

Proposal for the design of an activated carbon production line from sugarcane and coconut

Gabriel Ojeda, Arleth Orozco, Tony Espinoza*

Escuela de Ingeniería Química. Facultad de Ingeniería. Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela.

Abstract.- The present investigation began by characterizing the physicochemical properties of the precursors under study, resulting in the bagasse containing a higher fixed carbon content. Then, an analysis was carried out to define the most viable equipment in the process, resulting in the rotary dryer, the hammer mill and the rotary kiln. Subsequently, an experimental design for the carbonization and activation stage was proposed, obtaining as best operating conditions $(400 \pm 1)^\circ\text{C}$ for $(120,00 \pm 0,01)$ min and $(700 \pm 1)^\circ\text{C}$ for $(120,00 \pm 0,01)$ min, respectively, in addition that the most suitable mixing ratio was 100:0, 0:100 and 80:20 coco-bagasse correspondingly, having an activated carbon suitable for water treatment.

Keywords: physical activation; sugarcane bagasse; activated carbon; coconut; experimental design.

Propuesta del diseño de una línea de producción de carbón activado a partir de caña de azúcar y coco

Resumen.- La presente investigación inició caracterizando las propiedades fisicoquímicas de los precursores en estudio, resultando que el bagazo contiene mayor contenido de carbono fijo. Luego, se realizó un análisis para definir los equipos más viables en el proceso, resultando, el secador rotatorio, el molino de martillo y el horno rotatorio. Posteriormente, se planteó un diseño experimental para la etapa de carbonización y activación obteniéndose como mejores condiciones de operación $(400 \pm 1)^\circ\text{C}$ por $(120,00 \pm 0,01)$ min y $(700 \pm 1)^\circ\text{C}$ por $(120,00 \pm 0,01)$ min respectivamente, además que la proporción de mezcla más adecuada fue 100:0, 0:100 y 80:20 de coco-bagazo correspondientemente, teniéndose un carbón activado apto para el tratamiento de agua. A partir de esta información se dimensionaron los principales equipos que conforman el proceso productivo.

Palabras clave: activación física; bagazo de caña de azúcar; carbón activado; coco; diseño experimental.

Recibido: 07 de octubre, 2019.

Aceptado: 16 de diciembre, 2019.

1. Introducción

El carbón activado es un adsorbente preparado a partir de materiales carbonosos que se caracteriza por poseer una alta superficie interna, variedad de grupos funcionales y una buena distribución de poros, propiedades que le permiten atrapar una gran diversidad de moléculas. La preparación de este tipo de material se lleva a cabo a través de procesos físicos o químicos, mediante la interacción con gases o la adición de químicos, respectivamente. Los carbones activados son utilizados generalmente en procesos de descontaminación de aguas,

recuperación de solventes, control de emisiones, decoloración de líquidos, eliminación de olores, soportes catalíticos, entre otros procesos. Entre los contaminantes de aguas más comunes se encuentran los compuestos fenólicos, presentes ampliamente en los efluentes de industrias refinadoras de petróleo, carboníferas, transformadoras de plástico, cuero, pintura, farmacéuticas, y del acero. La adsorción de compuestos fenólicos con carbón activado es uno de los métodos más usados, especialmente para efluentes con concentraciones bajas y moderadas [1].

La elección del precursor es fundamentalmente una función de su disponibilidad, precio y pureza, pero el proceso de fabricación y la posible aplicación del producto final deben ser considerados [2]. Es por esta razón que los carbones activados comerciales son preparados a partir

*Autor para correspondencia:

Correo-e: tony_paz@hotmail.com (Tony Espinoza)

de materiales precursores con un alto contenido en carbono, especialmente, materiales orgánicos como: madera, huesos, cascara de semillas de frutos, como también, carbón mineral, breas, turba y coque [3].

En la actualidad, el carbón activado es un producto cotizado en diferentes mercados a nivel mundial, por su aplicabilidad en diferentes áreas que dependen de sus propiedades fisicoquímicas de acuerdo a la materia prima utilizada para la producción del carbón [4]. Es por esta razón que la presente investigación, tuvo como finalidad proponer el diseño de una línea de producción de carbón activado a partir de los residuos obtenidos en el proceso productivo de ICYCA C.A. y comprobar la factibilidad de utilizar estos precursores para obtener un carbón activado con las mejores características exigidas por el mercado para satisfacer la demanda nacional.

2. Metodología

2.1. Caracterización de la materia prima en estudio.

En esta fase se determinó el porcentaje de humedad, material volátil, contenido de cenizas y carbono fijo de los precursores en estudio. El cual se realizó de acuerdo a los procedimientos previstos en las Normas COVENIN [5][6][7][8].

2.2. Selección de la tecnología a utilizar

Mediante tormentas de ideas con los expertos de la empresa, se seleccionó la activación del material carbonizado a través de la activación física con vapor de agua. Luego, se hizo uso de una matriz de selección [9], permitiendo el análisis entre las diferentes tecnologías disponibles en cada etapa del proceso, es decir, para la etapa de secado (secador rotatorio, secador de circulación directa y secador de tambor); para la etapa de molienda (trituradora de rodillos derivados, molino de bolas y molino de martillo) y para la etapa de secado-carbonización-activación (reactor de lecho fluidizado, reactor de lecho fijo y horno rotatorio). Donde se analizó con expertos y/o revisión bibliográfica [10] los aspectos más importantes, ponderando cada uno de los criterios tales como costo, eficiencia con la

materia prima, consumo de servicios, mano de obra no especializada, entre otros del 1 al 10, siendo 10 más eficiente.

3. Diseño del experimento de mezclas

En esta etapa, se siguió el procedimiento establecido por [11], donde primeramente se identificó mediante tormentas de ideas conjunto a expertos del área, el objetivo del planteamiento del diseño de experimento, el cual era la determinación de las condiciones óptimas para producir carbón activado mediante los precursores en estudio, seguidamente se realizó revisiones bibliográficas [12, 13], para conocer cuáles son las condiciones típicas en la que se produce carbón activado y las variables que más influyen en las propiedades fisicoquímicas de él, por lo que mediante un análisis con expertos, se planteó un diseño factorial 2^2 , quedando de la siguiente manera:

Tabla 1: Diseño de experimento para la etapa de carbonización y activación.

| Factor | Carbonización | | Activación | |
|--------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | Nivel ₁ | Nivel ₂ | Nivel ₁ | Nivel ₂ |
| T(°C) | 400 | 600 | 700 | 900 |
| t(min) | 60 | 120 | 60 | 120 |

T: temperatura, t: tiempo.

