórico muestran un contenido de cenizas inferior al determinado en sus pares a la misma temperatura.

La siguiente gráfica relaciona el contenido de cenizas y las temperaturas involucradas a concentraciones constantes de ácido fosfórico diluido.

GRÁFICA 3-6

Cenizas vs Temperatura (concentraciones constantes).



Fuente: Elaboración propia.

En los casos en los cuales se utiliza ácido fosfórico, gráficamente se observa que a concentraciones constantes existe un incremento casi lineal con la variación de la temperatura del contenido de cenizas.

La concentración de 30% de ácido fosfórico diluido, fue la que mayor contenido de cenizas presentó en los experimentos realizados, alrededor de un 5% más con relación a las demás muestras obtenidas de carbón activado.

Con respecto a las muestras sin ácido fosfórico diluido (**T450C0**, **T450C0-0** y **T550C0**) el promedio de cenizas es del 11% lo cual sirve para saber qué cantidad de cenizas se aumenta con el uso del ácido fosfórico.

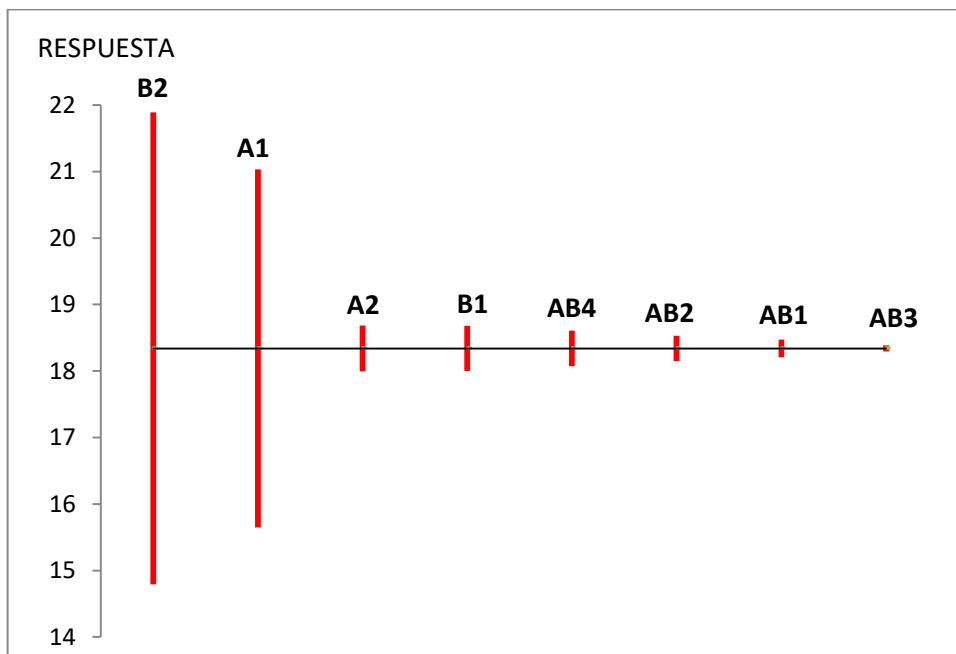
Efecto de la temperatura y la concentración sobre el contenido de cenizas.

Los cálculos del siguiente diagrama se encuentran en el ANEXO VIII.

La explicación de la interpretación de los factores **A** y **B** del anterior punto es válida para el siguiente diagrama de efectos.

GRÁFICA 3-7

Diagrama de efectos del contenido de cenizas del carbón activado.



Fuente: Elaboración propia.

A representa el factor temperatura.

B representa el factor concentración del ácido fosfórico diluido.

De este diagrama se determina que el factor que más afecta el contenido de cenizas es el factor **B2**, el cual compara el efecto del nivel 2 (30%) con los efectos de los niveles 1 (10%) y 3 (60%) en promedio, del mismo factor.

Luego le sigue el factor **A1** (temperatura) desde el nivel 1 (350°C) al nivel 3 (550°C) como el que tiene influencia en el contenido de cenizas del carbón activado.

3.2.3 Resultados de la determinación del índice de azul de metileno.

Se hizo el procedimiento por triplicado.

Se realizó el proceso de adsorción para las muestras de carbón activado, incluida la muestra del carbón activado utilizado por una empresa local (EMBOL TJA), a la cual se la denominó como CACC (Carbón Activado de Coca Cola).

La concentración de las muestras iniciales de azul de metileno fue de 4 ppm en 100 ml de agua destilada, las cuales mostraron una absorbancia de 0.4223.

TABLA III-7

Resultados finales del índice de azul de metileno.

Muestra	ABS (1)	ABS (2)	ABS (3)	Promedio	% Remoción
T350C10	0.0324	0.0297	0.0353	0.03246667	92.31
T350C30	0.0418	0.0408	0.043	0.04186667	90.09
T350C60	0.0041	0.0089	0.0096	0.00753333	98.22
T450C10	0.072	0.0489	0.071	0.06396667	84.85
T450C30	0.0252	0.0278	0.0273	0.02676667	93.66
T450C60	0.0306	0.0295	0.0307	0.03026667	92.83
T550C10	0.0263	0.019	0.0222	0.0225	94.67
T550C30	0.0287	0.0335	0.0282	0.03013333	92.86

