

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

ACTIVACIÓN QUÍMICA DE CARBÓN DE LEÑA DE
QUEBRACHO COLORADO DE VILLAMONTES

Por:

PABLO ARDUZ MENDIETA

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.

NOVIEMBRE DEL 2016

TARIJA - BOLIVIA

V°B°

Msc. Ernesto Álvarez

DECANO

Msc. Silvana Paz

VICEDECANA

APROBADA POR:

TRIBUNAL:

Ing. Miriam Barrero

Ing. Juan Carlos Keri Mentasti

Ing. Jorge Tejerina Oller

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.

Este trabajo está dedicado con amor a Dios, Elizabeth Miranda, Miguel Eduardo Arduz Miranda y a mis padres.

Agradezco a Dios por darme la vida y todo lo que tengo y abirme las puertas para la culminación del presente trabajo, a mi familia por todo su apoyo y cariño.

INDICE

ADVERTENCIA.	i
DEDICATORIA.	ii
AGRADECIMIENTOS.	iii
RESUMEN.	iv
INTRODUCCIÓN	1
I. ANTECEDENTES.	1
II. JUSTIFICACIÓN.	3
III. OBJETIVOS.	4
3.1. OBJETIVO GENERAL.	4
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	4
CAPÍTULO I	5
1. MARCO TEÓRICO.	5
1.1. CARBONO.	5
1.2. CARBÓN ACTIVADO.	6
1.3. OBTENCIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO.	9
1.3.1. CARBONIZACIÓN.	9
1.3.2. ACTIVACIÓN FÍSICA.	9
1.3.3. ACTIVACIÓN QUÍMICA.	9
1.4. CLASIFICACIÓN DE LOS CARBONES ACTIVADOS.	10
1.4.1. CARBÓN ACTIVADO EN POLVO.	10
1.4.2. CARBÓN ACTIVADO GRANULAR.	11

1.4.3. FIBRAS DE CARBÓN ACTIVADO.	12
1.4.4. CINTAS Y TELAS DE CARBÓN ACTIVADO.	12
1.5. APLICACIONES DEL CARBÓN ACTIVADO.	12
1.6. CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTALES DE LA MATERIA PRIMA.	14
1.7. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL CARBÓN ACTIVADO.	16
1.8. REACTIVOS ACTIVANTES.	20
1.9. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE ADSORCIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO.	22
CAPÍTULO II.	24
2. PARTE EXPERIMENTAL.	24
2.1. DISEÑO EXPERIMENTAL.	24
2.2. MATERIALES, EQUIPOS Y REACTIVOS UTILIZADOS DURANTE EL PROCESO DE LA INVESTIGACIÓN.	26
2.2.1. MATERIALES UTILIZADOS.	26
2.2.2. EQUIPOS UTILIZADOS.	26
2.2.3. REACTIVOS UTILIZADOS.	26
2.3. PROCEDIMIENTOS Y TÉCNICAS EMPLEADOS PARA LA OBTENCIÓN DE LOS RESULTADOS.	27
2.3.1. MOLIENDA DE LA MATERIA PRIMA.	29
2.3.2. TAMIZADO.	30
2.3.3. ANÁLISIS DE HUMEDAD DE LA MATERIA PRIMA.	30
2.3.4. DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE IODO DE LA MATERIA PRIMA.	31

2.3.5. DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE AZUL DE METILENO DE LA MATERIA PRIMA.	31
2.3.6. IMPREGNACIÓN DE LA MATERIA PRIMA.	32
2.3.7. ACTIVACIÓN QUÍMICA.	33
2.3.8. DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE IODO DEL PRODUCTO OBTENIDO.	34
2.3.9. DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE AZUL DE METILENO DEL PRODUCTO OBTENIDO.	35
CAPÍTULO III.	36
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	36
3.1. BALANCE DE MATERIA.	36
3.1.1. DIAGRAMA DE FLUJO Y BALANCE DE MATERIA GENERAL DE LA ACTIVACIÓN CON ÁCIDO FOSFÓRICO.	36
3.1.2. DIAGRAMA DE FLUJO Y BALANCE DE MATERIA GENERAL DE LA ACTIVACIÓN CON CLORURO DE CALCIO.	38
3.1.3. BALANCE DE MATERIA DE LOS PROCESOS.	39
3.2. BALANCE DE ENERGÍA.	59
3.2.1. BALANCE DE ENERGÍA EN EL PROCESO DE IMPREGNACIÓN.	59
3.2.2. BALANCE DE ENERGÍA EN EL PROCESO DE ACTIVACIÓN QUÍMICA.	60
3.3. HUMEDAD DE LA MATERIA PRIMA.	61
3.4. RESULTADOS DE LA PRUEBA DE NÚMERO DE IODO.	62
3.4.1. NÚMERO DE IODO DE LA MATERIA PRIMA.	63
3.4.2. NÚMERO DE IODO DEL CARBÓN ACTIVADO OBTENIDO.	64