De acuerdo con el diseño mostrado en la Tabla 1, se utilizó para la etapa de carbonización una mezcla de proporciones 100:0, 0:100, 80:20 y 50:50 de coco-bagazo respectivamente, mientras que para la etapa de activación se utilizaron las mezclas seleccionadas en la etapa de carbonización, usando como variable de respuesta el porcentaje de carbono fijo y el índice de azul de metileno para la etapa de carbonización y activación, respectivamente, realizándolo de acuerdo a las Normas COVENIN [5][6][7][8] y la Norma Técnica Colombia NTC 4467 [14].

A partir de estos datos se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para así conocer cuál de las variables en estudio influyen estadísticamente sobre la variable de respuesta, y con esto se definieron las condiciones óptimas de operación.

3.1. Caracterización del carbón activado producido.

Al carbón activado producido bajo las condiciones de operación definidas, se le determinó el número de yodo, densidad aparente y pH, realizadas de acuerdo a la Norma Técnica Colombiana NTC 4467 [14], posteriormente estos valores fueron comparados con los establecidos por las Normas ASTM [15][16][17][18] para definir el campo de utilización del carbón activado.

3.2. Dimensionamiento los principales equipos requeridos para el proceso de producción de carbón activado.

Se inició por investigar la oferta y demanda del carbón activado, a partir de esto se realizó la proyección del mercado actual (demanda) y se estableció el mercado objetivo, se obtuvo la proyección de la producción dentro de 10 años para definir la capacidad instalada, y con este valor se realizaron balances de masas y energía, así mismo mediante las ecuaciones de diseño se procedió a calcular los parámetros necesarios para cada uno de los equipos que conforman el proceso.

4. Análisis y discusión de resultados

4.1. Caracterización de la materia prima en estudio.

Las propiedades fisicoquímicas de los precursores en estudio calculadas experimentalmente se muestran en la Tabla 2, como se observa el porcentaje de humedad de ambos precursores es relativamente alta, lo que indica que se debe llevar un buen proceso térmico. Por otra parte se observa según la Tabla 2 que el bagazo de caña de azúcar tiene mayor contenido de material volátil, contenido de cenizas y porcentaje de carbono fijo en comparación del endocarpio de coco, lo que significa que el bagazo tiene mayor contenido de compuestos como agua, monóxido de carbono, sulfuros, metanos, materia inorgánica y material no volátil en su estructura [12].

4.2. Selección de la tecnología a utilizar.

Al evaluar las diferentes tecnologías disponibles para la etapa de secado, como lo son el secador

Tabla 2: Propiedades fisicoquímicas de las materias prima.

| Propiedad | B | C |
|--|-------------------------|-------------------------|
| Humedad % (H ± 0,002) | 21,000 | 84,130 |
| Materia volátil % (MV ± ΔMV) | 71,65 ± 0,03 | 15,57 ± 0,02 |
| Contenido de cenizas (Cenz ± ΔCenz) % | 0,391783 ± 0,000 004 | 0,241851 ± 0,000 002 |
| Carbono fijo (CF ± ΔCF) % | 6,96 ± 0,05 | 0,086 ± 0,002 |

B: bagazo de caña de azúcar, C: endocarpio de coco.

rotatorio, el secador de circulación directa y el secador de tambor, se encontró que el equipo más adecuado es el Secador Rotatorio, como se observa en la Tabla 3, puesto que posee una alta disponibilidad en el mercado, tiene el mejor costo entre las opciones estudiadas y funciona bien con la materia prima requerida en este proceso.

Tabla 3: Matriz de puntuación del equipo de secado previo.

| Factor | % | S_R | P_{SR} | S_D | P_{SD} | T | P_T |
|----------------------|-----|-------|----------|-------|----------|----|-------|
| Disponibilidad | 20 | 10 | 200 | 1 | 20 | 10 | 200 |
| Costo inicial | 25 | 10 | 250 | 1 | 25 | 5 | 125 |
| Eficiencia con la MP | 25 | 8 | 200 | 5 | 125 | 8 | 200 |
| Consumo de servicios | 15 | 8 | 120 | 5 | 75 | 7 | 105 |
| Mano de obra | 15 | 7 | 105 | 3 | 45 | 5 | 75 |
| Total Σ | 100 | - | 875 | - | 290 | - | 705 |

S_R : secador rotatorio; S_D : secador de circulación directa; T: secador de tambor; P_i : ponderación del equipo.

Con respecto a la etapa de molienda, entre las tecnologías usadas para producir carbón activado se encuentran: trituradora de rodillos derivados, molino de bolas y molino de martillos, se determinó mediante el análisis de la matriz de puntuación, que el equipo más adecuado es el molino de martillo, de acuerdo con la Tabla 4, puesto que este equipo posee mayor eficiencia al moler la materia prima en estudio (prueba realizada a escala piloto).

Por último, el equipo más adecuado para la etapa de secado/carbonización/activación, es el horno

Tabla 4: Matriz de puntuación del equipo de molienda.

| Factor | % | T | P_T | MB | P_{MB} | M | P_M |
|----------------------|-----|---|-------|----|----------|---|-------|
| Disponibilidad | 20 | 4 | 80 | 6 | 120 | 8 | 160 |
| Costo inicial | 25 | 2 | 50 | 5 | 125 | 6 | 150 |
| Eficiencia con la MP | 25 | 4 | 100 | 6 | 150 | 9 | 225 |
| Uso de equipos | 15 | 5 | 75 | 10 | 150 | 9 | 135 |
| Mano de obra | 15 | 3 | 45 | 8 | 120 | 6 | 90 |
| Total Σ | 100 | - | 309 | - | 665 | - | 760 |

TR: trituradora de rodillos derivados; MB: molino de bolas; M: molino de martillos, P_i : ponderación del equipo.

rotatorio entre las tecnologías en estudio (reactor de lecho fluidizado, reactor de lecho fijo y horno rotatorio) tal como se aprecia en la Tabla 5, debido a que este cuenta con una alta versatilidad y bajo costo, haciéndolo atractivo para ser usado en este proyecto.

Tabla 5: Matriz de selección para el equipo del secado, carbonización y activación.

| Factor | % | RF | P_{RF} | LF | P_{LF} | H | P_H |
|----------------------|-----|----|----------|----|----------|---|-------|
| Disponibilidad | 10 | 7 | 70 | 5 | 50 | 9 | 90 |
| Costo inicial | 20 | 4 | 80 | 4 | 80 | 6 | 120 |
| Transmisión de calor | 20 | 8 | 160 | 7 | 140 | 8 | 160 |
| Pérdida de presión | 20 | 6 | 120 | 4 | 80 | 8 | 160 |
| Uso de equipos | 10 | 8 | 80 | 5 | 50 | 5 | 50 |
| Contacto entre fases | 15 | 8 | 120 | 5 | 75 | 7 | 105 |
| Mano de obra | 5 | 2 | 10 | 2 | 10 | 6 | 30 |
| Total Σ | 100 | - | 309 | - | 665 | - | 760 |

RF: reactor de lecho fluidizado; RL: reactor de lecho fijo; H: horno rotatorio; P_i : ponderación del equipo.

