

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA



**OBTENCIÓN EXPERIMENTAL DE CARBON ACTIVADO DE CÁSCARA
DE NARANJA, VARIEDAD CRIOLLA (Citrus Sinensis L. Osb.)
CULTIVADA EN LA PROVINCIA ARCE, DEPARTAMENTO DE TARIJA**

Por:

ARIEL ARMANDO MAMANI APARICIO

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.

Febrero-2021

TARIJA – BOLIVIA

VºBº

M.Sc. Ing. Ernesto R. Álvarez Gonzalves

DECANO

Facultad de Ciencias y Tecnología

M.Sc. Lic. Elizabeth Castro Figueroa

VICEDECANO

Facultad de Ciencias y Tecnología

APROBADA POR:

TRIBUNAL:

Ing. Juan Pablo Herbas Barrancos

Ing. Walter Zenteno Cruz

Ing. Pablo Arduz Mendieta

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, va dedicado a mis padres Cleofe Aparicio López y Alberto Mamani Choque, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más.

A mis hermanos Miguel, Paola, Laura y Raiza, por su cariño y apoyo incondicional, durante todo este proceso.

A la señorita Mabel Puma Olguera, por ser un gran pilar para mí en tiempos más difícil, por acompañarme en esta etapa y brindarme todo su amor y cariño.

Agradecimientos

Debo agradecer de manera especial y sincera al Profesor Marco Antonio Mamani Choque, por su importante apoyo en el desarrollo de esta tesis.

Quiero expresar también mi más sincero agradecimiento a los docentes de la UAJMS en especial al Ing. Juan Pablo Herbas, por su apoyo y confianza en mi trabajo y su capacidad de guiar mis ideas.

Quiero extender un sincero agradecimiento, para aquellos amigos que han compartido los “ires y venires” en el plano personal durante toda esta etapa.

Y por supuesto, el agradecimiento más profundo y sentido va para mi familia. Sin su apoyo, colaboración e inspiración habría sido imposible llevar a cabo este logro.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
CAPITULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
1. ANTECEDENTES	2
1.1. Generalidades	2
1.2. Descripción general del producto	4
1.2.1. Usos y aplicaciones del carbon activado	5
1.3. Mercado	6
1.3.1. Mercado consumidor.....	6
1.3.2. Mercado competidor.....	8
1.4. Materias primas.....	11
1.5. OBJETIVOS	13
1.5.1. Objetivo general.....	13
1.5.2. Objetivos especificos.....	13
1.6. JUSTIFICACION	14
1.6.1. Justificación económica.....	14
1.6.2. Justificación social	14
1.6.3. Justificacion ambiental.....	14
CAPITULO II. MARCO TEÓRICO	16

2. El carbon activado.....	17
2.1. Antecedentes históricos del carbón activado.....	17
2.2. Propiedades fisicoquímicas de los carbones activados.....	18
2.2.1. Microestructura de carbones activados.....	18
2.2.2. Porosidad del carbón avtivado	20
2.2.3. Química superficial del carbón activado.....	20
2.2.4. Los grupos ácidos.	22
2.2.5. Los grupos básicos.....	23
2.3. Tipos de carbones activados	23
2.3.1. Carbón activado en polvo.	23
2.3.2. Carbón activado granular.....	24
2.3.3. Carbón activado extruido o “pilletizado”.....	25
2.4. Métodos de activación.....	25
2.4.1. Activación física o térmica.....	26
2.4.1.1. Pirolisis o carbonización.....	26
2.4.1.2. Activación o gasificación	26
2.4.2. Activación química.....	28
2.4.2.1. La activacion quimica con KOH	29

