

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO**

**FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**

**CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**PROYECTO DE GRADO**



**OBTENCIÓN EXPERIMENTAL DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE  
LAS BORRAS DE CAFÉ**

**Por:**

**MARIA EUGENIA AQUINO PAITA**

**Modalidad de Graduación (Investigación Aplicada) presentado a consideración  
de la “UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO”, como  
requisito para optar el grado académico de Licenciatura en Ingeniería Química.**

**Agosto de 2022**

**TARIJA – BOLIVIA**

V°B°

\_\_\_\_\_  
M.sc. Ing. Aurelio José Navia Ojeda

DECANO

\_\_\_\_\_  
M.sc. Ing. Marlene B. Simons Sanchez

VICEDECANA

**APROBADA POR:**

**TRIBUNAL:**

\_\_\_\_\_  
Ing. Miguel Vargas Coro

\_\_\_\_\_  
Ing. Karina Cervantes Calbimonte

\_\_\_\_\_  
Ing. Maiza Paz Aldana

**Advertencia**

El tribunal calificador del presente trabajo, no se solidariza con la forma, términos, modos y expresiones vertidas en el mismo, siendo éstas responsabilidad del autor.

**Dedicatoria:**

Este proyecto está dedicado primeramente a Dios y a toda mi familia principalmente a mis padres que han sido mi pilar fundamental para seguir adelante, brindándome todo su apoyo incondicional para poder llegar a esta instancia.

A mi tía Gladis, aunque no esté físicamente, sé que desde el cielo siempre me cuida y guía mis pasos para que todo salga bien.

**Agradecimientos:**

Gracias a Dios por darme el don de la perseverancia para alcanzar mis metas, iluminando mi camino día tras día.

A mi familia principalmente a mis padres Rene Aquino y Eusebia Paita, a mis hermanas Gisela y Tania, y a mi pareja Osmar por apoyarme incondicionalmente en cada decisión y proyecto, se los agradezco y hago presente mi gran amor hacia ustedes mi hermosa familia.

De igual manera mi más sincero agradecimiento a mi amigo y tutor Ing. Ariel Mamani por brindarme su apoyo durante el desarrollo de este proyecto de tesis.

Gracias a la universidad Juan Misael Saracho por darme la oportunidad de formarme profesionalmente. A mis docentes y demás personas que de una u otra manera aportaron para el desarrollo del presente proyecto.

No ha sido sencillo el camino hasta ahora, pero gracias a sus aportes a su amor y su apoyo incondicional, lo complicado de lograr esta meta finalmente se ha realizado.

## Resumen

El presente trabajo de investigación aplicada “Obtención experimental de carbón activado a partir de las borras de café” se desarrolló en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, para el cual se utilizó como materia prima las borras de café considerados desechos proveniente de las cafeterías del departamento de Tarija cuyo proveedor de café de los mismos es la empresa industrial “CAFÉ IDEAL” ubicada en el departamento de Santa Cruz. Esta industria produce un café 100% boliviano, de variedad arábica en la región de Los Yungas, siendo reconocida esta zona como productora de un excelente café.

Obtener carbón activado a partir de las borras de café es una alternativa de utilización del residuo sólido ya que se pretende dar importancia al procesamiento de las borras de café en la elaboración de carbón activado.

El carbón activado es materia carbonizada de origen vegetal o mineral debido a que presenta un elevado y variado grado de porosidad, una considerable superficie interna y un cierto contenido de grupos químicos superficiales principalmente de oxígeno y nitrógeno que lo hacen tener gran capacidad para adsorber ciertas sustancias las cuales se utilizan para la purificación de líquidos y gases.

Para la selección del método de obtención de carbón activado se evaluó el método de activación química y activación física en función de una tabla de calificación en un rango de valores para dichos criterios, donde la calificación asignada se realizó en base a la Escala Likert. Es así como se seleccionó el método de activación química porque obtuvo el puntaje más alto de calificación.

Para obtener el carbón activado de las borras de café se estableció un diseño factorial de  $2^3$ , es decir de 2 niveles, 3 variables por lo que el número de combinaciones fue de ocho experimentos y ocho repeticiones, las variables del proceso fueron temperatura de (450°C y 550°C), Concentración de ácido fosfórico de (30% y 40%) y un tiempo de carbonización de ( 2 y 3 horas) cuya relación materia prima/ácido es de 1:3 p/v, obteniendo como

variable respuesta el área superficial en función al índice de yodo y el % de remoción del azul de metileno.