4.3. Diseño del experimento de mezclas.

Para el diseño de experimento se consideró que: (a) los factores son fijos, (b) los diseños son totalmente aleatorizados y (c) se satisfacen los supuestos de normalidad, por lo que a continuación se muestran los resultados

4.3.1. Carbonización

A partir de los datos mostrados en la Tabla 6, se realizó un análisis de varianza, para conocer si

las variables en estudio (temperatura y tiempo de residencia) influyen estadísticamente en la variable de respuesta (porcentaje de carbono fijo). Por lo que al procesar los datos en el software Statgraphics 18 y asumiendo un nivel de significancia $\alpha = 0,05$; se obtienen los diagramas reflejados en la Figura 1.

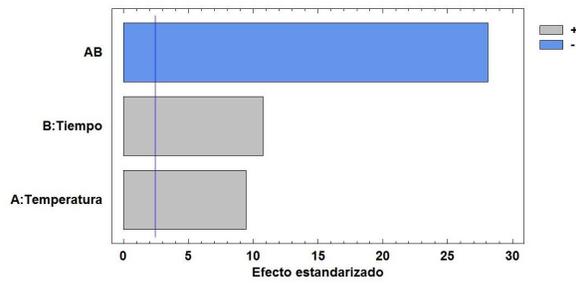
Tabla 6: Porcentaje de carbono fijo a las diferentes condiciones de operación, etapa de carbonización.

| Factor | | Porcentaje de carbono fijo promedio(%CF \pm 0,3) [%] | | | |
|----------------------------|--------------------------------|--|------|--------------------|--------------------|
| T ($T \pm 1$) [°C] | t ($t \pm 0,01$) [min] | B | C | M _{50:50} | M _{80:20} |
| 400 | 60 | 4,9 | 6,3 | 5,4 | 18,6 |
| 600 | 60 | 11,4 | 19,9 | 11,8 | 17,1 |
| 400 | 120 | 11,6 | 36,7 | 12,1 | 23,3 |
| 600 | 120 | 8,4 | 13,3 | 11,1 | 18,7 |

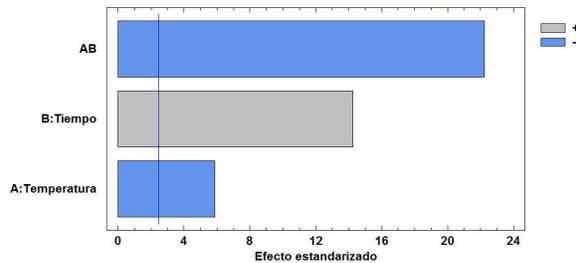
T: temperatura; t: tiempo; B: bagazo de caña de azúcar; C: endocarpio de coco; M_{50:50}: mezcla bagazo de caña de azúcar-endocarpio de coco 50:50; M_{80:20}: mezcla bagazo de caña de azúcar-endocarpio de coco 80:20.

En la Figura 1 puede apreciarse, para cada uno de los casos en evaluación, que las barras de los efectos estandarizados cruzan la línea de referencia, indicando que estos efectos (temperatura, tiempo de residencia e interacción entre ellas) son estadísticamente significativos sobre la variable de respuesta. Por otra parte, también se puede observar que la interacción entre la temperatura y tiempo de residencia tiene mayor efecto sobre el porcentaje de carbono fijo siguiendo el tiempo de residencia y por último la temperatura.

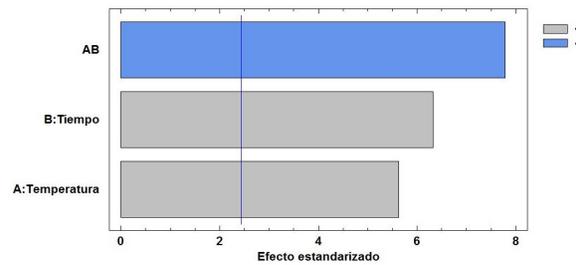
Definiendo la influencia de las variables en estudio sobre la variable de respuesta, en la Figura 2, se muestran las gráficas de efectos principales sobre el porcentaje de carbono fijo, se observa que a una temperatura de 400 °C y tiempo de residencia de 120 min, se tiene un mayor contenido de carbono fijo para cada una de las mezclas en estudio, lo que indica que a estas condiciones de operación se tiene un material carbonizado con mayor contenido de carbono en su estructura, además que al presentar el mismo comportamiento para cada caso, se puede decir que independientemente de la materia prima a utilizar y la proporción usada, a estas condiciones



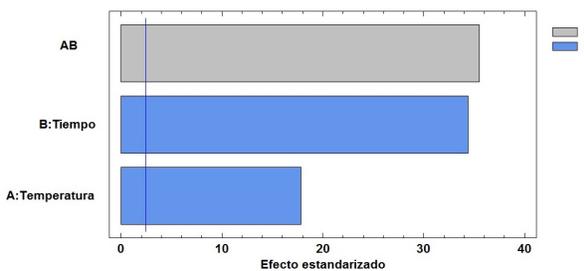
(a) bagazo de caña



(b) endocarpio de coco



(c) mezcla 50:50

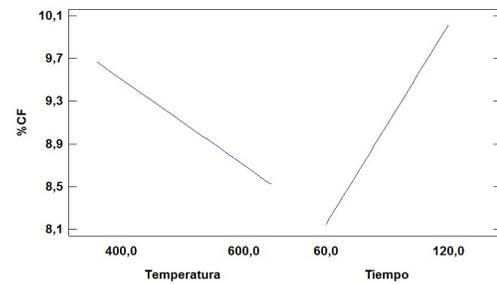


(d) mezcla 80:20

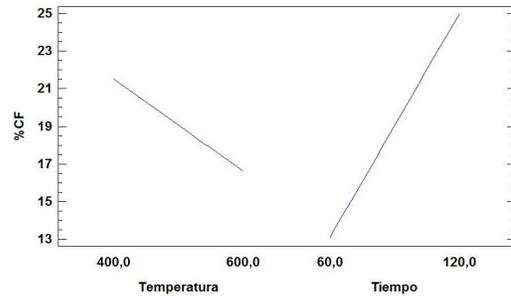
Figura 1: Diagrama de Pareto estandarizado del análisis de varianza, etapa de carbonización.

de operación, se favorece el incremento del carbono fijo.

