

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

PROYECTO DE GRADO



**OBTENCIÓN EXPERIMENTAL DE CARBÓN ACTIVADO DE
CÁSCARA DE PLÁTANO (*Musa Cavendishii*), PROVENIENTE
DEL TRÓPICO BOLIVIANO, MEDIANTE ACTIVACIÓN
QUÍMICA**

Por:

PAOLA MISHÉL LÓPEZ DONAIRE

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

Septiembre 2022

TARIJA – BOLIVIA

VºBº

M.Sc. Ing. Marcelo Segovia

DECANO

Facultad de Ciencias y Tecnología

M.Sc. Ing. Gustavo Succi

VICEDECANO

Facultad de Ciencias y Tecnología

APROBADA POR:

TRIBUNAL:

Ing. Juan Carlos Vega Knez

Ing. Pablo Arduz Mendieta

Ing. Jacqueline Romero Soruco

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

El presente proyecto, está dedicado a mis padres Carlos López Rivera y Paola Donaire Alfaro por ser el pilar más importante en mi vida y por demostrarme siempre su amor, comprensión, apoyo incondicional para que pueda lograr una meta más en mi vida.

Y a mi hermano Roberto López Donaire por su apoyo y cariño durante todo este proceso.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por darme una familia maravillosa, quienes han creído en mí siempre, dándome ejemplo de superación, humildad y sacrificio, enseñándome a valorar todo lo que tengo, agradezco a mi familia por su apoyo incondicional y por darme la oportunidad de concluir mis estudios.

Finalmente agradezco a Kevin Sánchez Orosco por brindarme todo su apoyo durante esta etapa de mi vida.

“Nunca consideres el estudio como una obligación, sino como una oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber.”

Albert Einstein.

ÍNDICE

Advertencia.....	i
Dedicatoria.....	ii
Agradecimiento.....	iii
Pensamiento.....	iv
Resumen.....	v

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES.	1
1.1.1. Generalidades.....	1
1.1.2. Conceptualización de la idea del proyecto	3
1.1.3. Descripción y caracterización del producto.....	4
1.1.4. Aplicaciones del producto	5
1.1.5. Aspectos del mercado.....	8
1.1.5.1. Mercado consumidor	8
1.1.5.2. Mercado Competidor.....	9
1.1.6. Procesos tecnológicos empleados	12
1.1.7. Materia Prima.....	13
1.1.8. Identificación del problema	15
1.1.8.1. Actores involucrados en el Proyecto	15
1.1.9. Planteamiento Técnico propuesto	16
1.2. Objetivos.	16
1.2.1. Objetivo General	16
1.2.2. Objetivos Específicos	16
1.3. Justificación e importancia del proyecto.....	17

1.3.1.	Justificación técnica	17
1.3.2.	Justificación Económica	17
1.3.3.	Justificación Social.....	17
1.3.4.	Justificación ambiental	17

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.	MARCO TEÓRICO.	19
2.1.	Plátano.....	19
2.1.1.	Composición química de la cáscara de plátano.	21
2.1.2.	Propiedades funcionales de la cáscara de plátano.....	21
2.2.	Carbón Activado.....	23
2.2.1.	Composición Física Y Química Del Carbón Activado	24
2.2.1.1.	Composición Química	24
2.2.1.2.	Composición Física	25
2.3.	Métodos de Activación del Carbón	26
2.3.1.	Activación Física del Carbón Activado.....	27
2.3.2.	Activación Química Del Carbón Activado.....	27
2.3.2.1.	La activación química con $ZnCl_2$	28
2.3.2.2.	La activación química con H_3PO_4	28
2.3.2.3.	La activación química con KOH	31
2.4.	Tipos de carbones activados.....	31
2.4.1.	Carbón activado granular.....	32
2.4.2.	Carbón activado en polvo	32
2.4.3.	Carbón activado pelletizado	33

2.5. Adsorción	35
2.5.1. Tipos de Adsorción	36
2.5.1.1. Adsorción Física o Fisorción.....	36
2.5.1.2. Adsorción Química o Quimisorción	36
2.5.2. Ley de Debouguer-Lambert-Beer	37
2.6. Características y especificaciones de calidad del carbón activado	37
2.6.1. Características del Carbón Activado	38
2.6.2 Descripción de las especificaciones de calidad del carbón activado	40
2.6.2.1. Número de yodo y área superficial	40
2.6.2.2. Área superficial específica BET.....	40
2.6.2.3. Radio medio de poro	40
2.6.2.4. Volumen total de poro	41
2.6.2.5. Densidad aparente	41
2.6.2.6. Dureza.....	41
2.6.2.7. Rango de tamaño de partícula, tamaño efectivo de partícula y coeficiente de uniformidad	42
2.6.2.8. Contenido de cenizas totales	42
2.6.2.9. pH Del extracto acuoso.....	43