2.4.2.2. La activación química con $ZnCl_2$	29
2.4.2.3. La activación química con H_3PO_4	30
2.4.2.4. Influencia de la temperatura en la activación química.	31
2.4.2.5. Influencia de la velocidad de calentamiento.....	31
2.4.2.6. Influencia del tiempo en la activación química.....	32
2.5. Adsorción.....	33
2.5.1. Tipos de adsorción.....	34
2.5.1.1. Fisisorción.....	34
2.5.1.2. Quimisorción.....	34
2.5.2. Factores que influyen en la adsorción.....	35
2.5.2.1. Temperatura.....	35
2.5.2.2. Porosidad.....	35
2.5.2.3. PH.....	36
2.5.2.4. Tamaños de partículas.....	36
2.5.2.5. Materias solubles en agua.....	36
2.6. Isotermas de adsorción.....	37
2.6.1. Tipos de isotermas de adsorción.....	38
2.6.1.1. Isotermas de Langmuir.....	38

2.6.1.2. Isoterma de Freundlich.....	39
2.6.1.3. Isoterma de BET.	40
2.6.1.4. Isoterma de Temkim.....	41
2.7. Índices asociados a los carbones activados	42
2.7.1. Índice de yodo	42
2.7.2. Índice de azul de metileno	42
2.8. Generalidades de la naranja.....	43
2.8.1. La naranja en Bolivia.....	44
2.8.1.1. Variedad de naranja	46
2.8.2. Cáscara de naranja	48
2.9. Caracterización del producto	49
CAPITULO III. PARTE EXPERIMENTAL	51
3. Descripción (esquemática) de la metodología del estudio	52
3.1. Selección del proceso para la obtención experimental de carbón activado de cáscara de naranja	53
3.2. Diseño experimental	55
3.2.1. Variable y dominio experimental	55
3.2.1.1. Variables dependientes.	55
3.2.1.2. Variables independientes.....	55
3.2.2. Dominio experimental	55

3.2.2.1. Matriz de experimentos para la etapa de activacion el diseño factorial completo 23.....	56
3.3. Descripción del proceso obtención experimental de carbón activado de cascara de naranja	58
3.3.1 Recolección de la materia prima.....	60
3.3.2. Caracterización de la materia prima.....	60
3.3.2.1. Determinación del porcentaje humedad de la cáscara de narnaja	60
3.3.2.2. Determinación de cenizas de cáscara de naranja	62
3.3.2.3. Determinación de material volatil de la cáscr de naranja	62
3.3.2.4. Determinación de carbón fijo.....	63
3.3.3. Secado de cáscara de naranja	64
3.3.4. Trituración y tamizado de la cascara de naranja.	65
3.3.5. Pre carbonización de la cáscara de narnja	66
3.3.6. Impregnación.....	67
3.3.7. Carbonización y activación.....	68
3.3.8. Lavado.....	70
3.3.9. Secado.....	72
3.3.10. Caracterización del producto obtenido	72
3.3.10.1. Determinación del índice de yodo	72
3.3.10.2. Determinacion del índice de azul de metileno	75
CAPITULO IV. RESULTADOS DEL ESTUDIO... ..	78

4.1. Presentación de los resultados de la carnetización de la cáscara de naranja	79
4.1.1. Resultados de la determinación del porcentaje húmeda de la cáscara de naranja	79
4.1.2. Caracterización de la materia prima seca.....	79
4.2. Presentación de los resultados del producto obtenido.....	80
4.2.1 Resultados del índice de yodo.	80
4.2.1.1. Resultados de la materia prima pre carbonizada	80
4.2.1.2. Resultados del producto obtenido.....	80
4.2.2. Resultados del área superficial.	85
4.2.3. Resultados del índice de azul de metileno.....	87
4.2.3.1. Curva de calibración de la solución de azul de metileno.....	87
4.2.3.2. Resultados del índice de azul de metileno de la materia prima pre carbonizada.	89
4.2.3.3. Resultados del índice de azul de metileno del producto obtenido.....	89
4.3. Balance de materia	94
4.3.1 Balance de materia por el proceso.....	97
4.3.1.1. Balance de materia por el proceso de pre carbonización.....	97
4.3.1.2. Balance de materia del proceso de impregnación con ácido fosfórico.....	98
4.3.1.3. Balance de materia del proceso de activación.	100
4.3.1.4. Balance de materia del proceso de lavado y secado.....	102
4.4. Balance de energía.....	104