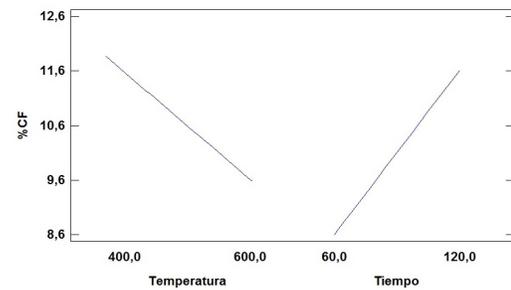
Para comprobar el supuesto de normalidad del experimento, en la Figura 3 se muestra el gráfico de probabilidad normal, donde se puede apreciar una tendencia lineal para cada caso en estudio, lo que esto comprueba el supuesto de normalidad tomado en el diseño de experimento, basándose en



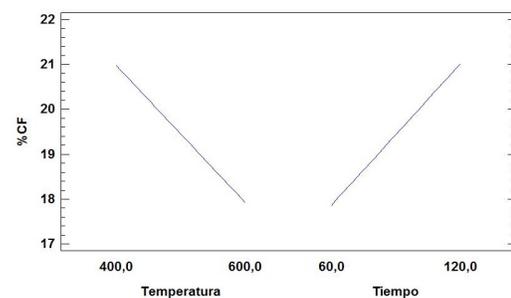
(a) bagazo de caña



(b) endocarpio de coco



(c) mezcla 50:50



(d) mezcla 80:20

Figura 2: Gráficas de efectos principales, etapa de carbonización.

lo establecido por Montgomery [11], de acuerdo con los modelos de regresión según las ecuaciones (1), (2), (3) y (4) para el porcentaje de carbono fijo, cuyos resultados se muestran en la Tabla 7.

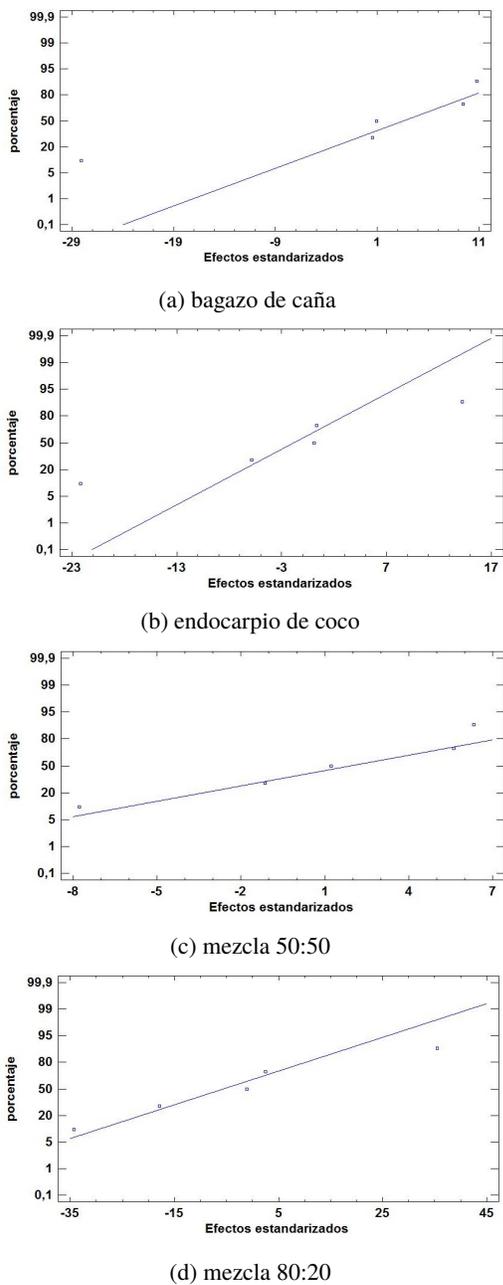


Figura 3: Gráfico de probabilidad normal para el porcentaje de carbono fijo, etapa de carbonización

$$\%CF_B = -30 + 0,07T + 0,0365t - 0,00069Tt, \quad (1)$$

$$\%CF_C = -125,8 + 0,254T + 1,74556t - 0,0030Tt, \quad (2)$$

Tabla 7: Coeficientes de la superficie de respuesta de un modelo cuadrático múltiple del porcentaje de carbono fijo, etapa de carbonización.

| Precursor | β_0 | β_1 | β_2 | β_3 | R^2 |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------|
| Bagazo | -30 | 0,07 | 0,0365 | -0,0006 | 0,6227 |
| Coco | -125,8 | 0,254 | 1,7455 | -0,003 | 0,9918 |
| M _{50:50} | -24,36 | 0,06 | 0,2844 | -0,0005 | 0,9328 |
| M _{80:20} | 11,2 | 0,007 | 0,1733 | -0,0002 | 0,8592 |

M_{50:50}: mezcla bagazo de caña de azúcar-endocarpio de coco 50:50; M_{80:20}: mezcla bagazo de caña de azúcar-endocarpio de coco 80:20.

$$\%CF_{50:50} = -24,36 + 0,061T + 0,284t - 0,0004Tt, \quad (3)$$

$$\%CF_{80:20} = 11,2 + 0,007T + 0,1733t - 0,00024Tt, \quad (4)$$

donde:

$\%CF_B$: porcentaje de carbono fijo utilizando bagazo de caña de azúcar, (%).

$\%CF_C$: porcentaje de carbono fijo utilizando endocarpio de coco, (%).

$\%CF_{50:50}$: porcentaje de carbono fijo utilizando una mezcla de bagazo de caña de azúcar y endocarpio de coco 50:50, (%).

$\%CF_{80:20}$: porcentaje de carbono fijo utilizando una mezcla de bagazo de caña de azúcar y endocarpio de coco 80:20, (%).

T : temperatura, (°C).

t : tiempo de residencia, (min).

Al graficar los modelos de regresión, se obtuvieron los gráficos mostrados en la Figura 4, al analizar el comportamiento del porcentaje de carbono fijo se observa que, para una temperatura de 400 °C, se tiene mayor porcentaje de carbono fijo al aumentar el tiempo de residencia, indicando que se descompone la mayor cantidad de material volátil, por lo que se obtiene un material con mayor contenido de carbono. Para una temperatura de 600 °C, se observa que a un mayor tiempo de residencia, el porcentaje de carbono fijo disminuye,

este comportamiento puede ser a consecuencia a que, al tener un mayor tiempo de residencia, no sólo se descompone material volátil, sino también parte de la estructura sólida del carbonizado.

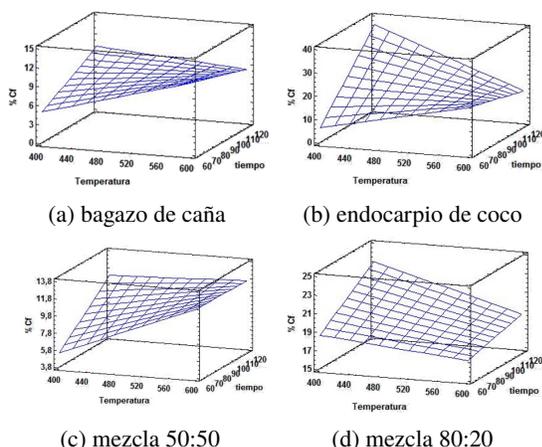


Figura 4: Superficie de respuesta del porcentaje de carbono fijo del carbón producido a partir de los diferentes casos de producción, etapa de carbonización.