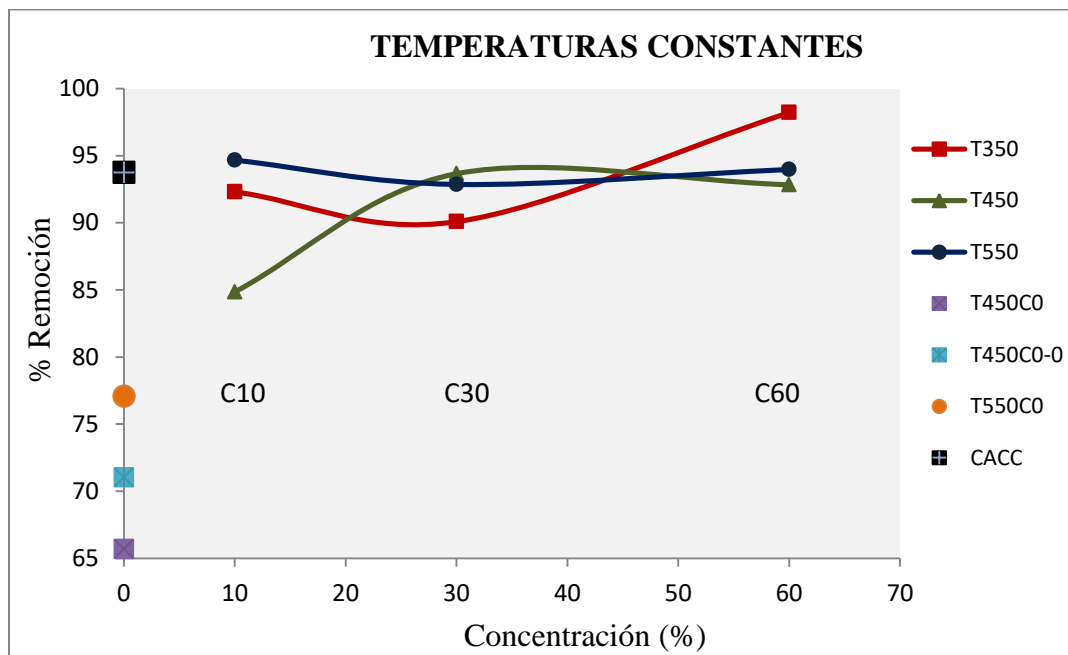
T550C60	0.0232	0.0282	0.0249	0.02543333	93.98
T450C0	0.116	0.141	0.1489	0.1353	67.96
T450C0-0	0.1161	0.1436	0.1286	0.12943333	69.35
T550C0	0.1184	0.0933	0.1004	0.10403333	75.37
CACC	0.0263	0.0264	0.0296	0.02743333	93.50

Fuente: Elaboración propia.

Con estos resultados se construyen dos gráficas de interacción para entender el comportamiento de las muestras de carbón activado en la remoción de las diluciones de azul de metileno, una a temperaturas constantes de proceso (variando la concentración del ácido fosfórico versus el porcentaje de remoción) y la segunda a concentraciones constantes del ácido fosfórico (variando la temperatura del proceso versus el porcentaje de remoción).

GRÁFICA 3-8

Porcentaje de remoción vs Concentración (temperaturas constantes).



Fuente: Elaboración propia.

Gráficamente se observa que las muestras obtenidas con ácido fosfórico (**T350**, **T450** y **T550**) muestran un incremento en su porcentaje de remoción de azul de metileno que asciende a medida que se aumenta la concentración de ácido fosfórico.

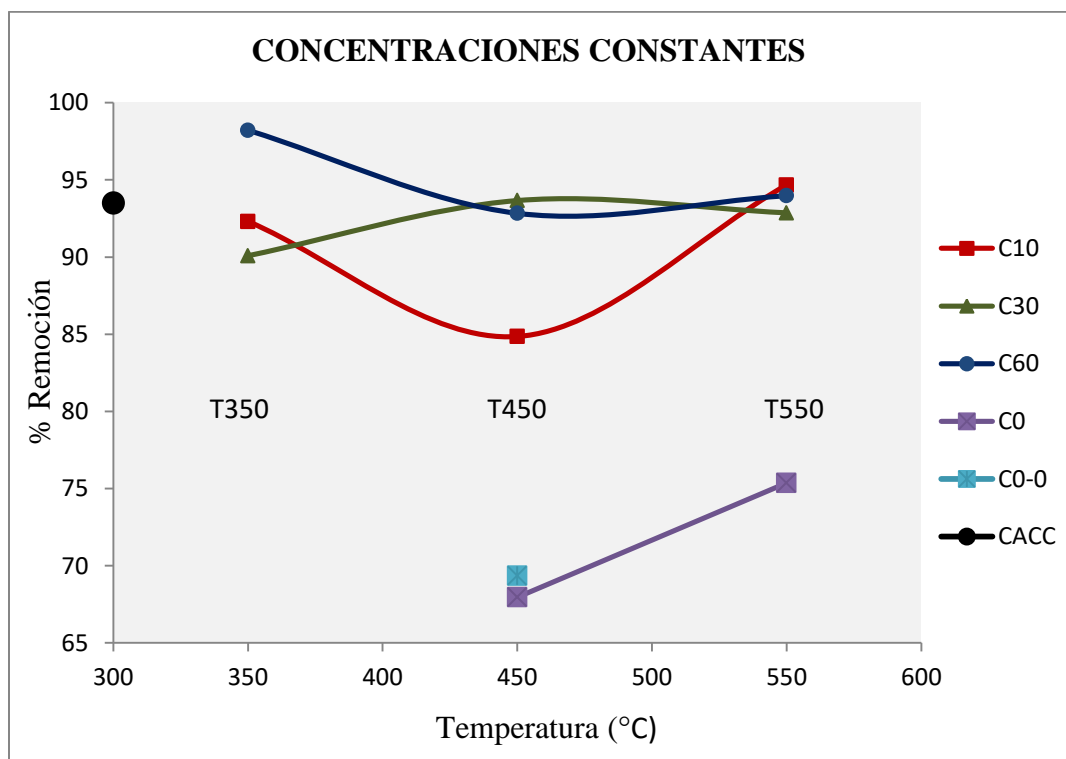
Las muestras obtenidas sin la utilización de ácido fosfórico (**T450C0**, **T450C0-0** y **T550C0**) muestran una menor capacidad de remoción de azul de metileno, también que en promedio son un 20% menos adsorbente que las muestras impregnadas con ácido fosfórico.