4.4.1 Balance de energía por proceso.	104
4.4.1.1. Balance de energía en el proceso de pre carbonización.	105
4.4.1.2. Balance de energía en el proceso de activación química.....	105
4.4.1.3. Balance de energía en el proceso de secado.....	107
4.5. Análisis estadístico para las variables respuestas.	108
4.5.1. Análisis estadístico de la variable respuesta área superficial.	108
4.5.1.1. Análisis de varianza para el área superficial.....	110
4.5.1.2. Ecuación de regresión lineal variable respuesta área superficial.....	111
4.5.1.3. Pareto de los efectos estandarizados para el área superficial.	112
4.5.1.4. Gráficas factoriales para el área superficial.....	113
4.5.2. Análisis estadístico de la variable respuesta % de remoción del azul de metileno.	118
4.5.2.1. Ecuación de regresión lineal variable respuesta % de remoción del azul de metileno.....	120
4.5.2.2. Pareto de los efectos estandarizados para el % de remoción del azul de metileno.	121
4.5.2.3. gráficas factoriales para el % de la remoción del azul de metileno.....	122
4.6. Determinación de los rendimientos y eficiencias de adsorción de los carbones activados obtenidos.....	127
4.7. Selección del mejor método estudiado de obtención de carbón activado	128
4.8. Comparación del mejor carbón ativado obtenido con uno comercial.	129
CAPITULO V. COSTOS DEL PROYECTO.	131
5.1. Evaluación de costos.	132

5.2. Costos de elaboración del carbón activado de cáscara de naranja.....	135
CAPITULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	136
6.1. Conclusiones.....	137
6.2. Recomendaciones.	140

ÍNDICE DE CUADROS Y/O TABLAS

Cuadro I-2. Aplicaciones del carbón activado por actividad y por tipos de contaminación eliminado	5
Cuadro I-3. Potenciales consumidores en Bolivia	7
Tabla I-2. Importaciones del carbón activado en Bolivia.....	9
Cuadro I-4. Precios del carbón activado a nivel internacional.	10
Cuadro II-1. Taxonomía de la naranja	44
Cuadro II-2. Las variedades que existen en mayor cantidad en zonas	45
Tabla II-1. Producción por año de naranja en Bolivia (En toneladas métricas)	45
Tabla II-2. Producción por año de naranja en Tarija (En toneladas métricas).	45
Tabla II-3. Diferencias físicas de las variedades de naranja	46
Tabla II-4. Composición interna de la naranja variedad criolla.	47
Tabla II-5. Composición química de la cáscara de naranja	48
Cuadro II-3. Principales parámetros con los que se especifica el carbón activado	49
Tabla III-1. Escala de calificación por puntuación del 1 al 10	53
Tabla III-1. Selección del proceso de activación para la obtención experimental de carbón activado.....	53
Tabla III-2. Escala de calificación por puntuación del 1 al 10	53
Tabla III-3. Selección de reactivo activante para la obtención experimental de carbón activado de	