3.4.3. NÚMERO DE IODO DEL CARBÓN ACTIVADO COMERCIAL.	66
3.5. RESULTADOS DE LA PRUEBA DE ADSORCIÓN DE AZUL DE METILENO.	67
3.5.1. ADSORCIÓN DE AZUL DE METILENO DE LA MATERIA PRIMA.	67
3.5.2. ADSORCIÓN DE AZUL DE METILENO DEL CARBÓN ACTIVADO OBTENIDO.	67
3.5.3. ADSORCIÓN DE AZUL DE METILENO DEL CARBÓN ACTIVADO COMERCIAL.	70
3.6. DETERMINACIÓN DE LOS RENDIMIENTOS Y EFICIENCIAS DE ADSORCIÓN DE LOS CARBONES ACTIVADOS OBTENIDOS.	70
3.7. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.	72
3.7.1. ANÁLISIS ESTADISTICO PARA LA ACTIVACIÓN CON ÁCIDO FOSFÓRICO A 400 °C y 600 °C.	72
3.7.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LA ACTIVACIÓN QUÍMICA A 400 °C CON CLORURO DE CALCIO Y ÁCIDO FOSFÓRICO.	77
3.8. SELECCIÓN DEL MEJOR MÉTODO ESTUDIADO DE OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO.	82
3.9. COMPARACIÓN DEL MEJOR CARBÓN ACTIVADO CON UNO COMERCIAL.	87
3.10. PRUEBAS DE APLICACIÓN.	88
3.10.1. Decoloración del Alcohol de Quemar.	88
3.10.2. ADSORCIÓN DE CLORO TOTAL.	89
3.10.3. ADSORCIÓN DE SABORES Y OLORES.	90
3.11. COSTOS DE ELABORACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO A ESCALA LABORATORIO CON PROYECCIÓN ARTESANAL.	92

CAPÍTULO IV	94
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	94
4.1. CONCLUSIONES.	94
4.2. RECOMENDACIONES.	96
ANEXO A	97
ANEXO B	99
ANEXO C	101
ANEXO D	102
ANEXO E	103
ANEXO F	104
ANEXO G	107
ANEXO H	110
ANEXO I	111
BIBLIOGRAFÍA	112

Índice de Tablas y/o Cuadros

Tabla 1 1: Propiedades Físicas del Carbono.	5
Tabla 2 1: Matriz de Diseño Experimental.	24
Tabla 2 2: Análisis a Realizar.	25
Tabla 3 1: Valores Promedio de las Corrientes del Balance de Materia.	37
Tabla 3 2: Corrientes del Balance de Materia por Unidad o Kilogramo de Materia Prima	37
Tabla 3 3: Valores Promedio de las Corrientes del Balance de Materia.	38
Tabla 3 4: Corrientes del Balance de Materia por Unidad y/o Kilogramo de Materia Prima.	39
Tabla 3 5: Valores Promedio de las Corrientes de Mezclado con Cloruro de Calcio.	41
Tabla 3 6: Fracciones de Carbón en las Corrientes del Proceso de Mezclado para la Activación con Ácido Fosfórico.	41
Tabla 3 7: Valores Promedio de las Corrientes de Mezclado con Cloruro de Calcio.	43
Tabla 3 8: Fracciones de Carbón en las Corrientes del Proceso de Mezclado para la Activación con Cloruro de Calcio.	43
Tabla 3 9: Valores Promedio de las Corrientes de Impregnación con Ácido Fosfórico.	45
Tabla 3 10: Fracciones de la Corriente de Entrada del Proceso de Impregnación para la Activación con Ácido Fosfórico.	46
Tabla 3 11: Valores Promedio de las Corrientes de Impregnación con Cloruro de Calcio.	47
Tabla 3 12: Fracciones de la Corriente de Entrada del Proceso de Impregnación para la Activación con Cloruro de Calcio.	48