Con respecto a la muestra de carbón activado comercial (**CACC**) removió el 93.50% del total del azul de metileno de las muestras diluidas bajo las mismas condiciones de análisis que el de las muestras obtenidas en laboratorio.

La siguiente gráfica muestra el efecto de la temperatura en relación al poder de adsorción de las muestras de carbón activado.

GRÁFICA 3-9

Porcentaje de remoción vs temperatura (Concentraciones constantes).



Fuente: Elaboración propia.

A concentración constante de 10% de ácido fosfórico diluido, se observa que el poder de remoción del carbón activado desciende un 8% a 450°C y vuelve a subir a los 550°C.

A concentración constante de 30 % de ácido fosfórico diluido, se observa que el poder de remoción del carbón activado asciende a la temperatura de 450°C y desciende un poco a la temperatura de 550°C.

A concentración constante de 60% de ácido fosfórico, se observa que la de remoción del carbón activado desciende un poco a medida que aumenta la temperatura.

En síntesis las muestras obtenidas con el uso del ácido fosfórico en bajas concentraciones son más beneficiadas con el aumento de la temperatura que aquellas que utilizan concentraciones mayores de ácido fosfórico, aunque a la temperatura de 350°C la capacidad de adsorción del carbón activado obtenido mostró mejores resultados con mayores concentraciones de ácido fosfórico diluido.

Con respecto a las muestras en las cuales no se utilizó ácido fosfórico (**T450C0**, **T450C0-0** y **T550C0**) se observa gráficamente que con el aumento de temperatura aumenta su capacidad de adsorción, aunque siguen siendo inferiores en su efectividad en la remoción del azul de metileno en solución en comparación con las muestras impregnadas con ácido fosfórico.

La muestra del carbón activado comercial muestra una capacidad de remoción similar a las muestras impregnadas obtenidas a menores temperaturas, aunque algunas son ligeramente superiores al carbón comercial utilizado para el proceso de comparación.

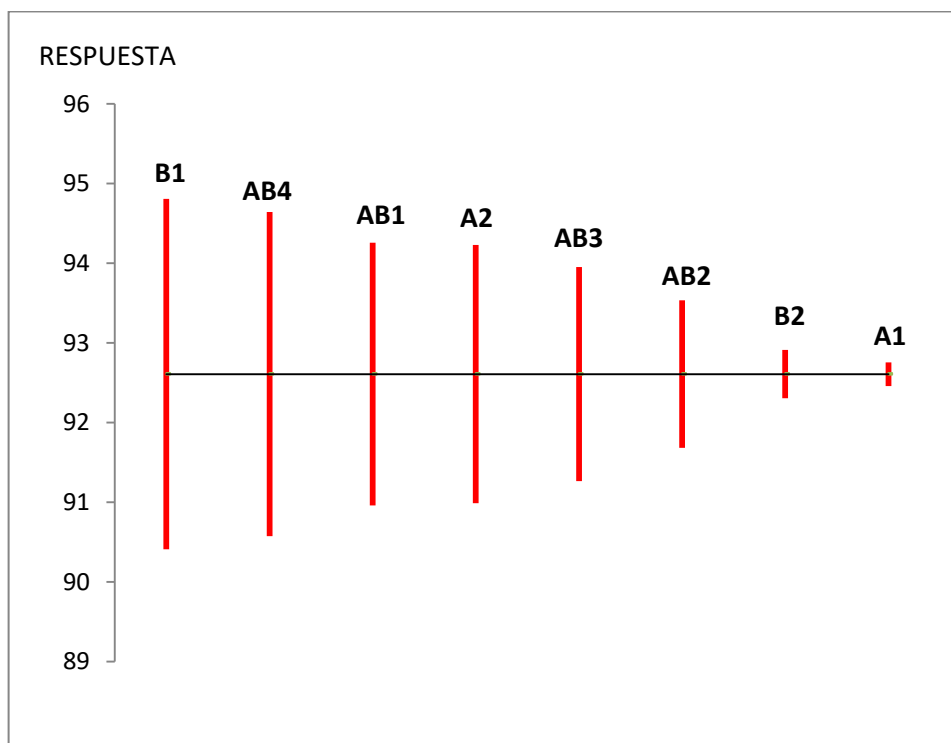
Efecto de la temperatura y la concentración sobre la adsorción del azul de metileno.

Los cálculos del siguiente diagrama se encuentran en el ANEXO VIII.

La explicación de la interpretación de los factores **A** y **B** del anterior punto es válida para el siguiente diagrama de efectos.

GRÁFICA 3-10

Diagrama de efectos de la adsorción del azul de metileno del carbón activado.



Fuente: Elaboración propia.

A representa el factor temperatura.

B representa el factor concentración del ácido fosfórico diluido.

En general la mayoría de los factores y sus combinaciones tienen una influencia similar en la capacidad de adsorción del carbón activado para el azul de metileno.

Pero **B1** tiene mayor dominio en la capacidad de remoción del carbón activado, es decir, la concentración del ácido fosfórico diluido favorece la capacidad de adsorción del carbón activado.

El factor que menor influencia tuvo en la capacidad de remoción del carbón activado fue el **A1**, es decir, la temperatura desde los 350°C hasta los 450°C no brindó mayores beneficios en la capacidad de adsorción del carbón activado.

3.3 Comparación, presentación y presentación del mejor carbón activado obtenido experimentalmente.

3.3.1 Comparación de absorbancias con el carbón activado comercial (CACC).

Varias de las muestras de carbones activados obtenidas experimentalmente mostraron un alto nivel de remoción del azul de metileno.

La siguiente tabla indica aquellas muestras que demostraron superiores capacidades de adsorción en comparación con el carbón activado comercial (CACC).