Los resultados obtenidos demuestran que la mejor alternativa de obtención de carbón activado de borras de café es carbonizar la muestra a una temperatura de 450°C por un lapso de tiempo de 2 horas, cuya concentración de ácido fosfórico es al 40% dejando la muestra impregnada por un tiempo de 24 horas ya que a estas condiciones se obtuvo 654,1909 m<sup>2</sup>/gr de área superficial en función al índice de yodo ya que mientras más alto sea su valor mayor es su porosidad, en cuanto al % de remoción en función al índice de azul de metileno se tiene un 88,859% de remoción por lo tanto el carbón activado obtenido es apto para la remoción de compuestos orgánicos y para el tratamiento de aguas.

El rendimiento en masa promedio de la mejor muestra de carbón activado obtenido a partir de las borras de café es del 56,778 %, considerándose aceptable para la producción del mismo.

## ÍNDICE

Advertencia .....	i
Dedicatoria: .....	ii
Agradecimientos: .....	iii
Resumen.....	iv

## INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES .....	1
OBJETIVOS.....	5
Objetivo general .....	5
Objetivos específicos .....	5
JUSTIFICACION .....	6
Justificación económica .....	6
Justificación social.....	6
Justificación tecnológica .....	7
Justificación ambiental.....	7

## CAPÍTULO I

### MARCO TEÓRICO

1.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA MATERIA PRIMA.....	8
1.1.1. Definición de las borras de café .....	8
1.1.2. Composición fisicoquímica de las borras de café .....	10
1.1.3. Usos de la borra de café.....	10
1.1.4. Producción de café en Bolivia .....	11
1.2. CARBÓN ACTIVADO .....	12
1.2.1. Características fisicoquímicas del carbón activado.....	14

1.2.1.1. Composición química.....	14
1.2.1.2. Composición física.....	15
1.2.2. Estructura porosa del carbón activado.....	15
1.2.3. Importancia de la química superficial de los carbones .....	17
1.2.4. Tipos de carbón activado según su forma física .....	18
1.2.4.1. Carbón Activado en polvo (CAP) .....	19
1.2.4.2. Carbón activado granular.....	20
1.2.4.3. Carbón activado en pallets.....	21
1.2.4.4. Cintas y telas de carbón activado .....	21
1.2.5. Métodos de activación del carbón activado .....	22
1.2.5.1. Activación Física.....	22
1.2.5.2. Activación Química.....	23
1.2.6. Ventajas y desventajas de los métodos de activación .....	26
1.2.7. Caracterización del carbón activado.....	27
1.2.8. Factores que influyen en el proceso de carbón activado .....	28
1.3. ADSORCIÓN.....	30
1.3.1. Propiedades y condiciones que afectan la adsorción en carbón activado.....	31
1.3.2. Análisis de adsorción del carbón activado.....	32
1.3.2.1. Índice o número de yodo .....	32
1.3.2.2. Índice de azul de metileno .....	33
1.4. CARACTERIZACIÓN DEL PRODUCTO .....	34
1.5. APLICACIONES.....	35

## **CAPÍTULO II**

### **PARTE EXPERIMENTAL**

2.1. DESCRIPCIÓN DE LA MATERIA PRIMA .....	37
2.1.1. Caracterización de la materia prima .....	37
2.2. DESCRIPCIÓN DE LA SELECCIÓN DEL MÉTODO DE INVESTIGACION	37
2.3. CARACTERIZACIÓN DE LAS VARIABLES DEL PROCESO.....	41

2.3.1. Diseño experimental.....	41
2.3.1.1. Planteamiento del dominio experimental .....	41
2.3.1.2. Matriz de experimentos en la etapa de activación del diseño factorial completo 2 <sup>3</sup> .....	42
2.3.1.3. Especificación de las variables del dominio experimental.....	43
2.4. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE OBTENCIÓN EXPERIMENTAL DE CARBÓN ACTIVADO DE BORRAS DE CAFÉ.....	44
2.4.1. Pretratamiento de la materia prima .....	46
2.4.1.1. Recolección de la materia prima.....	46
2.4.2. Caracterización de la materia prima .....	46
2.4.2.1. Determinación del porcentaje de humedad de las borras de café .....	46
2.4.2.2. Determinación de cenizas de las borras de café.....	47
2.4.2.3. Determinación de material volátil de las borras de café .....	49
2.4.2.4. Determinación de carbón fijo .....	50
2.4.3. Lavado .....	50
2.4.4. Secado.....	51
2.4.5. Tamizado .....	52
2.4.6. Pre carbonización .....	53
2.4.7. Impregnación .....	54
2.4.8. Carbonización y Activación.....	56
2.4.9. Lavado .....	58
2.4.10. Secado.....	61
2.4.11. Caracterización del producto obtenido .....	62
2.4.11.1. Determinación del índice del yodo .....	62
2.4.11.2. Determinación del índice del azul de metileno.....	65

### **CAPÍTULO III**

#### **RESULTADOS Y DISCUSION**

3.1. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN DEL PROCESO.....	69
--	----

