

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**Obtención de carbón activado a partir de mazorca de “maíz
amiláceo” (*Zea mays L. ssp amiláceo*) por activación química, para
la remoción de un colorante sintético**

Tesis para optar el título profesional de:

INGENIERA QUÍMICA

PRESENTADO POR

Bach. Rosmery GODOY BAUTISTA

ASESOR: M.Sc. Cipriano Mendoza Rojas

COASESOR: Dr. Rubén Alfredo Palomino Infante

AYACUCHO-PERÚ

2022

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de tesis, a mis padres por su apoyo incondicional y por enseñarme a persistir en las metas que uno se propone y no rendirse ante los retos que nos brinda la vida.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi alma mater la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga por darme los conocimientos de la Ingeniería Química, y mostrarme que la carrera de Ingeniería Química cumple un papel fundamental en el desarrollo tecnológico, científico, económico y ambiental de nuestro país y nuestra región, de esta manera poder tener una sociedad más justa y equitativa.

Agradezco a mis asesores, al Mg. Cipriano Mendoza Rojas por su asesoramiento y sus enseñanzas y orientaciones, al Dr. Alfredo Palomino Infante por su asesoramiento, comentarios, consejos y por ayudarme a resolver algunas interrogantes.

Agradezco a los trabajadores del Laboratorio de Tránsito de Masa, del Taller Electromecánico Holger K. Hansen y del Laboratorio de Química Orgánica, de la Facultad de Ingeniería Química por brindarme los equipos y el laboratorio para poder concluir con mi trabajo de tesis.

Un agradecimiento especial para mi hermana por su apoyo incondicional y enseñarme a no rendirme hasta lograr mis objetivos profesionales.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación fue realizado en los Laboratorios de Trasferencia de Masa y Química Orgánica de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. El objetivo general fue transformar el material lignocelulósico de las mazorcas de maíz amiláceo para obtener carbón activado, un material de mayor valor agregado, capaz de adsorber colorantes; así mismo realizar la caracterización física y estructural del material obtenido. Para tal efecto, se empleó un diseño factorial 2^3 con el cual se buscó obtener un carbón activado capaz de adsorber eficientemente al colorante azul de metileno. Las variables empleadas fueron: temperatura de carbonización de 400 °C y 500 °C, tiempo de carbonización de 1,5 h y 2 h y concentración de agente activante de H_3PO_4 al 45 y 85 %.

Mediante este diseño experimental se obtuvieron 8 tipos de carbón activado: B-85%, D-85%, M-85%, L-85%, A-45%, S-45%, P-45%, X-45%, los cuales fueron caracterizados en función del tamaño de partícula, porcentaje de humedad, porcentaje de cenizas, porcentaje de remoción de colorantes, capacidad de remoción de colorantes, área superficial y difracción de rayos X.

El carbón activado que presentó mayor capacidad de adsorción del colorante azul de metileno, mayor área superficial y mejor rendimiento en su producción fue el carbón activado de código A-45%, cuya capacidad de adsorción fue de 9,993 mg/g. El resultado obtenido fue similar al del carbón activado comercial, cuya capacidad de adsorción sobre el azul de metileno fue de 9,994 mg/g.

El análisis de difracción de rayos X del carbón activado A-45%, indica que presenta estructura amorfa poco cristalina; así mismo, el análisis de área superficial por el método BET (Brunauer-Emmett-Teller), reveló que es un material micromesoporoso con prevalencia de microporos cilíndricos y un área superficial de 306,493 m²/g.

Los ensayos realizados incluyeron adsorción sobre el colorante catiónico azul de metileno y sobre el colorante aniónico nigrosina, siendo la capacidad de adsorción del carbón A-45% sobre este colorante de 9,524 mg/g. A la luz de los resultados, se concluye que el carbón activado obtenido a partir de los desechos lignocelulósicos de mazorcas de maíz amiláceo, es un material de superficie activa con capacidad de adsorber eficientemente colorantes catiónicos y aniónicos, el cual puede ser aplicado para el tratamiento de aguas residuales de múltiples industrias y con ello contribuir a mitigar el impacto ambiental, y al mismo tiempo, generar una cadena de valor en las zonas productoras de esta materia prima.

Palabras claves: Carbón activado, mazorcas de maíz amiláceo, nigrosina, azul de metileno, agente activante, difracción de rayos X, área superficial.

ABSTRACT

This research work was carried out in the Mass Transfer and Organic Chemistry Laboratories of the Faculty of Chemical Engineering and Metallurgy of the National University of San Cristóbal de Huamanga. The general objective was to transform the lignocellulosic material from the ears of starchy corn to obtain activated carbon, a material with a higher added value, capable of adsorbing dyes; likewise carry out the physical and structural characterization of the material obtained. For this purpose, a 2^3 factorial design was used with which it was sought to obtain an activated carbon capable of efficiently adsorbing the methylene blue dye. The variables used were: carbonization temperature of 400 °C and 500 °C, carbonization time of 1,5 h and 2 h, and H_3PO_4 activating agent concentration at 45 and 85 %.

Through this experimental design, 8 types of activated carbon were obtained: B-85%, D-85%, M-85%, L-85%, A-45%, S-45%, P-45%, X-45 %, which were characterized based on particle size, moisture percentage, ash percentage, dye removal percentage, dye removal capacity, surface area and X-ray diffraction.

The activated carbon that presented the highest adsorption capacity of the methylene blue dye, the highest surface area, and the best yield in its production was the activated carbon code A-45%, whose adsorption capacity was 9,993 mg/g. The result obtained was similar to that of commercial activated carbon, whose adsorption capacity on methylene blue was 9,994 mg/g.

The X-ray diffraction analysis of activated carbon A-45% indicates that it presents a slightly crystalline amorphous structure; Likewise, the surface area analysis by the BET (Brunauer-Emmett-Teller) method revealed that it is a micromesoporous material with a prevalence of cylindrical micropores and a surface area of 306,493 m²/g.

The tests carried out included adsorption on the cationic methylene blue dye and on the anionic nigrosine dye, with the adsorption capacity of carbon A-45% on this dye being 9,524 mg/g. In light of the results, it is concluded that the activated carbon obtained from the lignocellulosic waste of starchy corn cobs is a surface-active material with the capacity to efficiently adsorb cationic and anionic dyes, which can be applied for the treatment of wastewater from multiple industries and thereby contribute to mitigating the environmental impact, and at the same time, generate a value chain in the areas that produce this raw material.

Keywords: Activated carbon, starchy corn cobs, nigrosin, methylene blue, activating agent, X-ray diffraction, surface area.