TABLA III-8

Carbones activados con alto nivel de absorbancia.

Muestra	ABS (1)	ABS (2)	ABS (3)	Promedio	% Remoción
T350C60	0.0041	0.0089	0.0096	0.0075333	98.22
T450C30	0.0252	0.0278	0.0273	0.0267667	93.66
T550C10	0.0263	0.019	0.0222	0.0225	94.67
T550C60	0.0232	0.0282	0.0249	0.0254333	93.98
CACC	0.0263	0.0264	0.0296	0.0274333	93.50

Fuente: Elaboración propia.

De las 12 muestras obtenidas experimentalmente, cuatro mostraron un mejor rendimiento de remoción del azul de metileno que el CACC, aunque con un margen de diferencia bajo, se logró obtener carbón activado con una efectividad equiparable al de un carbón activado comercial utilizado en el departamento de Tarija por una empresa local.

3.3.2 Presentación del índice de azul de metileno.

La presentación comercial o industrial del índice de azul de metileno se realiza en su mayoría de dos formas:

- En función de la cantidad de gramos de azul de metileno adsorbidos por 100 gramos de carbón activado.
- En función de la cantidad de miligramos de azul de metileno adsorbidos por un gramo de carbón activado.

La siguiente tabla muestra la presentación de resultados que se encontrarían en cualquier producto de carbón activado, con números enteros.

TABLA III-9

Datos del Índice de Azul de Metileno de las pruebas de laboratorio.

Muestra	Azul de Metileno adsorbido (ppm).	Índice (g AM/100 g CA).	Índice (mg AM/1 g CA).
T350C10	3.69	18.46 ≈ 18	184.62 ≈ 185
T350C30	3.60	18.02 ≈ 18	180.17 ≈ 180
T350C60	3.93	19.64 ≈ 20	196.43 ≈ 196
T450C10	3.39	16.97 ≈ 17	169.71 ≈ 170
T450C30	3.75	18.73 ≈ 19	187.32 ≈ 187
T450C60	3.71	18.57 ≈ 19	185.67 ≈ 186
T550C10	3.79	18.93 ≈ 19	189.34 ≈ 189
T550C30	3.72	18.57 ≈ 19	185.73 ≈ 186
T550C60	3.76	18.80 ≈ 19	187.96 ≈ 188
T450C0	2.72	13.59 ≈ 14	135.92 ≈ 136
T450C0-0	2.77	13.87 ≈ 14	138.70 ≈ 139

T550C0	3.02	15.07 ≈ 15	150.73 ≈ 151
CACC	3.74	18.70 ≈ 19	187.01 ≈ 187

Fuente: Elaboración propia.

3.3.3 Determinación del mejor carbón activado obtenido experimentalmente.

La evaluación se realiza en función de las tres variables determinadas en laboratorio:

- Rendimiento de carbón activado.
- Contenido de cenizas.
- Adsorción de azul de metileno.

En términos generales se busca que un carbón activado tenga un alto rendimiento, con un bajo contenido de cenizas (dependiendo de su utilización) y que demuestre un alto porcentaje de remoción en función de un agente común encontrado en diversas industrias, en este caso denominado “Índice de azul de metileno”.

Los 3 mejores resultados de cada variable se presentan en la siguiente tabla.

TABLA III-10

Comparación de carbones activados obtenidos experimentalmente.

Comparación de los mejores resultados.			
Variable	Muestra	Resultado	
Rendimiento (%)	T350C60	63.352	
	T450C60	60.3462	
	T350C10	53.5296	
Contenido de Cenizas (%)	Sin activante	T450C0	12.1294
		T450C0-0	9.5732
		T550C0	13.9268
	Ácido fosfórico	T350C60	13.2603
		T350C10	13.7440
		T450C60	14.9979
Porcentaje de remoción del Azul de Metileno (%)	T350C60	98.2161	
	T550C10	94.6720	
	T550C60	93.9774	

Fuente: Elaboración propia.

Cabe mencionar que las muestras obtenidas, sin el uso de ácido fosfórico como activante, tienen menor contenido de cenizas, pero como no siguieron el mismo proceso y tienen menores resultados en sus otras dos variables determinadas, no son tomadas en cuenta en este análisis.

Bajo este análisis de resultados se determina como al mejor carbón activado obtenido experimentalmente a la muestra codificada como **T350C60**, es decir a la muestra realizada a una temperatura de 350°C utilizando una concentración del 60% en ácido