cáscara de naranja.....	54
Tabla III-4. Variables y dominio experimental para la etapa de activación	56
Tabla III-5. Matriz de experiomientos, plan de experimentos	57
Tabla III-6. Codificación de los experiomientos de obtención de carbón activado	57
Tabla IV-1. Determinación del porcentaje de humedad de la cáscara de naranja	79
Tabla IV-2. Características de la materia prima en base seca	79
Tabla IV-3. Cálculo de índice de yodo y área superficial de la materia prima pre carbonizada	80
Tabla IV-4. Resultados del cálculo del índice de yodo réplica 1	83
Tabla IV-5. Resultados del cálculo del índice de yodo réplica 2.	84
Tabla IV-6. Promedio de índice de yodo	85
Tabla IV-7. Cálculo del área superficial del carbón activado réplica 1	86
Tabla IV-8. Cálculo del área superficial del carbón activado réplica 2	86
Tabla IV-9. Promedio área supeerficial.....	87
Tabla IV-10. Lecturas de absorbancia para la curva patrón	87
Tabla IV-11. Cálculo del % remoción del azul de metileno de la materia prima Pre carbonizada....	89
Tabla IV-12. Lecturas de las muestras por triplicado de azul de metileno de las muestras de carbón activado para obtener la masa absorbida y % de remoción réplica 1	91
Tabla IV-13. Lecturas de las muestras por triplicado de azul de metileno de las muestras de carbón activado para obtener la masa absorbida y % de remoción réplica 2.	92

Tabla IV-14. Promedio del % de remoción del azul de metileno y masa absorbida	93
Tabla IV-15. Corriente de balance de materia para cada experimento réplica 1	95
Tabla IV-16. Corriente de balance de materia para cada experimento réplica 2.....	96
Tabla IV-17. Valores de corrientes del proceso de pre carbonización réplica 1	98
Tabla IV-18. Valores de corrientes del proceso de pre carbonización réplica 2.....	98
Tabla IV-19. Valores de corrientes del proceso de impregnación con ácido fosfórico réplica 1	100
Tabla IV-20. Valores de corrientes del proceso de impregnación con ácido fosfórico réplica 2.....	100
Tabla IV-21. Valores de corrientes del proceso de activación réplica 1	101
Tabla IV-22. Valores de corrientes del proceso de activación réplica 2.....	102
Tabla IV-23. Valores de corrientes del proceso de lavado y secado réplica 1.....	103
Tabla IV-24. Valores de corrientes del proceso de lavado y secado réplica 2.....	103
Tabla IV-25. Valores de consumo energético del balance de energía	104
Tabla IV-26. Resumen del diseño factorial variable respuesta área superficial	108
Tabla IV-27. Diseño factorial variable respuesta área superficial	109
Tabla IV-28. Análisis de varianza (ANOVA) variable respuesta área superficial	110
Tabla IV-29. Resumen del modelo variable respuesta área superficial.....	111
Tabla IV-30. Coeficientes codificados variable respuesta área superficial.....	111
Tabla IV-31. Resultados de la variable respuesta área superficial	115
Tabla IV-32. Resumen del diseño factorial variable respuesta % de remoción del azul de metileno	118

Tabla IV-33. Diseño factorial variable respuesta % de remoción del azul de metileno	118
Tabla IV-34. Diseño factorial variable respuesta % de remoción del azul de metileno	119
Tabla IV-35. Resumen del modelo variable respuesta % de remoción del azul de metileno	120
Tabla IV-36. Coeficientes codificados variable respuesta % de remoción del azul de metileno	120
Tabla IV-37. Resultados de la variable respuesta para el % de remoción del azul de metileno.	124
Tabla IV-38. Promedio rendimiento y eficiencias del carbón activado	128
Tabla IV-39. Variables óptimas para la obtención de carbón activado de cáscara de naranja	129
Tabla IV-40. Comparación entre carbones activados	87