ÍNDICE

DEDICATORIA.....	I
AGRADECIMIENTO.....	II
RESUMEN.....	III
ABSTRACT.....	IV
INTRODUCCIÓN.....	XV
CAPÍTULO I.....	17
GENERALIDADES.....	17
1.1.PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	17
1.2.FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	18
1.2.1.Problema principal.....	18
1.2.2.Problema secundario.....	18
1.3.OBJETIVOS.....	18
1.3.1.Objetivo general.....	18
1.3.2.Objetivo específico.....	18
1.4.JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	18
1.4.1.Justificación ambiental.....	18
1.4.2.Justificación económica.....	19
1.4.3.Justificación social.....	19
1.5.DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA.....	20
1.5.1.Espacial.....	20
1.5.2.Temporal.....	20
1.6.HIPÓTESIS.....	20
1.6.1.Hipótesis general.....	20
1.6.2.Hipótesis específica.....	20
1.7.VARIABLES.....	20
1.7.1.Variable dependiente.....	20
1.7.2.Variable Independiente.....	20
CAPÍTULO II.....	21
MARCO TEÓRICO.....	21
2.1.ANTECEDENTES.....	21
2.1.1.Local.....	21
2.1.2.Nacional.....	21
2.1.3.Internacional.....	21
2.2.MAÍZ AMILÁCEO (<i>ZEA MAÍZ L. SSP AMILÁCEO</i>).....	22
2.2.1.Clasificación taxonómica.....	23
2.2.2.Características morfológicas.....	23
2.3.CARBÓN ACTIVADO.....	24
2.3.1.Historia.....	24
2.3.2.Carbón activado.....	26
2.4.PROPIEDADES DEL CARBÓN ACTIVADO COMERCIAL.....	32
2.5.ADSORCIÓN.....	33
2.5.1.Isotermas de adsorción.....	34
2.5.2.Equilibrio de adsorción.....	35

2.6.TECNOLOGÍAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON TINTES SINTÉTICOS	35
2.6.1.Métodos físicos	36
2.6.2.Métodos químicos	36
2.6.3.Métodos biológicos.....	36
2.7.COLORANTES O TINTES SINTÉTICOS.....	37
2.8.IMPACTO DE LOS TINTES SINTÉTICOS EN EL MEDIO AMBIENTE	38
2.9.APLICACIONES DEL CARBÓN ACTIVADO	39
2.9.1.Adsorción en la fase líquida.....	39
2.9.2.Adsorción en la fase gaseosa.....	40
CAPÍTULO III.....	41
MATERIALES Y MÉTODOS.....	41
3.1.TIPO DE INVESTIGACIÓN	41
3.2.NIVEL DE INVESTIGACIÓN.....	41
3.3.DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	42
3.4.POBLACIÓN	42
3.5.MUESTRA.....	43
3.6.MATERIALES Y EQUIPOS	43
3.6.1.Materiales.....	43
3.6.2.Equipos	43
3.6.3.Reactivos	44
3.7.MATERIA PRIMA	44
3.8.LUGAR DE INVESTIGACIÓN.....	45
3.9.MÉTODO DE OBTENCIÓN.....	45
3.10.PREPARACIÓN DE LA MATERIA PRIMA (MAZORCAS DE MAÍZ).....	45
3.10.1.Caracterización de la materia prima (mazorca de maíz molida).....	45
3.10.2.Obtención de carbón activado mediante activación química con ácido fosfórico.....	45
3.10.3.Caracterización del carbón activado obtenido a partir de mazorcas de maíz amiláceo.....	45
CAPÍTULO IV.....	47
RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	47
4.1.RESULTADOS.....	47
4.1.1.Caracterización de la Materia Prima.....	47
4.1.2.Rendimiento de los carbones activados de mazorcas de maíz obtenidos por activación química con H_3PO_4	47
4.1.3.Caracterización Física de los Carbones Activados Obtenidos	48
4.1.4.Determinación del tamaño de partícula del carbón activado.....	49
4.1.5.Capacidad de adsorción del carbón activado con el colorante azul de metileno.....	50
4.1.6.Capacidad de adsorción del carbón activado comercial con el colorante azul de metileno.....	66
4.1.7.Capacidad de adsorción del carbón activado A-45% con el colorante nigrosina.....	68
4.1.8.Resumen de la capacidad de adsorción y porcentaje de remoción del colorante azul de metileno y nigrosina de los carbones activados obtenidos.....	70
4.1.9.Resumen de la capacidad de adsorción de azul de metileno de los carbones activados obtenidos a partir de las mazorcas de maíz	71
4.1.10.Caracterización textural del carbón activado obtenido a partir de mazorcas de maíz.....	73
4.1.11.Isotermas de adsorción-desorción de N_2 para los carbones activados A-45% y L-85%.....	74
4.1.12.Espectro XRD del Carbón Activado A-45%.....	76

4.1.13.Análisis de Varianza (ANOVA)	77
4.1.14.Diagrama de Pareto de Efectos Estandarizados	79
4.1.15.Gráfica de Efectos Principales para la Capacidad de Adsorción.....	80
4.1.16.Gráfica de cubos (medias ajustadas).....	81
4.1.17.Análisis de Superficie Respuesta	81
4.2.DISCUSIONES.....	83
CONCLUSIONES.....	88
RECOMENDACIONES.....	90
BIBLIOGRAFÍA.....	91
ANEXOS.....	100

LISTA DE TABLAS

Tabla	1	Clasificación taxonómica del maíz amiláceo	23
Tabla	2	Propiedades fisicoquímicas de diferentes carbones activados comerciales	33
Tabla	3	Clasificación de los colorantes sintéticos por su aplicación industrial	37
Tabla	4	Diseño factorial 2 ³ sin replica	42
Tabla	5	Caracterización física de las mazorcas de maíz. Laboratorio de Transferencia de Masa de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho 2022. ...	47
Tabla	6	Rendimiento de carbón activado obtenido a partir de mazorcas de maíz amiláceo. Laboratorio de Trasferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.	47
Tabla	7	Caracterización física de los carbones activados de mazorcas de maíz. Laboratorio de Trasferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.	48
Tabla	8	Resultados de la capacidad de adsorción del carbón activado (B-85%), utilizando el colorante azul de metileno. Laboratorio de Trasferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.	50
Tabla	9	Resultados de la capacidad de adsorción del carbón activado (D-85%), utilizando el colorante azul de metileno. Laboratorio de Trasferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.	52
Tabla	10	Resultados de la capacidad de adsorción del carbón activado (M-85%), utilizando el colorante azul de metileno. Laboratorio de Trasferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.	54
Tabla	11	Resultados de la capacidad de adsorción del carbón activado (L-85%), utilizando el colorante azul de metileno. Laboratorio de Trasferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.	56
Tabla	12	Resultados de la capacidad de adsorción del carbón activado (A-45%), utilizando el colorante azul de metileno. Laboratorio de Trasferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.	58
Tabla	13	Resultados de la capacidad de adsorción del carbón activado (S-45%), utilizando el colorante azul de metileno. Laboratorio de Trasferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.	60
Tabla	14	Resultados de la capacidad de adsorción del carbón activado (P-45%), utilizando el colorante azul de metileno. Laboratorio de Trasferencia de Masa de la FIQM-UNSCH Ayacucho 2022.	62