En cada superficie de respuesta, se observa un punto máximo en 400 °C por 120 min mostrado en la Figura 4, indicando que, a éstas condiciones de operación, se obtiene un material carbonizado con un alto contenido de carbono, además que para una mezcla de 100:0, 0:100 y 80:20 de coco-bagazo respectivamente se tiene mayor contenido de carbono fijo a comparación de una mezcla 50:50.

Por lo que todo este análisis estadístico, conlleva a definir que las mejores condiciones de operación para la etapa de carbonización son las mostradas en la Tabla 8.

Tabla 8: Porcentaje de carbono fijo a las diferentes condiciones de operación, etapa de carbonización.

| Condiciones de operación para la carbonización | |
|--|---|
| Temperatura, [°C] | 400 |
| Tiempo, [min] | 120 |
| Proporción de materia prima | 100 % C-0 % B 0 % C-100 % B 80 % C-20 % B |

B: bagazo de caña de azúcar; C: endocarpio de coco.

4.3.2. Activación

Una vez realizado el diseño de experimento y procesado los datos obtenidos, se obtuvieron los resultados reportados en la Tabla 9.

Tabla 9: Índice de azul de metileno del carbón activado producido a partir de los diferentes precursores en estudio, etapa de activación.

| Factor | | Índice de azul de metileno prom. ($I_{AM_{prom}} \pm 0,3$) [mL/mg] | | |
|--------------|------------------|--|------|--------------------|
| T (T±1) [°C] | t (t±0,01) [min] | B | C | M _{80:20} |
| 700 | 60 | 32,7 | 38 | 35,3 |
| 900 | 60 | 18,7 | 31,3 | 23,3 |
| 700 | 120 | 66 | 75 | 68,7 |
| 900 | 120 | 16,3 | 21,3 | 21,3 |

B: bagazo de caña de azúcar; C: endocarpio de coco.
M_{80:20}: mezcla bagazo de caña de azúcar-endocarpio de coco 80:20.

A partir de los resultados mostrados en la Tabla 9, se realizó un análisis de varianza mostrado en la Figura 5, el cual se aprecia que las barras de los efectos estandarizados cruzan a la línea de referencia, lo que indica que la temperatura, el tiempo de residencia y la interacción entre ellas son estadísticamente significativas sobre la variable de respuesta (índice de azul de metileno). Por otra parte, también se observa que la temperatura tiene mayor efecto sobre el índice de azul de metileno en comparación de las otras variables, siguiendo la interacción entre las variables en estudio y por último el tiempo de residencia.

Definiendo la influencia de las variables en estudio sobre la variable de respuesta, en la Figura 6 se muestra los gráficos de efectos principales, en estas se observan que a una temperatura de 700 °C y tiempo de residencia de 120 min, se tiene un mayor índice de azul de metileno en cada uno de los casos, lo que indica que a estas condiciones de operación se tiene mayor adsorción de moléculas de azul de metileno por parte del carbón.

Por otra parte, para comprobar el supuesto de normalidad del diseño de experimento planteado, en la Figura 7, se muestra el gráfico de probabilidad normal para cada caso en estudio. Como se puede

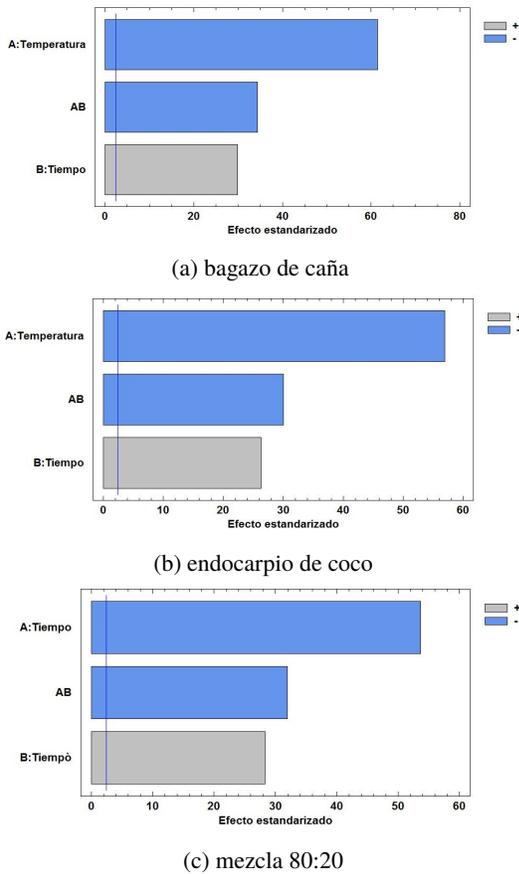


Figura 5: Diagrama de Pareto estandarizado del análisis de varianza, etapa de activación.

apreciar los datos se ajustan a una tendencia lineal, por lo que basándose en lo estipulado por Montgomery [11], el supuesto de distribución normal se cumple.

Comprobada la distribución normal, es de interés representar los datos en un modelo de regresión, por lo que partiendo de un modelo matemático lineal múltiple de acuerdo con la ecuación (5), se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 10.

$$y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \varepsilon \quad (5)$$

El coeficiente de determinación R^2 , como se observa en la Tabla 10, es cercano a uno para cada caso en evaluación; por lo que, basándose en el concepto de este coeficiente, se tiene una alta confiabilidad del modelo de regresión, según las ecuaciones (6), (7) y (8):

$$\%Iam_B = 137,5 - 0,1592T + 0,2583t \quad (6)$$

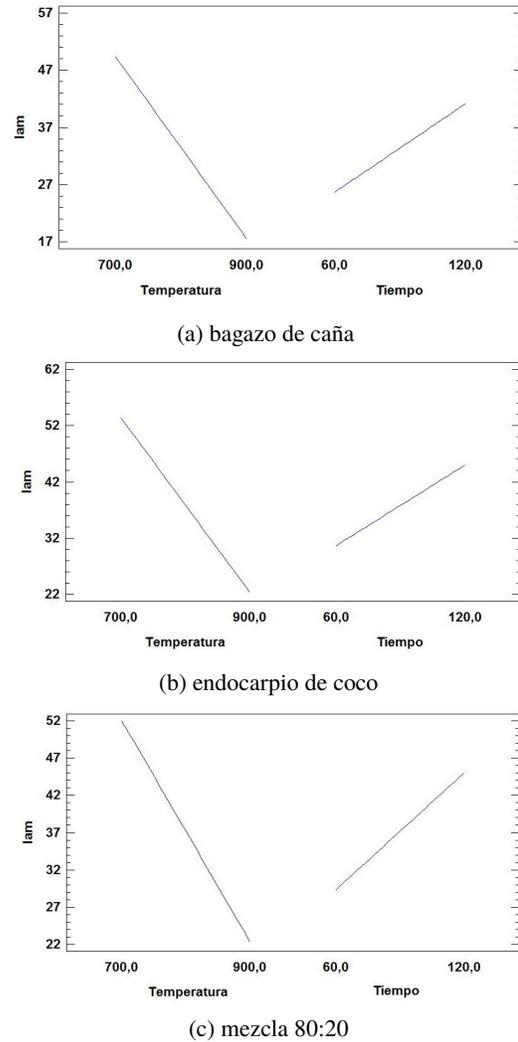


Figura 6: Gráficas de efectos principales, etapa de activación.