3.1.1. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA	69
3.1.2. RESULTADOS DEL PRODUCTO OBTENIDO .....	70
3.1.2.1. Resultados de análisis del índice de yodo del carbón activado obtenido .....	70
3.1.2.2. Resultados de análisis del índice de azul de metileno del carbón activado obtenido .....	77
3.1.3. BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA .....	83
3.1.3.1. Balance de materia .....	83
3.1.3.2. Balance de energía .....	94
3.1.4. DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL PROCESO .....	98
3.1.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LAS VARIABLES RESPUESTAS.....	99
3.1.5.1. Análisis estadístico de la variable respuesta área superficial .....	100
3.1.5.2. Análisis estadístico de la variable respuesta porcentaje de remoción .....	106
3.1.6. COMPARACIÓN DE LA MEJOR MUESTRA DE CARBÓN ACTIVADO OBTENIDO CON UNO COMERCIAL.....	112

## **CAPÍTULO IV**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

4.1. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	115
4.1.2. CONCLUSIONES .....	115
4.1.3. RECOMENDACIONES .....	116

## **CAPÍTULO V**

### **BIBLIOGRAFÍA**

5.1. BIBLIOGRAFÍA.....	118
------------------------	-----

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I-1. Residuos obtenidos en el proceso industrial del café, base 1000 g. ....	9
Tabla I-2. Composición y propiedades fisicoquímicas de las borras del café.....	10
Tabla I-3. Producción del café en Bolivia.....	11
Tabla I-4. Composición del carbón activado .....	15
Tabla I-5. Propiedades físicas del carbón activado.....	15
Tabla I-6. Ventajas de los métodos de activación .....	26
Tabla I-7. Desventajas de los métodos de activación .....	26
Tabla I-8. Grado de adsorción según el tipo de activador .....	31
Tabla I-9. Principales parámetros que especifica un carbón activado.....	34
Tabla II-10. Escala de calificación Likert .....	38
Tabla II-11. Selección del método para la obtención experimental de carbón activado.	38
Tabla II-12. Matriz de Decisión para el Método Experimental de Obtención de Carbón Activado .....	40
Tabla II-13. Factores y niveles.....	42
Tabla II-14. Matriz de experimentos en el proceso de obtención. ....	43
Tabla III-15. Resultados del porcentaje de humedad de las borras de café. ....	69
Tabla III-16. Análisis de la caracterización de la materia prima en base seca .....	70
Tabla III-17. Resultados del cálculo del índice de yodo.....	73

Tabla III-18. Réplicas de los resultados del cálculo del índice de yodo.....	74
Tabla III-19. Resultados promedio del índice de yodo.....	75
Tabla III-20. Área superficial de los experimentos del carbón activado obtenido.....	76
Tabla III-21. Área superficial de réplicas del carbón activado obtenido.....	76
Tabla III-22. Promedio del área superficial .....	77
Tabla III-23. Lecturas de absorbancia para la curva patrón con distintas concentraciones de azul de metileno.....	78
Tabla III-24. Lecturas de los experimentos de azul de metileno de las muestras de carbón activado para obtener la masa adsorbida y % de remoción.....	81
Tabla III-25. Lecturas de las réplicas de azul de metileno de las muestras de carbón activado para obtener la masa adsorbida y % de remoción.....	82
Tabla III-26. Promedio del % de remoción del azul de metileno y masa adsorbida.....	82
Tabla III-27. Corrientes del balance de materia para cada experimento y réplica. ....	84
Tabla III-28. Valores de corrientes cada experimento y replica de la etapa de secado...86	
Tabla III-29. Valores de corrientes de cada experimento y réplica de la etapa de pre carbonización.....	88
Tabla III-30. Valores de corrientes de cada experimento y réplica de la etapa de impregnación.....	90
Tabla III-31. Valores de corrientes de cada experimento y réplica de la etapa de Activación .....	92

Tabla III-32. Valores de corrientes de cada experimento y réplica de la etapa de lavado y secado .....	94
Tabla III-33. Rendimiento en masa de los experimentos y réplicas del carbón activado obtenido a partir de las borras de café.....	99
Tabla III-34. Resumen del diseño factorial variable respuesta área superficial.....	100
Tabla III-35. Diseño factorial variable respuesta área superficial.....	100
Tabla III-36. Análisis de varianza (ANOVA) variable respuesta área superficial.....	101
Tabla III-37. Resumen del modelo variable respuesta área superficial.....	101
Tabla III-38. Resumen del diseño factorial variable respuesta % de remoción del azul de metileno .....	106
Tabla III-39. Diseño factorial variable respuesta % de remoción del azul de metileno	106
Tabla III-40. Análisis de varianza (ANOVA) variable respuesta % de remoción del azul de metileno .....	107
Tabla IV-41. Resumen del modelo variable respuesta % de remoción del azul de metileno .....	107
Tabla III-42. Comparación entre Carbones Activados .....	112