ÍNDICE DE FIGURAS Y/O GRAFICAS

Figura 1-1: Consumo mundial de carbón activado.....	8
Figura 1-2: Importancia del carbón activado en Bolivia.....	10
Figura 2-1: Microestructura de un carbón activado	19
Figura 2-2: Vista simbólica del grafito	19
Figura 2-3: Tipo de poro formado en el carbón activado.....	20
Figura 2-4: Representación esquemática del carácter ácido y básico de los electrones deslocalizados	21
Figura 2-5: Puentes de hidrógeno que forman las moléculas de H ₂ O dentro de los poros del carbón activado	22
Figura 2-6: Grupos de oxígeno posibles en la superficie de un adsorbente de carbono.	22
Figura 2-7: Estructura tipo pirona	23
Figura 2-8: Carbón activado en polvo.....	24
Figura 2-9: Carbón activado granular	24
Figura 2-10: Carbón activado pelletizado	25
Figura 2-11: Diagrama para la activación física del carbón activado.....	28
Figura 2-12: Diagrama de activación química del carbón activado.....	31
Figura 2-13: Representación esquemática del proceso de adsorción.....	33
Figura 2-14: Isotermas según la IUPAC	37
Figura 2-15: Descripción partes del fruto de naranja.....	47
Figura 3-1: Esquema de metodología del estudio	52
Figura 3-2: Diagrama de flujo (PFD) para el proceso de obtención de carbón activado de cáscara de naranja	58

Figura 3-3: Diagrama de bloques del proceso de obtención experimental de carbón activado de cáscara de naranja	59
Figura 4-1: Curva de calibración y ecuación de concentración	88
Figura 4-2: Diagrama de flujo general obtención de carbón activado de cáscara de naranja	94
Figura 4-3: Diagrama de flujo de proceso de precarbonización de la cáscara de naranja	97
Figura 4-4: Diagrama de flujo de proceso de impregnación con ácido fosfórico	99
Figura 4-5: Diagrama de flujo de proceso de activación	101
Figura 4-6: Diagrama de flujo de proceso de lavado y secado	102
Figura 4-7: Diagrama de flujo general del balance de energía	104
Figura 4-8: Diagrama del pareto de efectos estandarizados para el área superficial	112
Figura 4-9: Efectos principales del área superficial	113
Figura 4-10: Gráfica normal de efectos estandarizados para área superficial	114
Figura 4-11: Probabilidad normal variable respuesta área superficial	114
Figura 4-12: Área superficial vs ajustes	116
Figura 4-13: Residuo vs orden para el área superficial	116
Figura 4-14: Gráfica de cubos (medias ajustadas) del área superficial	117
Figura 4-15: Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para el % de remoción del azul de metileno	121
Figura 4-16: Efectos principales del % de remoción del azul de metileno	122
Figura 4-17: Gráfica normal de efectos estandarizados para el % de remoción del azul de metileno	123
Figura 4-18: Probabilidad normal variable respuesta para el % de remoción del azul de metileno	123
Figura 4-19: % de remoción del azul de metileno vs ajustes	125

Figura 4-20: Residuo vs orden para del % de remoción de azul de metileno..... 125

Figura 4-21: Gráfica de cubos (medias ajustadas) del % de remoción del azul de metileno..... 126

Índice de fotos

Foto III-1: Recolección de la cáscara de naranja	60
Foto III-2: Secador de infrarojos.....	61
Foto III-3: Determinación de cenizas.....	62
Foto III-4: Secado de cáscara de naranja	64
Foto III-5: Trituración de cáscara de naranja.....	65
Foto III-6: Tamizado	66
Foto III-7: Malla 2 mm	66
Foto III-8: Cascar de naranja pre carbonizada	67
Foto III-9: Impregnación.....	68
Foto III-10: Mufla	69
Foto III-11: Desecador	69
Foto III-12: Carbón activado obtenido.....	70
Foto III-13: Lavado de carbón activado.....	70
Foto III-14: Baño maria	71
Foto III-15: Secado de carbón activado	72
Foto III-16: Ebullición de HCl.....	73
Foto III-17: Llenado de buretacopn tiosulfato de sodio.....	74
Foto III-18: Titulación.....	74
Foto III-19: Escala de color para la curva de calibración	75
Foto III-20: Espectrofotómetro	76
Foto III-21: Muestra de azul de metileno con 3 mg/l para análisis.....	76

Foto III-22: Filtrado	77
Foto III-23: Longitud de onda a 665 nm en el espectrofotómetro	77