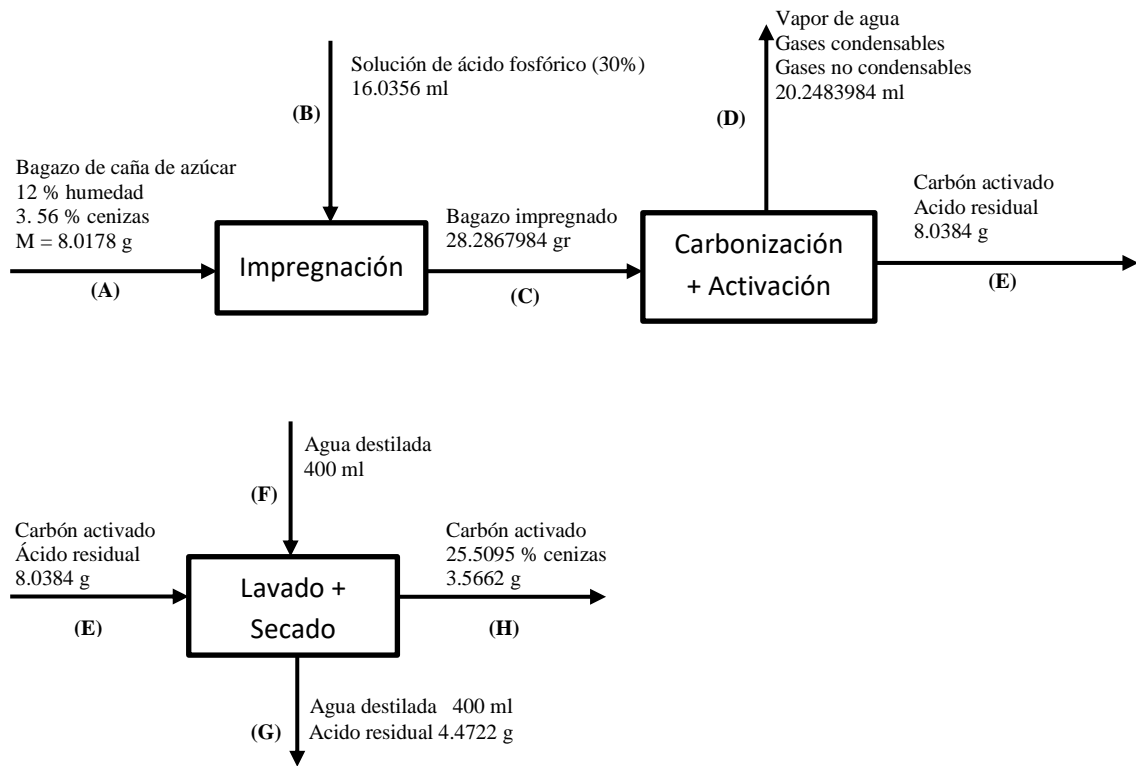
fosfórico diluido, ya que esta muestra demostró ser la mejor en los tres parámetros determinados en laboratorio.

Balance de materia del proceso de obtención del carbón activado.

El balance se realiza después de terminado el secado al sol del bagazo de caña de azúcar.

Con fines didácticos se realiza el balance con los datos de la muestra **T550C30**.

Densidad ácido fosfórico: 1.88 g/cm^3



Balance de energía del proceso de obtención del carbón activado.

Los datos utilizados corresponden al balance de materia de la muestra **T550C30**.

La energía del proceso de carbonización y activación para el experimento se calcula como la suma de la energía entregada por la mufla eléctrica de manera constante, sea esta Q_1 , más la energía necesaria para el tratamiento de carbonización y activación

de la materia prima, sea esta Q_2 , menos la energía liberada por el bagazo de caña producto de la carbonización, sea esta Q_3 .

Cabe mencionar que se toman datos involucrados del bagazo de caña de azúcar y no del ácido fosfórico diluido involucrado debido a la falta de información que existe para determinar el balance de energía de manera completa.

- **Cálculo de Q_1**

La mufla eléctrica tiene una potencia de 3000 W, la cual estuvo encendida desde el calentamiento y durante la fase de activación.

$$\text{Tiempo de calentamiento: } t_c = \frac{550^\circ\text{C}}{8.6825^\circ\text{C}/\text{min}} = 63.3458 \text{ min} = 3800.7486 \text{ s}$$

$$\text{Tiempo de activación: } t_a = 40 \text{ min} = 2400 \text{ s}$$

$$\text{Tiempo total: } t_T = t_c + t_a = 3800.7486 \text{ s} + 2400 \text{ s} = 6200.7486 \text{ s}$$

$$E = P * t_T = 3000 \text{ J/s} * 6200.7486 \text{ s} = 18602245.8 \text{ J} = 4445.94 \text{ kcal/lote.}$$

$$Q_1 = 4445.94 \text{ kcal/lote.}$$

- **Cálculo de Q_2**

El cálculo de la energía necesaria para el tratamiento de la materia prima, Q_2 , se calcula de la siguiente forma: (Los cálculos se realizarán tomando como dato la cantidad de bagazo que ingresa a la mufla eléctrica).

La materia prima debe ser secada y carbonizada en el horno eléctrico. Se tomará como humedad de la materia prima sea del 12%. Además se tomarán los siguientes datos:

$$\text{Temperatura de reacción de la carbonización y activación: } T_{rc} = 550^\circ\text{C}$$

$$\text{Flujo del material húmedo (flujo que ingresa al horno): } F_{mh} = 8.0178 \text{ g/lote}$$

$$\text{Sea: } F_{mh} = F_{ms} + F_{amh}$$

Donde F_{ms} es el flujo de materia prima seca y F_{amh} es el flujo de agua en el material húmedo, entonces:

$$8.0178 \text{ g/lote} = F_{ms} + F_{amh}$$

Se tiene la siguiente ecuación de la cantidad de agua (en gramos) en el material húmedo.

$$F_{ms} / F_{amh} = 0.12 \text{ g agua / g material}$$

Con lo que se puede obtener:

$$F_{amh} = 0.9621 \text{ g/lote} \quad ; \quad F_{ms} = 7.0557 \text{ g/lote}$$

Recordando que de la etapa de carbonización y activación se tiene un 44.48% de carbón activado seco (F_s), se obtiene que este valor es de:

$$F_s = 0.4448 * F_{mh} = 0.4448 * 8.0178 = 3.5662 \text{ g/lote}$$

De los trabajos relacionados a la obtención de carbón activado a partir residuos agroindustriales se da valores promedio de los gases condensables y no condensables producto de la carbonización siendo estos de un 21.02% para los gases no condensables y 34.50% para gases condensables, entonces:

$$\text{Flujo de gases condensables: } F_c = 0.3450 * F_{mh} = 0.3450 * 8.0178 = 2.7661 \text{ g/lote}$$

$$\text{Flujo de gases no condensables: } F_{nc} = 0.2102 * F_{mh} = 0.2102 * 8.0178 = 1.6853 \text{ g/lote}$$

El calor necesario para el tratamiento de la materia prima, Q_2 , se descompone en el calor necesario para secar el material húmedo, Q_s , más el calor necesario para la carbonización del material, Q_c . Es decir, $Q_2 = Q_s + Q_c$