CAPÍTULO III

PARTE EXPERIMENTAL

3. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO.....	44
3.1. Descripción conceptual y esquemática de la metodología del estudio	44
3.1.1. Selección del proceso tecnológico industrial.....	45

3.1.2.	Proceso tecnológico industrial de la obtención de carbón activado mediante activación química	49
3.1.2.1.	Proceso de carbonización	49
3.1.2.2.	Proceso de activación	49
3.1.3.	Diseño factorial	52
3.1.4.	Variables dependientes	55
3.1.5.	Variables independientes	55
3.2.	Diseño del método experimental seleccionado	55
3.3.	Recepción de la materia prima	56
3.4.	Caracterización de la materia prima	57
3.4.1.	Determinación del porcentaje humedad de la cáscara de plátano.....	57
3.4.1.1.	Procedimiento para realizar el análisis de humedad	57
3.4.2.	Determinación de cenizas de la cáscara de plátano	58
3.4.2.1.	Procedimiento para realizar el análisis de cenizas	58
3.4.3.	Determinación del material volátil de la cáscara de plátano	59
3.4.3.1.	Procedimiento para realizar el análisis de determinación de material volátil.....	59
3.4.4.	Determinación del carbón fijo en la cáscara de plátano	60
3.4.4.1.	Procedimiento para la determinación de carbón fijo.....	60
3.5.	Procedimiento para la obtención de carbón activado a partir de cáscara de plátano (Musa Cavendishii).....	61
3.5.1.	Secado de la cáscara de plátano	61
3.5.1.1.	Procedimiento para el secado de la cáscara de plátano	61
3.5.2.	Trituración y tamizado de la cáscara de plátano	62
3.5.2.1.	Procedimiento para la trituración	62

3.5.2.2.	Procedimiento para el tamizado	63
3.5.3.	Pre-carbonización de la cáscara de plátano	64
3.5.3.1.	Procedimiento para la pre-carbonización de la cáscara de plátano.....	64
3.5.4.	Impregnación	65
3.5.4.1.	Procedimiento para la impregnación.....	66
3.5.5.	Carbonización y activación.....	66
3.5.5.1.	Procedimiento para la impregnación.....	67
3.5.6.	Lavado	68
3.5.6.1.	Procedimiento para el lavado.....	68
3.5.7.	Secado.....	69
3.5.7.1.	Procedimiento para el secado	69
3.6.	Caracterización del producto obtenido	70
3.6.1.	Determinación del índice de azul de metileno	70
3.6.1.1.	Procedimiento para la determinación de la curva de calibración de la solución de azul de metileno	70
3.6.1.2.	Procedimiento para la decoloración de la solución de azul de metileno para determinar el porcentaje de remoción.....	71
3.6.2.	Determinación del índice de Yodo.....	73
3.6.2.1.	Procedimiento de la determinación del índice de yodo.....	73
3.6.3.	Determinación de la densidad aparente del carbón activado	76
3.6.3.1.	Procedimiento para la determinación de la densidad aparente	76

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	77
----	------------------------------	----

4.1. Resultados de la caracterización de la cáscara de plátano.....	77
4.1.1. Resultados de la determinación del porcentaje humedad de la cáscara de plátano.....	77
4.1.2. Caracterización de la materia prima en base seca.....	77
4.2. Resultados de la determinación del índice de azul de metileno	78
4.2.1. Curva de calibración de la solución de azul de metileno	78
4.2.2. Fórmulas utilizadas para el cálculo del índice de azul de metileno	79
4.2.3. Resultados del análisis del índice de azul de metileno de la cáscara de plátano pre-carbonizada	80
4.2.4. Resultado del índice de azul de metileno del producto obtenido.....	81
4.3. Resultados de la determinación del índice yodo.....	87
4.3.1. Fórmulas utilizadas para el cálculo del índice de yodo.....	87
4.3.2. Resultados del análisis del índice de yodo de la cáscara de plátano pre-carbonizada.....	88
4.3.3. Resultados del índice de yodo del producto obtenido.....	88
4.4. Resultados del área superficial	93
4.5. Resultados de la determinación de la densidad aparente en base seca.	94
4.5.1 Formula para el cálculo de la densidad aparente	94
4.5.2. Resultado de la determinación de la densidad aparente de la cascara de plátano pre-carbonizada	95
4.5.3. Resultados de la determinación de la densidad aparente del producto obtenido.....	95
4.6. Determinación de los rendimientos y eficiencias de adsorción de los carbones activados obtenidos.....	98
4.7. Selección del mejor método estudiado de obtención de carbón activado.	101