Tabla 15	Resultados de la capacidad de adsorción del carbón activado (X-45%), utilizando el colorante azul de metileno. Laboratorio de Tránsito de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.	64
Tabla 16	Resultados de la capacidad de adsorción del carbón activado comercial, utilizando el colorante azul de metileno. Laboratorio de Tránsito de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.	66
Tabla 17	Resultados de la capacidad de adsorción del carbón activado (A-45%), utilizando la colorante nigrosina. Laboratorio de Tránsito de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.	68
Tabla 18	Resumen de la capacidad de adsorción y porcentaje de remoción del colorante azul de metileno y nigrosina a los 180 minutos.....	70
Tabla 19	Caracterización textural del carbón activado obtenido a partir de mazorcas de maíz. Laboratorio de Investigación de Físicoquímica (LABINFIS) de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería, Lima 2022..	73
Tabla 20	Análisis de Varianza (ANOVA factorial).....	78
Tabla 21	Datos para el análisis de superficie respuesta.....	82
Tabla 22	Parámetros del modelo Yoon-Nelson.....	114
Tabla 23	Resultados de la capacidad de adsorción del carbón activado de semillas de molle (6-85%), Utilizando el colorante azul de metileno. Laboratorio de Tránsito de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.	117
Tabla 24	Selección de valores de las variables de proceso para la obtención del carbón activado a partir de mazorcas de maíz amiláceo	141
Tabla 25	Costo estimado de producción para obtener 1000 g de carbón activado a partir de mazorcas de maíz.....	143

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Planta Zea mays L. ssp amiláceo.....	24
Figura 2	Representación esquemática de los diferentes tipos de poros	27
Figura 3	Grupos superficiales más importantes que se encuentran en la superficie del carbón activado	28
Figura 4	Representación esquemática del carácter ácido y básico de los grupos funcionales superficiales del carbón activado.....	29
Figura 5	Carbón activado en polvo.....	31
Figura 6	Carbón activado granular	32
Figura 7	Tipos de Isotermas.....	35
Figura 8	Mazorcas de maíz amiláceo.....	44
Figura 9	Maíz amiláceo	44
Figura 10	Determinación del tamaño de partícula del carbón activado A-45% de mazorcas de maíz. Laboratorio de Trasferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.	49
Figura 11	Efecto del tiempo de contacto sobre la capacidad de adsorción de carbón activado (B-85%) con el colorante azul de metileno. Laboratorio de Trasferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.	51
Figura 12	Efecto del tiempo de contacto sobre la capacidad de adsorción de carbón activado (D-85%) con el colorante azul de metileno. Laboratorio de Trasferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.	53
Figura 13	Efecto del tiempo de contacto sobre la capacidad de adsorción de carbón activado (M-85%) con el colorante azul de metileno. Laboratorio de Trasferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.	55
Figura 14	Efecto del tiempo de contacto sobre la capacidad de adsorción de carbón activado (L-85%) con el colorante azul de metileno. Laboratorio de Trasferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.	57
Figura 15	Efecto del tiempo de contacto sobre la capacidad de adsorción de carbón activado (A-45%) con el colorante azul de metileno. Laboratorio de Trasferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.	59
Figura 16	Efecto del tiempo de contacto sobre la capacidad de adsorción de carbón activado (S-45%) con el colorante azul de metileno. Laboratorio de Trasferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.	61
Figura 17	Efecto del tiempo de contacto sobre la capacidad de adsorción de carbón activado (P-45%) con el colorante azul de metileno. Laboratorio de Trasferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.	63

Figura 18	Efecto del tiempo de contacto sobre la capacidad de adsorción de carbón Activado (X-45%) con el colorante azul de metileno. Laboratorio de transferencia de masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.	65
Figura 19	Efecto del tiempo de contacto sobre la capacidad de remoción del azul de metileno. Utilizando el carbón activado comercial. Laboratorio de Trasterferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.....	67
Figura 20	Efecto del tiempo de contacto sobre la capacidad de adsorción de carbón activado (A-45%) con el colorante nigrosina. Laboratorio de Trasterferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.....	69
Figura 21	Resumen de la capacidad de adsorción vs tiempo.....	71
Figura 22	Isotermas de adsorción-desorción de N ₂ para el carbón activado de mazorcas de maíz (A-45%). Laboratorio de Investigación de Fisicoquímica (LABINFIS) de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería, Lima 2022.....	74
Figura 23	Isotermas de adsorción-desorción de N ₂ para el carbón activado de mazorcas de maíz (L-85%). Laboratorio de Investigación de Fisicoquímica (LABINFIS) de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería, Lima 2022.....	75
Figura 24	Espectro XRD del CA (A-45%). Laboratorio de Investigación de Fisicoquímica (LABINFIS) de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería, Lima 2022.	76
Figura 25	Diagrama de Pareto de efectos estandarizados	79
Figura 26	Gráfica de efectos principales para la capacidad de adsorción	80
Figura 27	Gráfica de cubos (medias ajustadas) de la capacidad de adsorción	81
Figura 28	Superficie respuesta estimada	82
Figura 29	Diagrama del proceso de obtención de carbón activado a partir de mazorcas de maíz amiláceo.....	101
Figura 30	Mazorcas de maíz recolectadas.....	102
Figura 31	Pesado de las mazorcas de maíz.....	102
Figura 32	Proceso de molienda de las mazorcas de maíz amiláceo	103
Figura 33	Resultado final del proceso de molienda	103
Figura 34	Pesado de las mazorcas de maíz molido	104
Figura 35	Proceso de tamizado de las mazorcas de maíz molido	104
Figura 36	Proceso de la determinación de humedad de la muestra (mazorcas de maíz molido)	105

Figura 37	Proceso de la determinación de ceniza de la muestra (mazorcas de maíz molido)	106
Figura 38	Proceso de obtención del carbón activado a partir de mazorcas de maíz por activación química.....	108
Figura 39	Curva de ruptura utilizando un sistema de adsorción de columna de lecho fijo	112
Figura 40	Modelo de Yoon-Nelson para la descripción del comportamiento de eliminación del contaminante	113
Figura 41	Estudio de adsorción en columna de lecho fijo.....	115
Figura 42	Sistema de adsorción de columna de lecho fijo.....	116
Figura 43	Gráfico de la capacidad de adsorción versus tiempo del carbón activado de semillas de molle (6-85%). Laboratorio de Transferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.....	118
Figura 44	Muestras de carbón activado de mazorcas de maíz. Laboratorio de Transferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.	119
Figura 45	Carbonización del carbón activado. Laboratorio de Química Orgánica. FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.....	120
Figura 46	Carbón activado de mazorcas de maíz. Laboratorio de Transferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.....	121
Figura 47	Carbón activado de mazorcas de maíz. Laboratorio de Transferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.....	122
Figura 48	Lavado del carbón activado hasta obtener pH 7. Laboratorio de Transferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.	123
Figura 49	Determinación de la densidad aparente del carbón activado. Laboratorio de Transferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.	124
Figura 50	Análisis de tamaño de partícula del carbón activado. Laboratorio de Transferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.	125
Figura 51	Prueba de adsorción del carbón activado de mazorcas de maíz con el azul de metileno. Laboratorio de Transferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.	126
Figura 52	Resultado de la prueba de adsorción. utilizando el carbón activado de mazorcas de maíz. Laboratorio de Transferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.	127
Figura 53	Prueba de adsorción del carbón activado de mazorcas de maíz con nigrosina. Laboratorio de Transferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.	128