- **Cálculo de Q_s**

El calor para secar el material se expresa como la suma del calor para el material húmedo hasta que comience la evaporación de la humedad, Q_{mh} , más el calor de evaporación del agua, Q_{ev} , más el calor para el material seco hasta que llegue a la temperatura de reacción de la carbonización, Q_{ms} . Es decir:

$$Q_s = Q_{mh} + Q_{ev} + Q_{ms}$$

Q_{mh} se calcula con la siguiente ecuación: $Q_{mh} = F_{mh} * C_{pmh} * (T_{ev} - T_0)$, donde C_{pmh} es el calor específico del material húmedo y su valor se estima en 0.00033 kcal/g°C. Se tiene que:

$$Q_{mh} = 8.0178 * 0.00033 * (100 - 25) = 0.1984 \text{ kcal/lote}$$

Q_{ev} se calculará de la siguiente forma: $Q_{ev} = F_{amh} * \Delta H_{ev}$, donde ΔH_{ev} es la entalpía de evaporación del agua a 1 atm y su valor es 0.5396 kcal/g. Por lo tanto se tiene que:

$$Q_{ev} = 0.9621 * 0.5396 = 0.5191 \text{ kcal/lote}$$

Q_{ms} se calcula mediante la siguiente ecuación: $Q_{ms} = F_{ms} * C_{pms} * (T_{rc} - T_{ev})$ donde C_{pms} es el calor específico del material seco y su valor es 0.00033 kcal/g°C. Luego se tiene que:

$$Q_{ms} = 7.0557 \text{ g/lote} * 0.00033 \text{ kcal/g}^\circ\text{C} * (550 - 100)^\circ\text{C}; \quad Q_{ms} = 1.0478 \text{ g/lote}$$

Finalmente: $Q_s = 1.7653 \text{ g/lote}$

- **Cálculo de Q_c**

El calor necesario para la carbonización y activación se expresa como la suma del calor de la reacción de la carbonización, Q_{rc} , más el calor sensible del flujo de materia sólida, Q_{sm} , más el calor sensible de productos volátiles de la carbonización, Q_{vc} . Es decir:

$$Q_c = Q_{rc} + Q_{sm} + Q_{vc}$$

Q_{rc} se puede calcular mediante la ecuación: $Q_{rc} = \Delta H_{rc} * R_{rc}$ donde el primer término representa el cambio entálpico de las reacciones de carbonización y su valor es 0.2 kcal/g, y el segundo término representa la velocidad de reacción de la carbonización y corresponde a la masa de gases que se elimina de la materia prima por cada lote de producción, es decir:

$F_c + F_{nc} = 4.4514 \text{ g/lote}$. Por lo tanto se tiene que:

$$Q_{rc} = 0.2 * 4.4514 = 0.8903 \text{ kcal/lote}$$

Q_{sm} se calcula de la siguiente manera: $Q_{sm} = F_s * C_{ps} * (T_{rc} - T)$ donde C_{ps} corresponde al calor específico del material sólido y su valor, según bibliografía, es de 0.000239 kcal/g°C, T representa la temperatura a la que se llevará a cabo el inicio de la carbonización dentro del horno. Por lo tanto se tiene que:

$$Q_{sm} = 3.5662 * 0.000239 * (550 - 300) = 0.2131 \text{ kcal/lote}$$

Finalmente Q_{vc} se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{vc} = (F_c * C_{pc} + F_{nc} * C_{pnc}) * \Delta T, \text{ donde:}$$

$$F_c = \text{Flujo de gases condensables} = 2.7661 \text{ g/lote}$$

C_{pc} = Calores específicos de los gases condensables.

$$F_{nc} = \text{Flujo de gases no condensables} = 1.6853 \text{ g/lote}$$

C_{pnc} = Calores específicos de los gases no condensables.

Los gases condensables se componen principalmente de alquitranes (9%) y agua (34%). Los calores específicos son:

$$C_{p\text{agua}} = 0.00061 \text{ kcal/g}^\circ\text{C} \quad ; \quad C_{p\text{alquitranes}} = 0.00045 \text{ kcal/g}^\circ\text{C}$$

Los gases condensables corresponden a H_2 (0.226%), CO_2 (0.266%), CO (0.305%).

Sus calores específicos medios son los siguientes:

$$C_{pH_2} = 0.00362 \text{ kcal/g}^\circ\text{C}$$

$$C_{pCO_2} = 0.0003 \text{ kcal/g}^\circ\text{C}$$

$$C_{pCO} = 0.00027 \text{ kcal/g}^\circ\text{C}$$

Con los datos obtenidos y los valores de las fracciones másicas de los gases se obtiene que:

$$F_c * C_{pc} = 2.7661 * (0.34 * 0.00061 + 0.09 * 0.00045) = 0.0006857 \text{ kcal/lote} * ^\circ\text{C}$$

$$F_{nc} * C_{pnc} = 1.6853 * (0.226 * 0.00362 + 0.266 * 0.0003 + 0.305 * 0.00027) = \\ 0.00195 \text{ kcal/lote} * ^\circ\text{C}$$

$$\text{Entonces: } Q_{vc} = (0.0006857 + 0.00195) * (550 - 300) = 0.6589 \text{ kcal/lote}$$

Finalmente de la ecuación para el cálculo de Q_c se obtiene que el calor necesario para la carbonización sea:

$$Q_c = (0.8903 + 0.2131 + 0.6589) = 1.7623 \text{ kcal/lote}$$

Por lo tanto el calor necesario para el tratamiento de la materia prima, Q_2 , es:

$$Q_2 = Q_s + Q_c = 1.7653 + 1.7623 = 3.5276 \text{ kcal/lote}$$

- **Cálculo de Q_3**

El calor liberado (reacción exotérmica) por el bagazo de caña de azúcar es considerado como el calor específico inferior del bagazo que corresponde al calor del material que sale de la mufla eléctrica y que forma parte de los gases no condensables del proceso (carbonización), este proceso se considera como una *combustión imperfecta* ya que no todo el material reacciona (oxida) de la misma forma y tampoco a la misma velocidad.