4.8. Comparación del mejor carbón activado obtenido con uno comercial	101
4.9. Prueba de aplicación	102
4.9.1. Decoloración y regulación del pH del agua residual	102
4.10. Balance de materia y energía	104
4.10.1. Balance de materia por proceso	107
4.10.1.1. Balance de materia en el proceso de pre carbonización	107
4.10.1.2. Balance de materia del proceso de impregnación con ácido fosfórico	108
4.10.1.3. Balance de materia del proceso de activación	111
4.10.1.4. Balance de materia del proceso de lavado y secado.....	112
4.10.2. Balance de energía	114
4.10.2.1. Balance de energía por proceso.....	115
4.10.2.2. Balance de energía en el proceso de pre carbonización	116
4.10.2.3. Balance de energía en el proceso de activación química.....	116
4.10.2.4. Balance de energía en el proceso de secado	118
4.11. Análisis estadístico del diseño factorial	118
4.11.1. Análisis estadístico del % de remoción	119
4.11.2. Análisis estadístico del área superficial.....	125
4.11.3. Análisis estadístico de la densidad aparente	132
4.11.4. Análisis estadístico del rendimiento del proceso	138

CAPÍTULO V

COSTOS DEL PROYECTO

5. COSTOS DEL PROYECTO.....	144
5.1. Evaluación de costos	144
5.2. Costos de la elaboración del carbón activado de cáscara de plátano	147

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	149
6.1. Conclusiones.....	149
6.2. Recomendaciones.....	152

BIBLIOGRAFÍA

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	153
------------------------------------	-----

ANEXOS

ANEXO 1: Equipos Y Materiales Utilizados.....	157
ANEXO 2: Método de prueba estándar para la determinación de índice de yodo del carbón activado (ASTM D4607-14).....	161
ANEXO 3: Determinación de índice de yodo.....	165
ANEXO 4: Factor de corrección para N ° de yodo.....	167
ANEXO 5: Determinación índice de azul de metileno.....	168
ANEXO 6: ASTM D-2854 Activated Carbon Apparent Density Test.....	169
ANEXO 7: Descripción y fichas de seguridad de los reactivos utilizados	170
ANEXO 8. Facturas y cotizaciones	191
ANEXO 9: Fotografías de la investigación.....	193

ÍNDICE DE CUADROS Y/O TABLAS

Cuadro I-1: Aplicación de los distintos carbones activados en aguas residuales.....	5
Cuadro I-2: Aplicaciones del carbón activado	7
Cuadro I-3: Principales consumidores de carbón activado	9
Cuadro I-4. Procesos tecnológicos empleados	13
Cuadro II-1. Principales géneros de la familia de plantas de plátano	20
Cuadro II-2 Ventajas y Desventajas del carbón activado	34
Cuadro II-3. Principales parámetros con los que especifica el carbón activado	39
Cuadro III-1 Criterio de evaluación.....	46
Cuadro III-2. Niveles y Factores que Intervienen	53
Tabla III-1 Escala de Calificación.	45
Tabla III-2 Selección del método experimental para la obtención de carbón activado de cáscara de plátano	47
Tabla III-3. Selección del reactivo activante para la obtención experimental de carbón activado de cáscara de plátano	48
Tabla III-4. Matriz de experimentos, plan de experimentos	53
Tabla III-5. Codificación de los experimentos de obtención de carbón activado	54
Tabla IV-1. Determinación del porcentaje humedad de la cáscara de plátano	77
Tabla IV-2. Características de la cáscara de plátano en base seca	77
Tabla IV-3. Lecturas de absorbancia para la curva patrón.....	78
Tabla IV-4. % remoción del azul de metileno de la materia prima pre-carbonizada .	80
Tabla IV-5. Resultados del cálculo de la masa adsorbida y % de remoción réplica 1	83
Tabla IV-6. Resultados del cálculo de la masa adsorbida y % de remoción réplica 2	84