Tabla 3 13: Valores Promedio de las Corrientes de la Activación con Ácido Fosfórico.	50
Tabla 3 14: Fracciones de la Corriente de Entrada del Proceso de Activación con Ácido Fosfórico.	51
Tabla 3 15: Valores Promedio de las Corrientes de Activación con Cloruro de Calcio.	53
Tabla 3 16 Fracciones de la Corriente de Entrada del Proceso de Activación con Cloruro de Calcio.	54
Tabla 3 17: Valores Promedio de las Corrientes del Lavado con Ácido Fosfórico.	57
Tabla 3 18: Fracciones de la Corriente de Entrada del Proceso de Lavado en la Activación con Ácido Fosfórico.	57
Tabla 3 19: Valores Promedio de las Corrientes del Lavado con Cloruro de Calcio.	59
Tabla 3 20: Corrientes del Proceso de Lavado en Unidad de Masa de Materia Prima para la Activación con Cloruro de Calcio.	59
Tabla 3 21: Resultados del Análisis de Humedad de la Materia Prima.	62
Tabla 3 22: Resultados de Número de Iodo de la Materia Prima.	63
Tabla 3 23: Resultados de la Primera Réplica del Análisis de Número de Iodo.	64
Tabla 3 24: Resultados de la Segunda Réplica del Análisis de Número de Iodo.	65
Tabla 3 25: Resultados de la Tercera Réplica del Análisis de Número de Iodo.	65
Tabla 3 26: Promedio del Número de Iodo.	66
Tabla 3 27: Número de Iodo del Carbón Activado Comercial.	66

Tabla 3 28: Adsorción de Azul de Metileno de la Materia Prima.	67
Tabla 3 29: Adsorción de Azul de Metileno del Carbón Obtenido - Primera Réplica.	68
Tabla 3 30: Adsorción de Azul de Metileno del Carbón Obtenido - Segunda Réplica.	68
Tabla 3 31: Adsorción de Azul de Metileno del Carbón Obtenido - Tercera Réplica.	69
Tabla 3 32: Promedio del Número de Azul de Metileno del Carbón Obtenido.	69
Tabla 3 33: Adsorción de Azul de Metileno del Carbón Activado Comercial.	70
Tabla 3 34: Rendimiento y Eficiencias del Carbón Activado.	71
Tabla 3 35: Datos para el Análisis de Varianza.	73
Tabla 3 36: Factores Inter-Sujetos.	74
Tabla 3 37: Pruebas de Efectos Inter-Sujetos para la Variable Dependiente Número de Iodo.	74
Tabla 3 38: Pruebas de Efectos Inter-Sujetos para la Variable Dependiente Número de Azul de Metileno.	75
Tabla 3 39: ANOVA para el Número de Iodo.	76
Tabla 3 40: ANOVA para el Número de Azul de Metileno.	76
Tabla 3 41: Coeficientes del modelo de Regresión Lineal para el Número de Iodo.	76
Tabla 3 42: Coeficientes del modelo de Regresión Lineal para el Número de Azul de Metileno.	77
Tabla 3 43: Datos para el Análisis de Varianza.	78

Tabla 3 44: Factores Inter-Sujetos.	79
Tabla 3 45: Prueba de Efectos Inter-Sujetos para la Variable Dependiente: Número de Iodo.	79
Tabla 3 46: Prueba de Efectos Inter-Sujetos para la Variable Dependiente: Número de Azul de Metileno.	80
Tabla 3 47: ANOVA para el Número de Iodo.	81
Tabla 3 48: ANOVA para el Número de Azul de Metileno.	81
Tabla 3 49: Coeficientes del modelo de Regresión Lineal para el Número de Iodo.	81
Tabla 3 50: Coeficientes del modelo de Regresión Lineal para el Número de Azul de Metileno.	82
Tabla 3 51: Variables Óptimas para la Activación Química de Quebracho Colorado de Villamontes.	87
Tabla 3 52: Comparación entre Carbones Activados.	87
Tabla 3 53: Valores de Absorbancia del Alcohol tratado con Diferentes Carbones.	89
Tabla 3 54: Valores de la Concentración de Cloro Total de las Soluciones tratadas con los Carbones.	90
Tabla 3 55: Escala Hedónica usada para la Evaluación Sensorial.	90
Tabla 3 56: Análisis Sensorial del Cañazo.	91
Tabla 3 57: Porcentajes de Aceptación de las Muestras de Cañazo.	92
Tabla 3 58: Costo de las Materias Primas para la Elaboración de 1Kg de Carbón Activado.	93
Tabla 3 59: Costo de Elaboración Base de 1 Kg de Carbón Activado.	93
Tabla 4 1: Características del Carbón de Leña.	94