Dada la complejidad de determinar la cantidad y velocidad de carbonización en esta etapa, se supone un flujo de material que entrega calor al proceso, siendo este el 50% del flujo de gases no condensables, es decir: 0.84265 g/lote de bagazo de caña de azúcar.

El calor específico inferior promedio del bagazo de caña de azúcar:

$$7000 \text{ KJ/kg} = 1.673 \text{ kcal/kg.}$$

$$\text{Entonces: } Q_3 = 1.673 \text{ kcal/g} \cdot 0.84265 \text{ g/lote} = 1.4098 \text{ kcal/lote}$$

Finalmente, como ya se mencionó, la energía total del proceso de obtención es:

$$Q_T = Q_1 + Q_2 - Q_3 = 4445.94 \text{ kcal/lote} + 3.5276 \text{ kcal/lote} - 1.4098 \text{ kcal/lote}$$

$$Q_T = 4450.8774 \text{ kcal/lote}$$

Materiales, equipos y reactivos utilizados.

1 Materiales:

- Desecador
- Vasos de precipitación (25 ml, 50 ml, 100 ml, 200 ml).
- Estufa de temperatura regulable.
- Mortero
- Pipetas (1 ml, 5 ml, 10 ml, 100 ml).

- Matraces a florados (100 ml, 1000 ml).
- Matraces Erlenmeyer (50 ml, 100 ml, 250 ml).
- Probeta (5 ml, 10 ml, 100 ml).
- Espátula
- Papel filtro
- Picnómetro

2 Equipos:

- Secador de infrarrojos.
- Secador de bandejas.
- Juego de tamices.
- Mufla eléctrica.
- Espectrofotómetro.

3 Reactivos:

- 0.5 g de Azul de metileno.
- 60 ml de Ácido fosfórico.
- 10 L de Agua destilada.

4 Equipo de protección personal:

- Bata de laboratorio.
- Guantes de látex.
- Barbijo
- Guantes con palma de goma rugosa.

Costos del proyecto:

TABLA III-9

Costos del Proyecto.

TAREA	Precio Unitario	Cantidad	Unidad	Costo (Bs)
--------------	------------------------	-----------------	---------------	-------------------

		(Bs).			
1	Investigación en Internet.	2	300	Horas	600
2	Transporte a Bermejo.	40	4	Pasaje	160
3	Transporte diario.	1	300	Pasaje	300
4	Análisis de laboratorio.	25	1	Análisis	25
5	Reactor de acero inoxidable.	1	800	Elemento	800
6	Impresiones	0.2	1000	Impresión	200
7	Accesorios (reactor)	100		Varios	100
8	Material de laboratorio.	150		Varios	150
9	Costos imprevistos.	200			200
	Total				2535

Fuente: Elaboración propia.

Cronograma de actividades del proyecto:

CRONOGRAMA DE REALIZACIÓN DEL PROYECTO													
FASE	ACTIVIDAD	2016					2017						
		OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	
Recolección y Secado	Recolección del bagazo de caña de azúcar												
	Secado al sol												
Caracterización del bagazo de caña de azúcar	Determinación de la humedad												
	Determinación de la densidad aparente												
	Determinación de la densidad real												
	Determinación del contenido de cenizas												
	Secado del bagazo de caña de azúcar												
	Tamizado del bagazo de caña de azúcar (Granulometría)												
Obtención del Carbon activado	Impregnación del bagazo con el ácido fosfórico												
	Carbonización y activación del bagazo impregnado												
	Lavado del carbón activado												
	Secado y pesado del carbón activado												
Caracterización del carbon activado	Contenido de cenizas												
	Determinación del índice de azul de metileno												

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- El presente trabajo demostró que es posible obtener carbón activado del bagazo de caña de azúcar del Ingenio Azucarero de Bermejo, con un proceso simple y eficiente.
- La información recopilada en el marco teórico demuestra que los procesos de obtención del carbón activado son sencillos y de fácil acceso, sin, por esto, perder calidad en el producto obtenido, la aplicación del carbón activado abarca varias áreas como ser: la medicina, procesamiento de alimentos y bebidas, minería, petroquímica, entre los más conocidos, siendo por esto la utilidad que se le puede dar a un producto como es el carbón activado tan interesante para una producción a mayor escala.
- La caracterización del bagazo de caña de azúcar muestra que es un buen material de partida para obtener carbón activado, ya que posee propiedades adecuadas como ser: poca humedad después de un secado al sol por dos semanas, un bajo contenido de cenizas, poca densidad lo cual indica su porosidad y una granulometría variada lo cual favorece que se pueda obtener carbones activados de diferentes granulometrías y por varios métodos de obtención, sin procesos complejos previos para su utilización.

La siguiente tabla resume las propiedades del bagazo de caña de azúcar utilizado en el presente proyecto.

Propiedades del bagazo de caña de azúcar.		
Factor determinado.	Valor	Unidades
Humedad	12.03	%
Densidad aparente.	0.053573	g/ml
Densidad real.	0.4545794	g/ml

Cenizas	Fracción fina.	3.65	%
	Fracción gruesa.	1.99	%
Granulometría	Fracción fina.	49.2707	%
	Fracción gruesa.	50.7293	%

Estos datos dan cuenta de las propiedades adecuadas que tiene el bagazo de caña de azúcar, para ser un material de partida para la producción de carbón activado.

También se debe mencionar el bajo precio del bagazo de caña de azúcar (100 bs. por tonelada), y su disponibilidad en grandes cantidades en el Ingenio Azucarero de la ciudad de Bermejo.