Figura 54	Resultado de la prueba de adsorción. Utilizando el carbón activado de mazorcas de maíz. Laboratorio de Trasterencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.	129
Figura 55	Carbón activado de semillas de molle. Laboratorio de Trasterencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.....	130
Figura 56	Prueba de adsorción del carbón activado a partir de semillas de molle con el azul de metileno. Laboratorio de Trasterencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.....	131
Figura 57	Resultado de la prueba de adsorción. Utilizando el carbón activado de semillas de molle. Laboratorio de Trasterencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.	132
Figura 58	Análisis de la adsorbancia. Laboratorio de la UNSCH, Ayacucho 2022..	133
Figura 59	Lectura de la adsorbancia de los resultados de la prueba de adsorción. Utilizando carbón activado de mazorcas de maíz. Laboratorio de la UNSCH, Ayacucho 2022.	134
Figura 60	Lectura de la adsorbancia de los resultados de la prueba de adsorción utilizando carbón activado de molle. Laboratorio de la UNSCH, Ayacucho 2022.....	135
Figura 61	Sistema de columna de adsorción. Laboratorio de Trasterencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.	136
Figura 62	Resultado de la prueba de adsorción. Utilizando la columna de adsorción. Laboratorio de Trasterencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.	137
Figura 63	Diagrama de flujo para la producción de carbón activado	142

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1	Diagrama de flujo del proceso de obtención de carbón activado a partir de mazorcas de maíz amiláceo.....	101
Anexo 2	Preparación de la materia prima (mazorcas de maíz)	102
Anexo 3	Obtención de carbón activado (mazorcas de maíz) utilizando H ₃ PO ₄ como agente activante.....	107
Anexo 4	Prueba de adsorción de colorantes del carbón activado obtenido.....	111
Anexo 5	Curva de ruptura del carbón activado A-45% en columna de lecho fijo...112	
Anexo 6	Capacidad de adsorción del carbón activado de semillas de molle (6-85%), utilizando el colorante azul de metileno.....	117
Anexo 7	Panel fotográfico.....	119
Anexo 8	Constancia de análisis de los carbones activados.....	138
Anexo 9	Ficha técnica del carbón activado comercial.....	139
Anexo 10	Comparación entre el carbón A-45% de mazorcas de maíz amiláceo obtenido entre el carbón activado comercial CLARIMEX.....	140
Anexo 11	Selección de valores de las variables de proceso para la obtención del carbón activado a partir de mazorcas de maíz amiláceo.....	141
Anexo 12	Diagrama de flujo para la producción del carbón activado a partir de mazorcas de maíz amiláceo.....	142
Anexo 13	Propuesta de producción de carbón activado A-45% a partir de mazorcas de maíz amiláceo para fines comerciales.....	143
Anexo 14	Matriz de consistencia.....	144

INTRODUCCIÓN

En nuestro país, la mayoría de las industrias no remedian adecuadamente sus efluentes, generando un impacto ambiental negativo y por ende provocando daños al equilibrio ecológico y a la salud. Por ello, es fundamental crear materiales adsorbentes a partir de materia prima abundante y de bajo costo. Una de estas materias primas son las mazorcas de maíz, recurso abundante y sub utilizado en las regiones del Sur del Perú, la cual puede ser transformada para diseñar materiales de superficie activa capaces de adsorber contaminantes y así incrementar su valor agregado y al mismo tiempo generar fuentes de empleo a las zonas de alta producción de maíz amiláceo, como en la región de Apurímac.

Los colorantes sintéticos son utilizados ampliamente en muchas industrias como: textiles, plásticos, cuero, papel y pulpa, curtidurías, destilerías, empresas alimentarias entre otras. Se estima que más de 100 000 colorantes comerciales son utilizados en dichas industrias y más de 700 000 toneladas de colorantes se producen anualmente en todo el mundo (Chikri et al., 2020; Soni et al., 2021). Dichas industrias vierten aguas residuales coloreadas que son perjudiciales para los cuerpos de agua, donde estos colorantes impiden la penetración de la luz, retardando los procesos fotosintéticos, inhibiendo el crecimiento de la biota además de tener tendencia a quelar iones metálicos que producen microtoxicidad para peces y otros organismos, causando problemas carcinogénicos (Garg, 2004).

Se han desarrollado diversos métodos de tratamientos de aguas residuales para la eliminación de colorantes como los métodos de adsorción, coagulación, floculación, intercambio iónico, etc. Entre estos métodos de tratamiento, la adsorción es uno de los métodos más eficientes, esto se debe por su simplicidad en el diseño, no genera subproductos tóxicos y alta selectividad. Siendo el carbón activado uno de los adsorbentes más selectos en la eliminación de tintes sintéticos. Por ello; en los últimos veinte años se han desarrollado varios estudios sobre la obtención de carbones activados a partir de materia prima orgánica desechable, por ser de bajos costo y dando como resultado carbones activados eficientes para la remoción de colorantes sintéticos (Chikri et al., 2020; Jawad et al., 2020).

El carbón activado tiene gran desempeño como adsorbente en la eliminación de contaminantes por presentar estructuras porosas con gran área superficial. Además, el uso de carbones activados para el tratamiento de aguas residuales, presentan varias ventajas. Entre ellas se tiene el requerimiento de menor área para instalar el proceso de tratamiento de adsorción en comparación de un proceso biológico, menor sensibilidad a la variación diurna de concentración, no se ve afectado por productos químicos tóxicos, mayor flexibilidad en el diseño y operación, mayor efectividad en la remoción de contaminantes orgánicos (El-Sayed et al., 2014).

Se han desarrollado diversos estudios sobre la obtención de carbón activado a partir de diferentes fuentes, pero hay poca información sobre la obtención del carbón activado a partir de mazorcas de maíz de la variedad amiláceo. Por ello en el presente trabajo, se ha desarrollado el proceso de obtención de carbón activado a partir de mazorcas de maíz de la variedad amiláceo, procedente de la región de Apurímac en la provincia de Chicheros en el distrito de Ongoy. Por lo demás, es importante remarcar que el rendimiento y la efectividad de adsorción pueden variar dependiendo del lugar de procedencia de la materia prima.