Tabla 10: Coeficientes de la superficie de respuesta de un modelo cuadrático múltiple del índice de azul de metileno, etapa de activación.

| Precursor | β_0 | β_1 | β_2 | R^2 |
|--------------|-----------|-----------|-----------|--------|
| Bagazo | 137,5 | -0,1592 | 0,2583 | 0,7966 |
| Coco | 133,5 | -0,1425 | 0,2528 | 0,6848 |
| Mezcla 80:20 | 132,3 | -0,1483 | 0,2611 | 0,7817 |

$$\%Iam_C = 133,5 - 0,1425T + 0,2528t \quad (7)$$

$$\%Iam_{80:20} = 132,3 - 0,1483T + 0,2611t \quad (8)$$

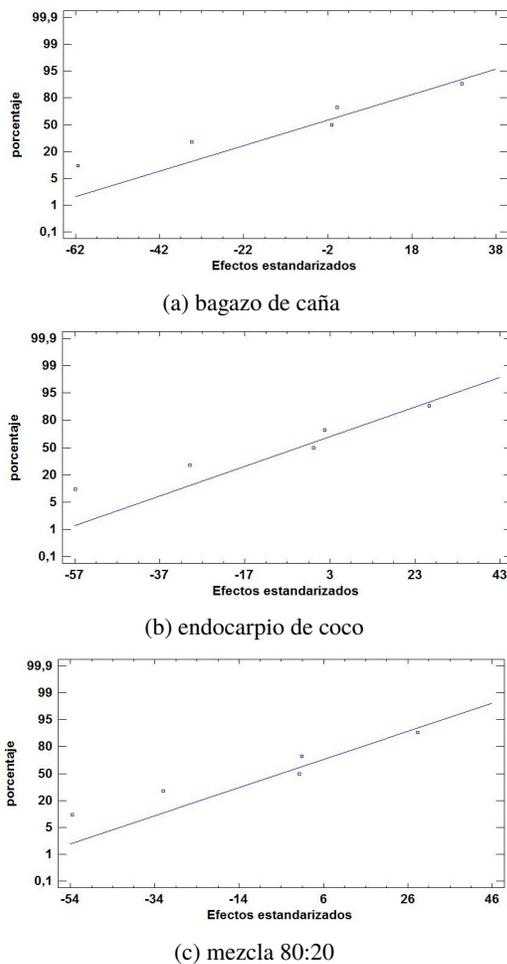


Figura 7: Gráfico de probabilidad normal para el porcentaje de carbono fijo, etapa de activación.

donde:

$%Iam_B$: índice de azul de metileno de carbón activado producido a partir del bagazo de caña de azúcar.

$%Iam_C$: índice de azul de metileno de carbón activado producido a partir del endocarpio de coco.

$%Iam_{80:20}$: índice de azul de metileno de carbón activado producido a partir de una mezcla 80:20 de endocarpio de coco y bagazo de caña de azúcar.

Al graficar los modelos de regresión, se obtienen las superficies de respuesta mostradas en la Figura 8, donde se evidencia que para una temperatura de 700 °C, se tiene mayor índice de azul de metileno al aumentar el tiempo de residencia, este comportamiento es a consecuencia

de un mayor tiempo de reacción del vapor de agua con el material carbonizado lo cual aumenta el área superficial, por lo que este puede adsorber una mayor cantidad de moléculas de azul de metileno. Por otra parte, para una temperatura de 900 °C se observa que el índice de azul de metileno disminuye al aumentar el tiempo de residencia, esto puede ser a causa de un alto tiempo de reacción, el material carbonizado sufre daños en su estructura, que además es favorecido por la alta temperatura de reacción.

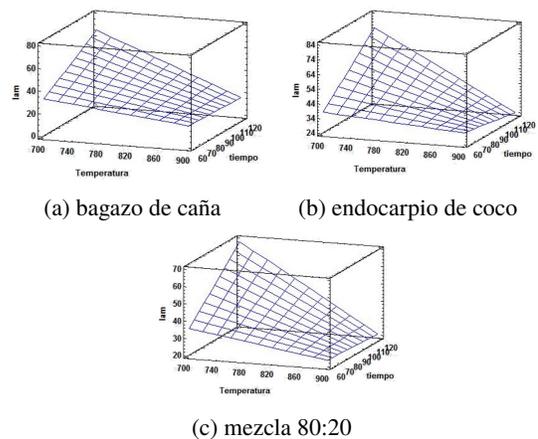


Figura 8: Superficie de respuesta del índice de azul de metileno del carbón activado producido a partir de diferentes precursores, etapa de activación.

Además se puede observar que en cada superficie de respuesta reflejada en la Figura 8, se encuentra un punto máximo en 700 °C por 120 min lo que indica que a estas condiciones de operación, se obtiene una máxima adsorción de moléculas de azul de metileno por parte del carbón activado, para todos los precursores en estudio.

Por lo que todo este análisis estadístico, conlleva a definir que las mejores condiciones de operación para la etapa de activación son las mostradas en la Tabla 11:

4.4. Caracterización del carbón activado producido.

Al procesar los datos de las pruebas físico-químicas del carbón activado, se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 12 con los parámetros típicos para el carbón activado destinado a tratamiento de aguas según las normas

Tabla 11: Condiciones de operación para la etapa de activación.

| Condición | |
|---------------------|---------------|
| Temperatura, [°C] | 700 |
| Tiempo, [min] | 120 |
| Precursor utilizado | 100 % C-0 % B |
| | 0 % C-100 % B |
| | 80 % C-20 % B |

B: bagazo de caña de azúcar; C: endocarpio de coco.

ASTM [15, 16, 17, 18], por lo que al analizar los resultados de las propiedades fisicoquímicas de cada precursor en estudio, se observa que éstos se encuentran dentro del rango especificado, por lo que el carbón activado producido a partir del bagazo de caña de azúcar, endocarpio de coco y una mezcla entre ellos de 20 % y 80 % respectivamente, bajo las condiciones de operaciones establecidas, pueden ser utilizado en esta área.