- El análisis y selección del proceso de obtención, se elaboró con la construcción de una tabla donde se muestran los factores más sobresalientes para la producción de carbón activado, no sólo del bagazo de caña de azúcar, sino también de otras materias primas a fin de comparar las variables seleccionadas, esto ayudó a determinar de manera plena una selección de variables de proceso y ácido activante adecuados para la obtención experimental de carbón activado, siendo el rango de temperaturas entre los 350°C a 550°C el más recomendado y el ácido fosfórico con concentraciones de 10% a 60% diluido el utilizado en los trabajos revisados para el diseño de experimentos para el tratamiento del bagazo de caña de azúcar a carbón activado.
- La fase experimental del proceso de obtención, se diseñó con los menores pasos posibles y sin la utilización de reactivos en gran medida, esto pensando en la formulación de un proceso que tenga el menor impacto medio ambiental de forma negativa posible, sin por esto perjudicar el objetivo principal del proyecto.

- Las propiedades de los carbones activados obtenidos experimentalmente dan cuenta de que se tienen excelentes rendimientos, equiparables con los de trabajos similares, poseen un bajo contenido de cenizas a pesar de simplemente haber sido lavados con agua destilada a 75°C y su poder de remoción del azul de metileno demuestra su gran capacidad de adsorción, equiparables y hasta ligeramente superiores con un carbón activado comercial utilizado por EMBOL TJA.

De los experimentos realizados, el que mejor resultados mostró fue la muestra **T350C60**, esta obtención demostró ser la mejor en los tres aspectos analizados en la caracterización del carbón activado, los resultados determinados están en la siguiente tabla.

T350C60	
Rendimiento (%)	63.352
Cenizas (%)	13.2603
% Remoción	98.2161
Índice de Azul de Metileno.	19.64 \approx 20

La aplicación del carbón activado obtenido experimentalmente si situaría en un inicio en la purificación de aguas residuales de industrias de cueros o curtiembres, decoloración de azúcar, remoción de hidrocarburos, etc.

- La presentación de los resultados se realizó mediante gráficas de interacción y diagramas de efectos para determinar exactamente qué factores son los más influyentes en la obtención del carbón activado, bajo el diseño de experimentos definido para este proyecto, dando como resultado una mejor comprensión de los factores involucrados en la calidad del producto obtenido, de esta forma se concluye que la capacidad de adsorción del carbón activado es mejorada con el

incremento del ácido fosfórico diluido y en menor medida con el aumento de la temperatura.

4.2 Recomendaciones

- Realizar experimentos enfocados en la remoción de agentes presentes en procesos de diversas industrias, por ejemplo: para la decoloración de azúcar, existe un parámetro llamado *Índice de Melaza*, con el cual se verifican tres aspectos básicamente, antes y después de aplicar el carbón activado a una muestra; el pH, los °BRIX y su grado de remoción de elementos cromóforos.
- Se sugiere hacer estudios enfocados en la reducción del contenido de cenizas, que si bien se tienen en poca cantidad en las muestras obtenidas se podría reducir hasta cantidades más bajas, la biografía recomienda para esto la aplicación de algún ácido inorgánico como ser: ácido sulfúrico o ácido clorhídrico diluido, aunque no existe mucha información sobre las cantidades o variables para un proceso eficiente.
- Realizar pruebas de aplicación del carbón activado obtenido experimental, en tratamientos de empresas locales o nacionales, ya que se podría fabricar carbones activados dependiendo de su utilización en el mercado local real.
- Si se plantease realizar una producción a mayor escala de carbón activado, lo primero que se recomendaría hacer es un estudio de mercado enfocado en qué tipo de carbón activado es el más empleado a nivel regional, nacional y realizar encuestas a los posibles sectores los cuales estarían interesados en adquirir carbón activado, así se tendría un mejor conocimiento de cual carbón activado se debería producir, en base a la demanda del mercado, y cuáles serían las inquietudes de los posibles compradores de carbón activado ante un nuevo producto nacional.

El escalamiento del proceso debería dirigirse en una primera instancia a la construcción de una planta piloto de producción de carbón activado, ya que por regla general los parámetros determinados como los mejores a escala de laboratorio no siempre son los más adecuados a una escala mayor, la planta

piloto ayudaría a predecir el comportamiento del proceso de una manera más económica y rápida de: condiciones de operación, parámetros de diseño, materiales de construcción, operaciones unitarias, impurezas, corrosión, procesamientos operativos, problemas de trabajo y problemas ambientales.

Además que una planta piloto permitiría determinar la viabilidad de otras materias primas a convertirse en carbón activado aparte del bagazo de caña de azúcar.

Otro factor importante si se plantease la idea de una planta de producción de carbón activado es definir el tamaño de la planta y posterior ubicación, basado en los criterios de disponibilidad de servicios básicos (gas, electricidad, agua), cercanía a mercados consumidores, distancia a la materia prima, mano de obra, transporte, entre los factores más sobresalientes.

- Para una producción industrial, se recomienda utilizar un gas inerte como nitrógeno gaseoso o dióxido de carbono durante el proceso de carbonización y activación para inhibir la liberación de la energía del bagazo, de hecho el uso de un gas inerte favorece en el rendimiento del carbón activado, ya que durante el proceso de carbonización y activación el bagazo libera energía la cual a pequeña escala no representa un problema, pero a mayor escala esta energía producto de la carbonización puede afectar tanto al rendimiento y la calidad del carbón activado a obtener.
- Para una producción a mayor escala, se recomienda utilizar el mismo tipo de agente de lavado (agua destilada), para retirar el ácido fosfórico residual y el alquitrán presente en el carbón activado, ya que si se utiliza agua potable, por la presencia de minerales que contiene, puede contaminar al carbón activado y posiblemente aumentar el contenido de cenizas y hasta disminuir su capacidad de adsorción.