Es importante señalar que el presente estudio busca desarrollar un proceso que permita transformar materia prima de escaso valor económico como las mazorcas de maíz, las cuales son sub utilizadas en su lugar de origen, para transformarlas en carbón activado que cumpla con los requerimientos de calidad y eficiencia en la adsorción de colorantes. De hecho, no solo puede ser empleado para la remoción de colorantes en la industria textil, sino también para una gama de industrias citadas arriba, con lo cual aportamos una alternativa tecnológica para dar valor agregado a un recurso de desecho agrícola.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La industria textil genera y vierte contaminantes potencialmente tóxicos al medio ambiente. Un alto porcentaje de colorantes usados por la industria textil, son sintéticos, y por tanto difíciles de degradar y eliminar. La mayoría de las industrias textiles en nuestro país, suelen descargar sus aguas residuales sin tratamiento previo o empleando tratamientos deficientes que no logran eliminar estos compuestos.

Debido al potencial carcinógeno de los colorantes sintéticos y el impacto ambiental negativo que generan, las industrias textiles deben removerlos de sus aguas residuales para cumplir con los límites máximos permisibles establecidos por las autoridades sanitarias. Sin embargo, al usar procesos deficientes, no logran eliminar apropiadamente estos contaminantes.

El empleo de carbón activado es una alternativa eficiente y de bajo costo para la remoción de contaminantes peligrosos, como los colorantes sintéticos, que debido a su estructura química son altamente estables y cuya acción deletérea puede causar graves problemas de salud (Altintig et al., 2018).

En la región de Apurímac se sub utiliza los desechos agrícolas, como las mazorcas de maíz, los cuales son empleados sólo como fuente alternativa de combustible que carecen de valor económico. Este recurso renovable, debido a su alta disponibilidad y bajo costo, puede ser empleado como materia prima para la elaboración de carbón activado.

Por ello se busca desarrollar un proceso tecnológico eficiente para la obtención de carbón activado a partir de las mazorcas del maíz amiláceo, el cual posea, entre otros, la capacidad de adsorber colorantes sintéticos de los efluentes de la industria textil.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. Problema principal

¿El carbón activado obtenido mediante activación química a partir de mazorcas de maíz amiláceo, tendrá la capacidad de remover un colorante sintético?

1.2.2. Problema secundario

- ¿Mediante la activación química con el reactivo ácido fosfórico, se podrá obtener carbón activado a partir de mazorcas de maíz amiláceo?
- ¿Se podrá caracterizar el carbón activado obtenido, mediante la determinación del área superficial por el método BET?
- ¿Se podrá caracterizar estructuralmente el carbón activado que presente mejor área superficial, empleando el método de difracción de rayos X?
- ¿Se podrá determinar la capacidad de adsorción del carbón activado obtenido para la remoción de un colorante sintético?

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

- Obtener carbón activado a partir de mazorcas de “maíz amiláceo” (*Zea mays L. ssp amiláceo*) mediante un activante químico, para dotarle la capacidad de remover un colorante sintético.

1.3.2. Objetivo específico

- Obtener carbón activado a partir de mazorcas de maíz amiláceo, mediante activación química con ácido fosfórico y determinar su rendimiento.
- Caracterizar el carbón activado obtenido, mediante la determinación del área superficial por el método BET.
- Caracterizar estructuralmente el carbón activado de mayor área superficial empleando difracción de rayos X.
- Determinar la capacidad de adsorción del carbón activado obtenido para la remoción de un colorante sintético.

1.4. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

1.4.1. Justificación ambiental

El agua en nuestro planeta Tierra es un recurso muy escaso y finito, existiendo un problema de escasez del agua, siendo los más afectados la población pobre de los países en vía de desarrollo como el Perú (United Nations, s. f.).

Con el avance de la tecnología se desarrolló la producción de tintes sintéticos para satisfacer las demandas de las industrias textiles, papelera, curtiembre, etc (Kulkarni

et al., s. f.), las cuales eliminan aguas contaminadas sin tratamiento previo. La presencia de colorantes en el agua impide la entrada de luz solar reduciendo el proceso de fotosíntesis, promueven la toxicidad, mutagenicidad y carcinogenicidad, también degradan la calidad estética del agua aumentando la demanda bioquímica y química del oxígeno perjudicando la actividad biológica de la flora y fauna acuática (Hussein et al., 2020 ; Al-Tohamy et al., 2022; Lellis et al., 2019). Es por ello que se han diseñado múltiples métodos de tratamiento de agua, pero el más eficiente es el método de adsorción.

Por ello en este trabajo de tesis se logró desarrollar un proceso sostenible y eficiente para obtener carbón activado de mazorcas de maíz, demostrando la eficiencia de adsorción que tiene frente a un colorante sintético, contribuyendo al cuidado del medio ambiente.

1.4.2. Justificación económica

El Perú en el año 2022 tuvo una producción de 113,4 toneladas de maíz amiláceo (Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2022). Las regiones de mayor producción de maíz amiláceo en nuestro país, son los departamentos de Cuzco, Apurímac, Ayacucho (Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, 2021). Este proceso agrícola, genera mazorcas de maíz como material de desecho; las que generalmente son eliminadas o en el mejor de los casos sub utilizadas por los productores y empleados como abono o combustible alternativo, cuya combustión contribuye a la contaminación ambiental.

Este recurso renovable abundante y carente de valor económico, que se encuentra disponible en la región de Apurímac, puede ser empleado para producir bioadsorbentes de mayor valor económico. Así mismo permitiría promover el desarrollo económico en las comunidades productoras de esta materia prima.

1.4.3. Justificación social

La ingeniería de procesos permite transformar una materia prima para darle valor agregado y satisfacer las necesidades de la sociedad de manera sostenible. Por tanto, en este trabajo desarrollamos un proceso que aprovecha las mazorcas de maíz, para transformarlo en carbón activado utilizando como activante un reactivo químico. Este producto, a la luz de las pruebas de caracterización realizadas, muestra porosidad mixta, lo cual le otorga alta eficiencia de adsorción de colorantes. Su aplicación permitiría por un lado, contribuir con el sector agrícola, dando valor agregado a un desecho y de otro lado, al sector industrial, al presentarle un adsorbente eficiente para una amplia gama de aplicaciones.

1.5. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

1.5.1. Espacial

El presente trabajo de tesis, se desarrolló en la ciudad de Huamanga del departamento de Ayacucho, en los Laboratorios de Transferencia de Masa y de Química Orgánica de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.

1.5.2. Temporal

El presente trabajo de tesis, se realizó en un periodo de un año calendario 2022.

1.6. HIPÓTESIS

1.6.1. Hipótesis general

Los carbones activados obtenidos por activación química a partir de mazorcas de maíz amiláceo, tienen la capacidad de remover un colorante sintético, debido a su área superficial y las interacciones físico químicas con las moléculas del colorante.

1.6.2. Hipótesis específica

- La activación química de la biomasa de mazorcas de maíz amiláceo con el reactivo de ácido fosfórico, permite la obtención de carbón activado con propiedades superficiales óptimas.
- Es posible caracterizar el carbón activado obtenido mediante la determinación del área superficial con el método BET.
- Es posible caracterizar estructuralmente el carbón activado de mayor área superficial empleando la difracción de rayos X.
- Es posible determinar la capacidad de adsorción del carbón activado obtenido en función de la remoción de un colorante sintético.

1.7. VARIABLES

1.7.1. Variable dependiente

Área superficial.