Tabla IV-7. Promedio de la masa adsorbida	85
Tabla IV-8. Promedio del % de remoción del azul de metileno	86
Tabla IV-9. Índice de yodo y área superficial de la materia prima pre-carbonizada..	88
Tabla IV-10. Resultados del cálculo del índice de yodo réplica 1	90
Tabla IV-11. Resultados del cálculo del índice de yodo réplica 2	91
Tabla IV-12. Promedio índice de yodo	92
Tabla IV-13. Cálculo del área superficial del carbón activado réplica 1	93
Tabla IV-14. Cálculo del área superficial del carbón activado réplica 2	93
Tabla IV-15. Promedio área superficial	94
Tabla IV-16. Densidad aparente en base seca de la materia prima pre-carbonizada .	95
Tabla IV-17. Cálculo de la densidad aparente réplica 1	96
Tabla IV-18. Cálculo de la densidad aparente réplica 2	97
Tabla IV-19. Cálculo del promedio de la densidad aparente	97
Tabla IV-20. Promedio rendimiento y eficiencias del carbón activado.....	100
Tabla IV-21. Variables óptimas para la obtención de carbón activado de cáscara de plátano.....	101
Tabla IV-22. Comparación del carbón activado comercial con el mejor carbón obtenido.....	102
Tabla IV-23. Resultados de la prueba de aplicación	104
Tabla IV-24. Corrientes del balance de materia para cada experimento réplica 1 ...	106
Tabla IV-25. Corrientes del balance de materia para cada experimento réplica 2 ...	106
Tabla IV-26. Valores de corrientes del proceso de pre carbonización réplica 1	108
Tabla IV-27. Valores de corrientes del proceso de pre carbonización réplica 2	108
Tabla IV-28. Valores de corrientes del proceso de impregnación con ácido fosfórico réplica 1.....	110

Tabla IV-29. Valores de corrientes del proceso de impregnación con ácido fosfórico réplica 2.....	110
Tabla IV-30. Valores de corrientes del proceso de activación réplica 1.....	112
Tabla IV-31. Valores de corrientes del proceso de activación réplica 2.....	112
Tabla IV-32. Valores de corrientes del proceso de lavado y secado réplica 1.....	114
Tabla IV-33. Valores de corrientes del proceso de lavado y secado réplica 2.....	114
Tabla IV-34. Valores de consumo energético del balance de energía.....	115
Tabla IV-35. Datos para el cálculo del análisis de varianza del % de remoción	119
Tabla IV-36. Factores Inter sujetos para el % de remoción	120
Tabla IV-37. Pruebas de efectos Inter sujetos para el % de remoción	121
Tabla IV-38. Ajustes de datos para el modelo lineal general.....	121
Tabla IV-39. ANOVA para el % de Remoción.....	122
Tabla IV-40. Coeficientes del modelo de Regresión Lineal para el % de Remoción.	122
Tabla IV-41. Comparación del % de remoción observado y el % de remoción del modelo.....	124
Tabla IV-42. Datos para el cálculo del área superficial.....	126
Tabla IV-43. Factores Inter sujetos para el área superficial.....	126
Tabla IV-44. Pruebas de efectos Inter sujetos para el área superficial	127
Tabla IV-45. Ajustes de datos para el modelo lineal general para el área superficial	128
Tabla IV-46. ANOVA para el área superficial.....	128
Tabla IV-47. Coeficientes del modelo de Regresión Lineal para el área superficial	129
Tabla IV-48. Comparación del área superficial observada y el área superficial del modelo.....	131
Tabla IV-49. Datos para el cálculo del análisis de varianza de la densidad aparente	132

En la Tabla IV-50, se muestra los factores y el número de ensayos que se realizó para la obtención de carbón activado de cáscara de plátano (Musa Cavendishii).	133
Tabla IV-50. Factores Inter sujetos para la densidad aparente.....	133
Tabla IV-51. Pruebas de efectos Inter sujetos para la densidad aparente	134
Tabla IV-52. Ajustes de datos para el modelo lineal general de la densidad aparente.....	134
Tabla IV-53. ANOVA para la densidad aparente.....	135
Tabla IV-54. Coeficientes del modelo de Regresión Lineal para la densidad aparente.....	135
Tabla IV-55. Comparación de la densidad aparente observada y la densidad aparente del modelo	137
Tabla IV-56. Datos para el cálculo del análisis de varianza del rendimiento del proceso.....	138
Tabla IV-57. Factores Inter sujetos para el rendimiento del proceso	139
Tabla IV-58. Pruebas de efectos Inter sujetos para el rendimiento del proceso	140
Tabla IV-59. Ajustes de datos para el modelo lineal general.....	140
Tabla IV-60. ANOVA para el rendimiento del proceso	141
Tabla IV-61. Coeficientes del modelo de Regresión Lineal para el rendimiento del proceso.....	141
Tabla IV-62. Comparación del rendimiento del proceso observado y el rendimiento del proceso del modelo	143
Tabla V-1. Detalle costo de reactivos a utilizados en la parte experimental y análisis	144
Tabla V-2. Detalle de costos de materiales adquiridos para realizar la parte experimental	145
Tabla V-3. Detalle de costos de Servicios y Materiales Directos e Indirectos	146
Tabla V-4. Detalle de costos energéticos	146