4.5. Dimensionamiento de los principales equipos requeridos para el proceso de producción de carbón activado.

Según las especificaciones del proceso de producción, se consigue el tiempo de cada ciclo, como lo mostrada en la Figura 9:

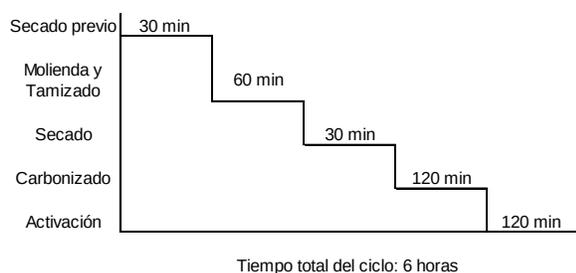


Figura 9: Tiempo de cada ciclo de la línea de producción.

Con la información anterior, y la capacidad instalada seleccionada, se puede calcular el tamaño de cada uno de los lotes a procesar. Con este dato, y con la estructura establecida para el proceso productivo, se obtiene el diagrama de bloque que permitirá realizar los balances de masa necesarios para conseguir la necesidad de materia prima para cada lote, como el mostrado en la Figura 10.

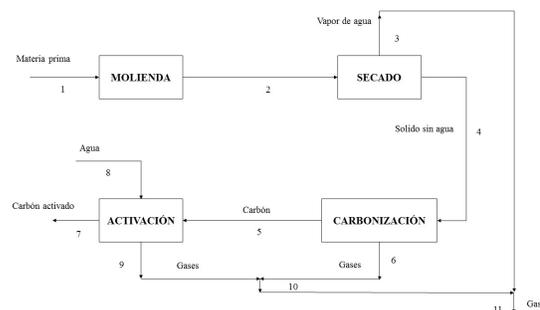


Figura 10: Corrientes de flujo involucradas el proceso de producción de carbón activado.

En la Tabla 13, se puede observar la necesidad de materia prima según cada caso de producción establecido (100 % Bagazo- 100 % Coco- 80 % Coco y 20 % Bagazo), lo que favorece el análisis y dimensionamiento de los equipos establecidos en la selección de la tecnología.

Iniciando con el dimensionamiento de un patio de almacenamiento para el coco que pueda soportar 2 días de producción, se tiene que éste, debe tener una altura de 1,6 m, una longitud de 19 m, un ángulo de apilamiento de 37° asumiendo una base de 5 m.

El diseño y dimensionamiento del horno rotatorio, queda establecido según [19], en el cual se lleva a cabo el proceso de secado, carbonización y activación. El mismo, cuenta con una tolva de alimentación, para el ingreso de la materia prima molida, luego pasa por el sector de secado y carbonización, para, por último, entrar en contacto con la corriente de agua, que al exponerse a las temperaturas internas del horno, se vaporiza y activa al carbón.

Se toman en cuenta las reacciones químicas correspondientes a una combustión completa, con el propósito de garantizar un dimensionamiento que me permita soportar la temperatura máxima a la que puede llegar a exponerse el equipo. Realizando la estequiometría y dejando las ecuaciones pertinentes en función de la cantidad de gas natural que se necesita para la producción establecida, con ayuda de la composición del gas y los contemplados en las reacciones, se tiene que el dimensionamiento del horno corresponde a lo reportado en la Tabla 14. Dichos resultados se

Tabla 12: Condiciones de operación para la etapa de activación.

| Prueba | B | C | M _{80:20} | Rango | Norma |
|--|--------|--------|--------------------|-----------|-------------|
| Número de yodo ($I_y \pm \Delta I_y$) [mg _{I₂} /mg _C] | 604±47 | 765±80 | 685±60 | 500–1200 | ASTM-4607 |
| Humedad (H±0,03) [%] | 13,67 | 14,64 | 12,58 | 2–15 | ASTM D-2867 |
| pH (pH ± 0,03) [adim] | 6,94 | 7,05 | 7,11 | 2–11 | ASTM D-3838 |
| Densidad aparente ($\rho \pm 0,02$) [g/cm ³] | 0,55 | 0,53 | 0,54 | 0,26–0,65 | ASTM-D-2854 |

B: bagazo de caña de azúcar; C: endocarpio de coco; M_{80:20}: mezcla de bagazo de caña de azúcar y endocarpio de coco 80:20, [%].

Tabla 13: Toneladas por cada lote para cada corriente del proceso de producción.

| N° Corriente | Ton/lote de Bagazo | Ton/lote de Coco | Ton/lote de Mezcla |
|--------------|--------------------|------------------|--------------------|
| 1 | 14,13 | 6,71 | 8,91 |
| 2 | 14,13 | 6,71 | 8,91 |
| 3 | 1,28 | 0,61 | 0,81 |
| 4 | 12,85 | 6,1 | 8,1 |
| 5 | 2,39 | 6,1 | 2,19 |
| 6 | 10,46 | 3,86 | 5,9 |
| 7 | 1,08 | 1,08 | 1,08 |
| 8 | 1,91 | 1,79 | 1,76 |
| 9 | 3,23 | 2,96 | 2,87 |
| 10 | 13,68 | 6,82 | 8,78 |
| 11 | 14,97 | 7,43 | 9,59 |

obtienen con ayuda de un balance de energía que tome en cuenta el calor de combustión, de reacción y latente y sensible correspondiente.

Tabla 14: Especificaciones del horno.

| Característica | Valor |
|--|--------|
| Longitud, [m] | 6,0 |
| Diámetro, [m] | 1,8 |
| Necesidad de gas natural, [kgmol/h] | 26,119 |
| Necesidad de agua para la activación, [kgmol/h] | 55,33 |
| Temperatura de entrada de la materia prima, [°C] | 25 |
| Temperatura de salida de la materia prima, [°C] | 700 |
| Temperatura de entrada del gas natural, [°C] | 25 |
| Temperatura de salida de los gases, [°C] | 400 |

Además del horno rotatorio se contemplaron otros equipos necesarios para la culminación efectiva de la producción de carbón activo, cuya distribución se observa en la Figura 11 y el diagrama de flujo de proceso correspondiente se visualiza en la Figura 12.

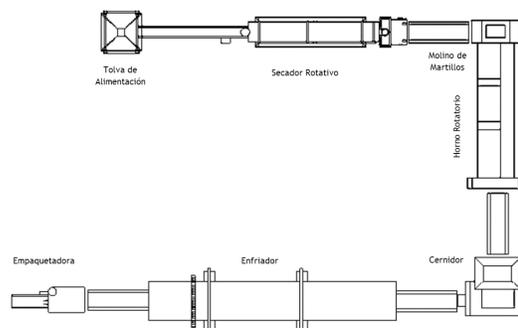


Figura 11: Plano de la línea de producción de carbón activado, vista aérea.