Capacidad de adsorción.

1.7.2. Variable Independiente

Temperatura.

Concentración del activante químico (ácido fosfórico).

Tiempo.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES

2.1.1. Local

García Bendezú & Cerrón Leandro (2014), realizaron el estudio tecnológico para la obtención de carbón activado a partir de la cáscara de coco (*Cocos nucifera L.*) del VRAEM, mediante activación química con ácido fosfórico a diferentes concentraciones y un tratamiento térmico a diferentes temperaturas. Estos autores determinaron la temperatura y la concentración óptima para la producción de carbón activado a partir de cáscaras de coco.

2.1.2. Nacional

Silva Chávez (2018), realizó un estudio sobre el uso del carbón activado obtenido a partir de la cáscara de zapallo (*Cucurbita sp*) para la remoción de cloro total y libre en agua potable de la ciudad de Tumbes. El carbón activado fue obtenido mediante activación química con cloruro de zinc, logrando remover cloro total y libre.

Minaya Pereyra et al., (2020), realizó el estudio de obtención de carbón activado utilizando residuos maderables de Shihuahuaco (*Dipteryx micrantha*), mediante activación física con vapor de agua y su aplicación en la decoloración de aceite de castaña.

2.1.3. Internacional

Efiyanti et al. (2020), desarrollaron carbón activado a partir del bambú maya, mediante activación química con hidróxido de potasio y determinaron su capacidad para remover azul de metileno, obteniendo resultados satisfactorios.

Rim Baccar Ep Yangui (2013), estudió el proceso de adsorción en un carbón activado preparado a partir de un subproducto agrícola y el tratamiento biológico con hongos de

putrefacción blanca para la remoción de algunos contaminantes: tintes textiles, tintes de curtiduría, metales pesados y productos farmacéuticos.

Yu et al. (2019), obtuvieron carbón activado a partir de mazorcas de maíz, empleando activación con vapor de agua y determinaron su capacidad adsorbente para el azul de metileno, así mismo establecieron los parámetros óptimos para su obtención. Los datos experimentales que obtuvieron se ajustaron al modelo de las isotermas de Freundlich y Koble-Corrigan. La caracterización del carbón activado, fue realizado empleando el análisis de Brunauer-Emmett-Teller (BET), espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FT-IR) y microscopía electrónica de barrido (SEM).

Bagheri & Abedi (2009), realizaron la preparación de carbón activado de elevada área superficial, a partir de mazorca de maíz, mediante activación química con hidróxido de potasio. Estos autores determinaron las condiciones óptimas para la producción del carbón activado.

Danish et al. (2014), desarrollaron carbón activado a partir de piedra de dátil tratada con ácido fosfórico y lograron optimizar el proceso del carbón activado. Se caracterizó el carbón activado optimizado mediante análisis termogravimétricos, microscopía electrónica de barrido de emisión de campo, espectroscopía de rayos X, difracción de rayos X y espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier.

2.2. MAÍZ AMILÁCEO (*ZEA MAÍZ L. SSP AMILÁCEO*)

El maíz es una planta originaria del continente Americano, cuya domesticación y consumo data desde épocas prehispánicas. Es un cereal de gran importancia económica y alimentaria a nivel global y se caracteriza por su elevada variabilidad genética, fruto de miles de años de evolución y domesticación por parte del poblador Andino. Una de estas variedades es el maíz amiláceo, considerado como uno de los más antiguos, es cultivado en México, y las zonas altoandinas de Sud América, principalmente en Perú, Ecuador y Bolivia (INIA, 2020, 2021).

La diversificación del maíz en el Perú, data desde aproximadamente 70 000 años. Su cultivo en nuestro país es realizado desde el nivel del mar hasta los 4000 m.s.n.m, lo cual permite su alta variabilidad genética. Actualmente el maíz amiláceo ocupa el cuarto lugar en superficie con intención de siembra a nivel nacional, después del arroz, papa y maíz amarillo (INIA, 2020, 2021).

2.2.1. Clasificación taxonómica

Según el Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), la clasificación taxonómica del maíz amiláceo se muestra en la tabla 1.

Tabla 1
Clasificación taxonómica del maíz amiláceo

Reino	Plantae
División	Angiospermae
Clase	Monocotyledoneae
Subclase	Commelinidae
Orden	Poales
Familia	Gramineae (Poaceae)
Subfamilia	Panicoideae
Tribu	Andropogoneae
Subtribu	Tripsacinae
Género	Zea
Especie	<i>Zea mays L. ssp amiláceo</i>

2.2.2. Características morfológicas

El maíz es una planta monoica, es decir presenta flores masculinas y femeninas en una misma planta. Las flores masculinas se encuentran en la parte apical del tallo y las flores femeninas están agrupadas en las mazorcas, en la parte media de la planta.

Presenta un tallo formado por nudos y entrenudos, hojas arregladas en forma alterna que nacen de yemas ubicadas en los nudos. Es protándrica, es decir, floración masculina o emisión del polen ocurre normalmente antes de la floración femenina o emisión de pistilos (barbas), se puede observar en la figura 1. Es una planta alógama, de polinización cruzada o libre, es decir que las flores femeninas son fertilizadas por el polen proveniente de otras plantas (INIA, 2020, 2021).

El maíz produce tallos, hojas y mazorcas, que corresponden al 47% al 50% de los residuos de la planta. Las mazorcas de maíz son desechos agrícolas no comestibles. Se producen aproximadamente 18 kg de mazorcas de maíz por cada 100 kg de grano de maíz (Choi et al., 2022). Este residuo puede y debe ser aprovechado para su conversión en productos de mayor valor.

Figura 1
Planta Zea mays L. ssp amiláceo



2.3. CARBÓN ACTIVADO

2.3.1. Historia

Los inicios para el descubrimiento del carbón activado se remontan desde la época de los egipcios y sumerios, antes del uso del carbón activado como adsorbente como hoy en día se conoce, ellos usaban como adsorbente al carbón de madera, este caso se registró en el año 3750 antes de Cristo. Ellos lo utilizaban para la reducción de minerales de cobre, zinc y estaño para la fabricación del bronce (Bandosz, 2006).

En papiros que datan del año 1550 A.C, en la ciudad de Tebas - Grecia, se encontró información acerca del uso del carbón de leña para uso medicinal. Así mismo, en el año 400 A.C., Hipócrates, el padre de la medicina, aconsejaba que el agua se filtrara con carbón, para eliminar el mal olor y prevenir enfermedades (Bandosz, 2006).

El uso del carbón para el tratamiento de agua, se remonta a la época de los Fenicios (450 A.C), quienes almacenaban el agua empleada en los viajes trasatlánticos, en barriles de madera carbonizada (Bandosz, 2006).

El uso del carbón como adsorbente en fase gaseosa se inicia en 1793 D.C, por el Dr. D.M. Kehl, quien empleaba el carbón de leña para eliminar los olores que desprendían las heridas gangrenadas. La primera aplicación a nivel industrial del carbón vegetal como agente adsorbente, se realizó en Inglaterra en 1794, aplicándolo en la industria azucarera como agente decolorante. Este fue el inicio de la investigación del carbón activado en fase líquida y se mantuvo en secreto hasta el año de 1812, apareciendo la primera patente en Gran Bretaña-Inglaterra (Bandosz, 2006).