Tabla 4 2: Características de Adsorción del mejor Carbón Activado Obtenido.	94
Tabla 4 3: Rendimiento y Eficiencias del Carbón Activado Óptimo Obtenido.	95
Índice de Ilustraciones y Figuras.	
Figura 1 1: Esquema de la Estructura del Carbón Activado.:	7
Figura 1 2: Gránulo de Carbón Activado.	8
Figura 1 3: Representación de la Red de Poros del Carbón Activado.	16
Figura 1 4: Grupos funcionales más importantes que se pueden formar en la superficie del carbón activado.	19
Figura 1 5: Incremento de la Hidrofilicidad de carbón por la presencia de Oxígeno en la superficie.	20
Figura 2 1: Diagrama de Flujo de las Operaciones Realizadas.	27
Figura 3 1: Diagrama de Flujo General de la Activación Química con Ácido Fosfórico.	36
Figura 3 2: Diagrama de Flujo General de la Activación Química con Cloruro de Calcio.	38
Figura 3 3: Diagrama de Flujo de la Mezcla con Ácido Fosfórico.	40
Figura 3 4: Diagrama de Flujo del Mezclado con Cloruro de Calcio.	42
Figura 3 5 Diagrama de Flujo del Proceso de Impregnación con Ácido Fosfórico.	44
Figura 3 6: Diagrama de Flujo de la Impregnación con Cloruro de Calcio.	46
Figura 3 7: Diagrama de Flujo de la Activación del Carbón con Ácido Fosfórico.	49
Figura 3 8: Diagrama de Flujo de la Activación del Carbón con Cloruro de Calcio.	53
Figura 3 9: Diagrama de Flujo del Lavado del Carbón Activado con Ácido Fosfórico.	56

Figura 3 10: Diagrama de Flujo del Lavado del Carbón Activado con Cloruro de Calcio.	58
Figura 3 11: Diagrama de Flujo de la Obtención del Mejor Carbón Activado.	86
Ilustración 1 1: Tipos de Carbones Activados.	10
Ilustración 1 2: Carbón Activado Aumentado 150 veces.	17
Ilustración 1 3: Carbón Activado aumentado 750 veces.	18
Ilustración 2 1: Molino de Rodillos.	30
Ilustración 2 2: Balanza de Humedad Sartorius.	31
Ilustración 2 3: Impregnación de la Materia Prima.	32
Ilustración 2 4: Muestras a Introducir a la Mufla.	34
Ilustración 2 5: Solución de Iodo Filtrada.	35
Ilustración 3 1: Carbones Activados con Ácido Fosfórico a 600 °C.	52
Ilustración 3 2: Carbones Activados a 800°C.	52
Ilustración 3 3: Muestras de carbón activado con CaCl₂ recién salidas de la mufla a 600°C junto a una muestra de carbón activada con H₃PO₄ a 600°C.	55

NOMENCLATURA, ABREVIATURAS Y SIMBOLOGÍA UTILIZADA.

a.C.: Antes de Cristo.

uma: Unidad de masa atómica.

C: Carbono.

g: Gramo

cm: Centímetros.

K: Grado Kelvin.

J: Joule.

Kg: Kilogramo.

nm: Nanómetro.

°C: Grado Centígrado.

µm: Micrómetro.

mm: Milímetro.

ABT:

Ca: Calcio.

Mg: Magnesio.

Fe: Hierro.

M.P./R.: Relación Materia Prima/Reactivo.

CaCl₂: Cloruro de Calcio.

H₃PO₄: Ácido Fosfórico.

N: Normalidad (mol/litro).

M.P.: Materia Prima.

kW: Kilowatt.

kW: Kilo Watt hora.

h: Hora.

kJ: Kilo Joule.

X/Mc: Número de Iodo.

I_N: Número de Iodo

A_N: Número de Azul de Metileno.

η_{masa} : Rendimiento en masa.

η_{Iodo} : Eficiencia del Número de Iodo.

η_{AdM} : Eficiencia del Número de Azul de Metileno.

N_{Iodo}: Número de Iodo.

N_{AdM}: Número de Azul de Metileno.

Bs.: Bolivianos.