Tabla V-5. Costos totales	147
Tabla V-6. Costo de elaboración de 1 kg de carbón activado	148
Tabla V-7. Precios del carbón activado	148
Tabla VI-1. Características de la cáscara de plátano	149
Tabla VI-2. Características del carbón activado obtenido de mejor calidad.....	151

TABLA DE FIGURAS

Fig. 1-1. Principales países proveedores de carbón activado a Bolivia.....	11
Fig. 1-2. Cantidad de carbón activado importado por Bolivia en dólares americanos	12
Fig. 1-3. Planta liofilizadora de frutas, Villa Tunari.....	15
Fig. 2-1. Etapa de maduración del plátano.....	19
Fig. 2-2. Estructura química de la Galocatequina, principal compuesto antioxidante de la cáscara de Plátano	23
Fig. 2-3: (a) arreglo estructural de las capas planas del grafito, (b) estructura propuesta de las capas del carbón activado.....	24
Fig. 2-4. Clasificación de los poros del carbón activado	25
Fig. 2-5. Esquema de la macromolécula de la celulosa	29
Fig. 2-6. Esquema de la macromolécula de la hemicelulosa	29
Fig. 2-7. Esquema de la macromolécula de la lignina	30
Fig. 2-8. Carbón activado granular	32
Fig. 2-9. Carbón activado en polvo.....	33
Fig. 2-10. Carbón activado pelletizado	33
Fig. 3-1. Esquema de la metodología del estudio del proyecto.....	44
Fig. 3-2. Proceso de obtención de carbón activado mediante activación química	51
Fig. 3-3. Diagrama de bloques del proceso de obtención experimental de carbón activado de cáscara de plátano	56
Fig. 3-4. Materia prima, cáscara de plátano	57
Fig. 3-5. Secador de infrarrojos	57
Fig. 3-6. Determinación de cenizas	58
Fig. 3-7. Determinación del material volátil	59
Fig. 3-8. Secado de la cáscara de plátano.....	61

Fig. 3-9. Trituración de la cáscara de plátano con el molino de tornillo y molino de martillos.....	62
Fig. 3-10. Tamizado.....	63
Fig. 3-11. Malla de 0,25 mm.....	64
Fig. 3-12. Cáscara de plátano pre-carbonizada	65
Fig. 3-13. Impregnación.....	65
Fig. 3-14. Separación del agente activante.....	66
Fig. 3-15. Carbonización.....	67
Fig. 3-16. Carbón activado obtenido	68
Fig. 3-17. Lavado de carbón activado.....	68
Fig. 3-19. Secado de carbón activado	70
Fig. 3-20. Escala de color para la curva de calibración	70
Fig. 3-21. Espectrofotómetro.....	71
Fig. 3-22. Adición de la solución de A.M. al carbón activado.....	72
Fig. 3-23. Filtrado	72
Fig. 3-24. Medición de la absorbancia.....	73
Fig. 3-25. Ebullición del HCl.....	74
Fig. 3-26. Filtrado de la solución.....	74
Fig. 3-27. Decoloración del amarillo rojizo intenso	75
Fig. 3-28. Titulación	75
Fig. 3-29. Pesado del carbón activado	76
Fig. 4-1. Curva de Calibración	78
Figura 4-2. Filtrado y medición del pH del agua residual.....	104
Fig. 4-3. Diagrama de flujo general de la obtención de carbón activado de cáscara de plátano.....	104

Fig. 4-4. Diagrama de flujo del proceso de pre carbonización de la cáscara de plátano.....	107
Fig. 4-5. Diagrama de flujo del proceso de impregnación con ácido fosfórico	109
Fig. 4-6. Diagrama de flujo del proceso de activación	111
Fig. 4-7. Diagrama de flujo del proceso de lavado y secado	113
Fig. 4-8. Diagrama de flujo general del balance de energía.....	115
Fig. 4-9. Probabilidad normal del % de Remoción	123
Fig. 4-10. Comparación gráfica del % de remoción observado y el % de remoción del modelo.....	125
Fig. 4-11. Probabilidad normal del área superficial	130
Fig. 4-12. Comparación grafica del área superficial observada y el área superficial del modelo.....	131
Fig. 4-14. Probabilidad normal de la densidad aparente.....	136
Fig. 4-14. Comparación gráfica de la densidad aparente observada y la densidad aparente del modelo	137
Fig. 4-15. Probabilidad normal del rendimiento del proceso	142
Fig. 4-16. Comparación gráfica del rendimiento observado y el rendimiento del modelo.....	143