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración I-1. Borrás de café .....	9
Ilustración 1-2. Carbón activado a partir de borra de café.....	14
Ilustración I-3. Representación esquemática de la estructura de un carbón activado .....	16
Ilustración I-4. Adsorción de componentes sobre superficie del carbón activado.....	17
Ilustración I-5. Representación esquemática de los principales grupos superficiales que pueden encontrarse en un carbón. ....	18
Ilustración I-6. Carbón activado según su forma física. ....	19
Ilustración I-7. Representación gráfica del carbón activado en polvo .....	20
Ilustración I-8. Representación gráfica carbón activado granular .....	20
Ilustración I-9. Representación gráfica carbón activado en pallets .....	21
Ilustración I-10. Proceso de adsorción.....	30
Ilustración II-11. Recepción de la materia prima.....	46
Ilustración II-12. Secador de infrarrojo.....	47
Ilustración II-13. Peso y secado del crisol .....	47
Ilustración II-14. mufla a 700°C .....	48
Ilustración II-15. Muestras en desecador y cenizas obtenidas.....	48
Ilustración II-16. Crisoles en mufla .....	49
Ilustración II-17. Lavado de materia prima (borra de café).....	51

Ilustración II-18. Proceso de secado de las borras de café. ....	51
Ilustración II-19. Proceso de tamizado de las borras de café.....	52
Ilustración II-20. Borras de café retenidas en el proceso de tamizado .....	53
Ilustración II-21. Borras de café pre carbonizada.....	54
Ilustración II-22. Impregnación de las borras de café.....	55
Ilustración II-23. Filtración de la muestra impregnada.....	56
Ilustración II-24. Mufla .....	56
Ilustración II-25. Retiro de crisoles de la mufla con ayuda de pinzas .....	57
Ilustración II-26. Carbón activado obtenido .....	58
Ilustración II-27. Agua destilada caliente. ....	59
Ilustración II-28. Lavado del carbón activado. ....	60
Ilustración II-29. Filtración y Ph del carbón activado lavado.....	61
Ilustración II-30. Etapa de secado y pulverizado del carbón activado obtenido .....	61
Ilustración II-31. Almacenamiento del carbón activado.....	62
Ilustración II-32. Carbón activado pesado. ....	62
Ilustración II-33. Ebullición del HCl .....	63
Ilustración II-34. Filtración de la muestra preparada.....	64
Ilustración II-35. Titulación con tiosulfato de sodio de la muestra preparada .....	65
Ilustración II-36. Soluciones preparadas para la curva de calibración. ....	66

Ilustración II-37. Muestra de azul de metileno con 2mg/l para análisis. ....	67
Ilustración II-38. Filtración de la solución decolorada .....	67
Ilustración II-39. Espectrofotómetro.....	68

## INDICE DE DIAGRAMAS

Diagrama I-1. Diagrama del proceso en la activación Física o térmica .....	23
Diagrama I-2. Diagrama de la activación química .....	24
Diagrama II- 3. Diagrama del proceso tecnológico empleado para la obtención de carbón activado a partir de la borra de café. ....	45
Diagrama III-4. Diagrama de Flujo General del proceso de obtención de carbón activado de borras de café.....	83

## INDICE DE GRAFICAS

<b>Gráfica III-1</b> Curva de calibración y ecuación de concentración .....	78
<b>Gráfica III-2.</b> Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para el área superficial	102
<b>Gráfica III-3.</b> Efectos principales para el Área Superficial.....	103
<b>Gráfica III-4.</b> Probabilidad normal variable respuesta área superficial .....	104
<b>Gráfica III-5.</b> Gráfica de cubos (medidas ajustadas) del área superficial.....	105
<b>Gráfica III-6.</b> Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para el % de remoción del azul de metileno.....	108
<b>Gráfica III-7.</b> Efectos principales del % de remoción del azul de metileno .....	109
<b>Gráfica III-8.</b> Probabilidad normal variable respuesta para el % de remoción del azul de metileno .....	110

**Gráfica III-9.** Residuo vs orden para el % de remoción del azul de metileno .....111

**Gráfica III-10.** Gráfica de cubos (medias ajustadas) del % de remoción del azul de metileno .....111

## ÍNDICE DE ANEXOS

**ANEXO A:** ESPECIFICACIÓN DE EQUIPOS Y MATERIALES UTILIZADOS EN LA EXPERIMENTACIÓN

**ANEXO B:** MÉTODO ESTANDAR DE DETERMINACIÓN DE ÍNDICE DE YODO DEL CARBON ACTIVADO (ASTM D-4607)

**ANEXO C:** TABLA DE FACTOR DE CORRECCIÓN PARA N° DE YODO

**ANEXO D:** DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE AZUL DE METILENO

**ANEXO E:** ESTIMACIÓN DE COSTOS