5. Conclusiones

Como resultado del análisis de varianza del diseño de experimento realizado para la etapa de carbonización se encontró, que la temperatura, tiempo de residencia y la interacción entre ellas influyen estadísticamente sobre el porcentaje de carbono fijo (variable de respuesta), además que independientemente del precursor y la proporción de mezcla utilizado, a unas condiciones de operación de 400 ± 1 °C por $120,00 \pm 0,01$ min, producen un material carbonizado con mejores características. Mientras que en el resultado del análisis de varianza del diseño de experimento

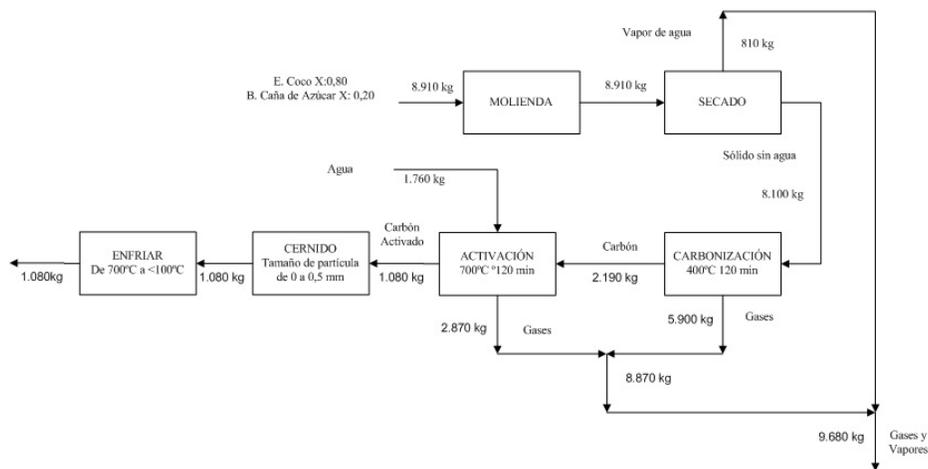


Figura 12: Diagrama de flujo del proceso planteado.

de la etapa de activación, se encontró, que la temperatura, tiempo de residencia y la interacción entre ellas también influyen estadísticamente sobre el índice de azul de metileno (variable de respuesta), obteniéndose que independientemente del precursor y proporción de mezcla utilizado, a unas condiciones de $700 \pm 1^{\circ}\text{C}$ por $120,00 \pm 0,01$ min; producen un carbón activado con mejores características, este análisis estadístico definió que la mejor proporción de mezcla entre bagazo de caña de azúcar-endocarpio de coco es 100:0, 0:100 y 20:80 respectivamente, modelándose así el comportamiento del porcentaje de carbono fijo e índice de azul de metileno (variable de respuesta) en función de la temperatura y tiempo de residencia (variable manipulada) con un coeficiente de determinación R^2 cercano a la unidad para cada caso indicando una alta confiabilidad de los modelos de regresión.

Con estas condiciones de operación, se obtuvieron las dimensiones de los principales equipos que conforman el proceso productivo (el secador rotatorio, el molino de martillo y el horno rotativo), que fueron definidos mediante un análisis de matriz de selección, por lo que a estas condiciones se determinó, que se produce un carbón activado que puede ser utilizado para el área de tratamiento de agua residual ya que se encuentran entre el rango de valores establecidas en las normas ASTM.

6. Referencias

- [1] M. Bastidas, L. Buelvas, M. Márquez, y K. Rodríguez. Producción de Carbón Activado a partir de Precursores Carbonosos del Departamento del Cesar, Colombia. *Revista de la Universidad Popular del Cesar*, 21(3):88, 2010.
- [2] A. Velázquez, E. Bolaños, y Y. Pliego. Optimización de la producción de carbón activado a partir de bambú. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 9(3):359–360, 2010.
- [3] L. Donaciano, A. González, M. Gordon, y N. Martin. Obtención de carbón activado a partir de la cascara de coco. *Revista UAM*, 64:39–40, 2007.
- [4] J. Barragan. Fabricación y caracterización de carbón activado y de nanoplaquetas de carbón a partir de *Guadua angustifolia* Kunth para aplicaciones en electrónica. *Revista de la Academia Colombiana*, 39(153):445, 2015.
- [5] Norma Venezolana COVENIN 1962-82. *Carbón. Determinación de humedad*. COVENIN, Venezuela, 1980.
- [6] Norma Venezolana COVENIN 1647-80. *Carbón. Determinación de materia volátil*. COVENIN, Venezuela, 1980.
- [7] Norma Venezolana COVENIN 1646-80. *Carbón. Determinación de contenido de cenizas*. COVENIN, Venezuela, 1980.
- [8] Norma Venezolana COVENIN 1709-81. *Carbón, análisis inmediatos y elementales, expresión de resultados en diferentes bases*. COVENIN, Venezuela, 1981.
- [9] K.Y. Mathur and D. Slow. *Investigación de operaciones: El arte de toma de decisiones*. Prentice Hall, 1996.
- [10] R. Perry and D. Green. *Manual del ingeniero químico*. McGraw Hill. 7^{ma} edición, México, 2001.

- [11] D. Montgomery. *Diseño y análisis de experimentos*. Limusa Wiley. 2^{da} edición, México, 2004.
- [12] L. Agudelo. Estandarización de proceso de producción de carbón activado por activación física a partir de hueso de palma a escala industrial. Proyecto integral de grado para el título de Ingeniería Química, Fundación Universidad de América, Bogotá D.C, Colombia, 2017.
- [13] E.U. Politecnica Universidad de Sevilla. *Manual del carbón activado*. E.U. Politecnica Universidad de Sevilla, España.
- [14] Norma Técnica Colombiana 4467. *Producto químicos industriales. Carbón activado. Métodos de ensayo*. Colombia, 1998.
- [15] ASTM D2854-09. *Standard Test Method for Apparent Density of Activated Carbon*. ASTM International, West Conshohocken, PA, United States, 2009.
- [16] ASTM D4607-94 (Reapproved 2006). *Standard Test Method for Determination of Iodine Number of Activated Carbon*. ASTM International, West Conshohocken, PA, United States, 2006.
- [17] ASTM D-3838-80 (Reapproved 1999). *Standard Test Method for pH of Activated Carbon*. ASTM International, West Conshohocken, PA, United States, 1999.
- [18] ASTM D2854 - 09(2019). *Standard Test Method for Apparent Density of Activated Carbon*. ASTM International, West Conshohocken, PA, United States, 2014.
- [19] F. Céliz e I. Forneris. Diseño de una planta de generación de carbón activado obtenido a partir de carozos de aceitunas mediante activación térmica. Proyecto Integrador. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, 2018.