La primera vez que se empleó el carbón de madera como adsorbente en fase gaseosa a gran escala, fue en 1854, con la finalidad de eliminar los olores que emitían los alcantarillados de la ciudad de Londres. A sí mismo, fue en 1872 cuando se iniciaron a utilizar máscaras de gas con filtros de carbón, para evitar el efecto tóxico de los vapores de mercurio generados por las industrias químicas (Bandosz, 2006).

Según Bandosz (2006), en 1901 se descubrió al carbón activado como se lo conoce el día de hoy fue inventado por Raphael Von Ostreiko, a quien se le considera como el padre del carbón activado. Von Ostreiko patentó dos métodos para la producción de carbón activado. El primero de ellos involucra la producción de carbón activado a base de material lignocelulósico mediante activación química, utilizando cloruros metálicos, y el segundo es un proceso de activación térmica utilizando el dióxido de carbono.

El primer carbón activado comercial se obtuvo en 1914 en República Checa, para ello se empleó aserrín como materia prima y ZnCl como agente activante. Así mismo, la Primera Guerra Mundial, impulsó el desarrollo del carbón activado, para aplicarlo en la fabricación de máscaras de gas, como agentes de protección frente a los gases venenosos que se utilizaban en la guerra. A mitades del siglo XX, se desarrolló aún más la producción del carbón activado debido a las regulaciones ambientales (Bandosz, 2006).

En el siglo XXI, se incrementa el interés por el uso y aplicación del carbón activado como agente adsorbente para el tratamiento de aguas residuales industriales y domésticas, para la eliminación de impurezas orgánicas e inorgánicas, así como para la eliminación de olores, colores y sabores. Este material también es usado como adsorbente gaseoso para la purificación del aire de las industrias químicas y en la recuperación de solventes. Las aplicaciones del carbón activado incluyen la purificación de productos químicos, farmacéuticos y alimenticios (Bansal & Goyal, 2005).

En la industria hidrometalúrgica, se emplea para la recuperación del oro, plata y otros metales, así como en catalizadores y soportes catalíticos. En la industria farmacéutica se emplea para eliminar colorantes de los jarabes y en medicina para eliminar toxinas e infecciones bacterianas (Bansal & Goyal, 2005).

El carbón activado es muy usado en el tratamiento de agua residual y su producción está aumentando, por ello el consumo de carbón activado es más alto en los Estados Unidos y Japón, juntos consumen la mayor cantidad de carbón activado en comparación con los países europeos y asiáticos (Bansal & Goyal, 2005). Debido a ello, el carbón activado en la actualidad es muy importante porque nos ayuda a mitigar la contaminación ambiental.

2.3.2. Carbón activado

El carbón activado es definido como un sólido amorfo con una gran superficie interna debido a su estructura porosa, que adsorbe moléculas en fase líquida y en la fase gaseosa (Johnson et al., 1999).

El carbón activado en una definición más amplia, se considera que son materiales carbonosos amorfos que presentan un alto grado de porosidad y un área superficial extendida (Bansal & Goyal, 2005).

Se obtiene a partir de diversas materias primas entre ellas, residuos vegetales, madera y carbón. Se obtiene diversas formas de carbón activado como en polvo y granular. También se obtienen en formas esféricas, fibrosas y de tela. El carbón activado de forma granular presenta área superficial interna grande con poros pequeños, mientras que el carbón activado en polvo presenta área superficial pequeña y el diámetro de poro grande, así mismo los carbones activados de tela y fibrosos, presentan una área superficial grande y diámetro de poro más alto (Johnson et al., 1999; Bansal & Goyal, 2005).

Los carbones activados, son carbones que han sido preparados para que contengan gran cantidad de microporos y mesoporos abiertos. El área superficial y su alto valor de porosidad son los responsables de que los carbones activados tengan la alta capacidad de adsorber fluidos (Burchell, 1999).

2.3.2.1. Estructura porosa del carbón activado

Los carbones activados presentan una estructura de carbono porosa, contienen pequeñas cantidades de heteroátomos como oxígeno e hidrógeno. La estructura porosa es una de las propiedades físicas que caracteriza al carbón activado (Bandosz, 2006).

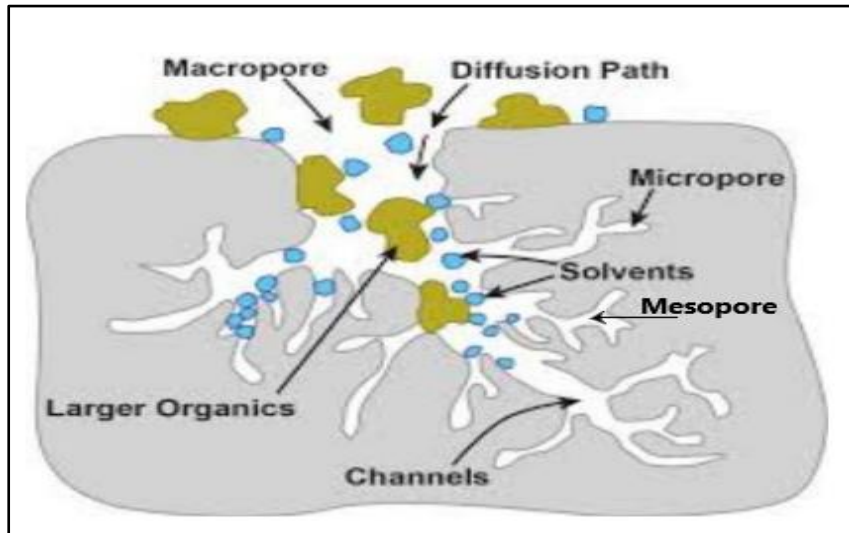
En el momento de la obtención del carbón activado, durante el proceso de la carbonización, la mayoría de los elementos distintos al carbono (H_2 , O_2 , trazas de azufre y N_2) se eliminan, el producto carbonizado está formado por cristalitas gráficas elementales desordenados con estructura porosa poco desarrollada, y es durante el proceso de activación del carbón activado, donde se desarrolla aún más esta estructura porosa. En el proceso de activación se eleva el volumen de poro y su distribución de tamaño de poro. De hecho, la activación conduce al incremento de la estructura porosa del carbón activado (Bansal & Goyal, 2005; Dabrowski & Świątkowski, 1999).

Según Dabrowski & Świątkowski (1999), la estructura porosa del carbón activado está formado por diferentes tamaños de poro, y de acuerdo a la IUPAC se dividen en tres y se muestra en la figura 2.

- Microporo. - ancho de poro menor a 2 nm.
- Mesoporo. - ancho de poro entre 2 y 50 nm.
- Macroporo. - ancho de poro mayor a 50 nm.

Figura 2

Representación esquemática de los diferentes tipos de poros



Fuente: (Kemp, 2017)

Por regla general la estructura porosa del carbón activado es tridispersa por constar de los tres tamaños de poro (microporo, mesoporo y macroporo). Así mismo los microporos son muy importantes para la adsorción, por su gran área de superficie y su gran volumen específico, mientras que los mesoporos y macroporos también cumplen una función importante en el proceso de adsorción, porque sirve como un pasaje a través del cual el adsorbato llega a los microporos. Debido a que los mesoporos que se ramifican de los macroporos, sirven como pasajes para que el adsorbente alcance a los microporos (Bansal & Goyal, 2005; Bandosz, 2006).

Los carbones activados con alta porosidad y área superficial interna, son descritos como esponjas sólidas. El área superficial posee gran cantidad de sitios activos potenciales, proporcionando la capacidad de adsorber contaminantes líquidos o gaseosos. El tamaño de poro y su área superficial afectan la capacidad de adsorción de moléculas contaminantes. Para la medición del área superficial se utiliza la ecuación Brunauer, Emmett Teller (BET) a partir de las isotermas de adsorción, mientras para las mediciones de la porosidad se utiliza el modelo matemático de Barret, Joyner y Halenda (BJH) en base de la isoterma de adsorción (Achaw, 2012; Rim Baccar Ep Yangui, 2013).

2.3.2.2. Estructura química de la superficie del carbón activado

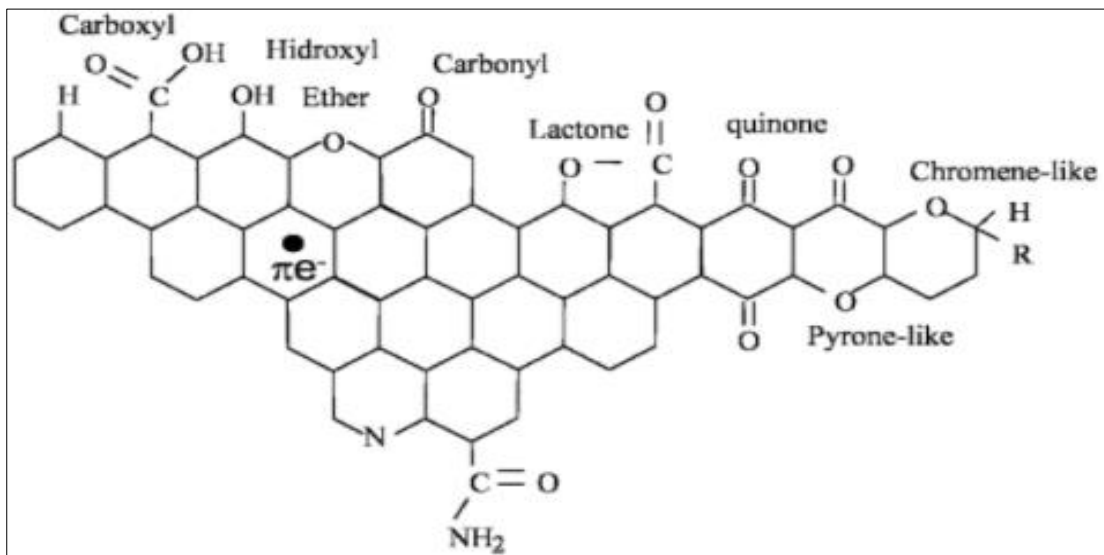
La capacidad de adsorción de carbón activado está ligado a su estructura porosa, pero también se encuentra influenciada por la estructura química de su superficie interna del carbón activado (Dabrowski & Świątkowski, 1999).

Los carbones activados se asocian con un número apreciable de heteroátomos como el oxígeno y el hidrógeno, así mismo pueden estar asociados a átomos de nitrógeno, azufre y halógenos. Estos heteroátomos se unen en los bordes de las láminas aromáticas formando compuestos superficiales (grupos funcionales superficiales), se muestra en la figura 3. Estos cumplen un papel importante en el carácter químico de la superficie del carbono, estos grupos superficiales influyen en el carácter anfótero (ácido o básico) del carbón activado y su hidrofobicidad, se muestra en la figura 4 (Bandosz, 2006; Dabrowski & Świątkowski, 1999; Rim Baccar Ep Yanguí, 2013).

Los grupos funcionales como el carboxilo, hidroxilo y lactonas tienen comportamiento como grupos ácidos, mientras que los grupos de tipo pirona y cromeno presentan comportamiento como grupos básicos (Bandosz, 2006).

Figura 3

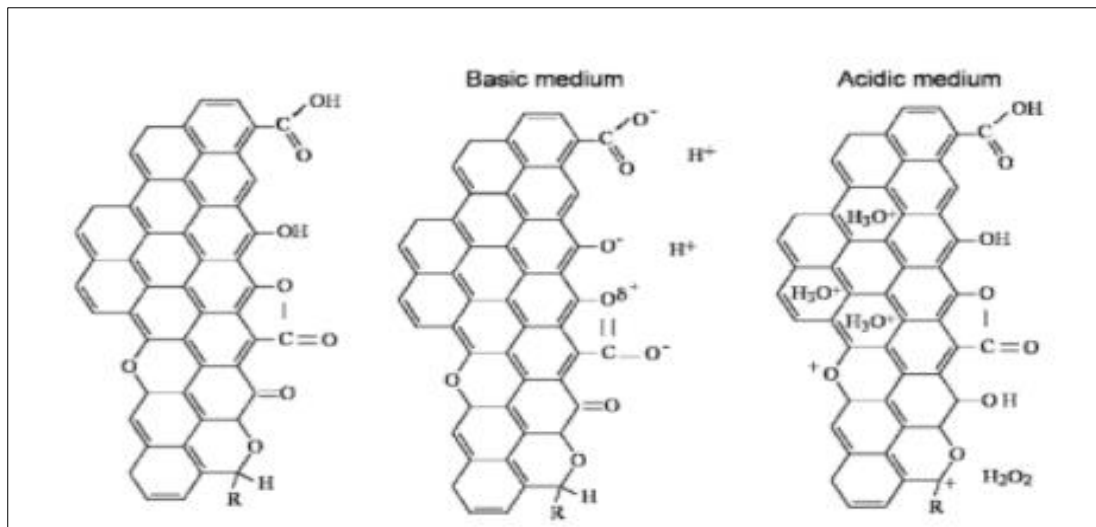
Grupos superficiales más importantes que se encuentran en la superficie del carbón activado



Fuente: (Bandosz, 2006)

Figura 4

Representación esquemática del carácter ácido y básico de los grupos funcionales superficiales del carbón activado



Fuente: (Bandosz, 2006)

2.3.2.3. Procesos de obtención del carbón activado

Los procesos de obtención de los carbones activados se pueden clasificar en diferentes tipos: físico, químico (Johnson et al., 1999; Kwiatkowski, 2012).

2.3.2.3.1. Proceso de activación física

Este proceso de activación física o térmica consta de dos etapas, en la primera etapa se produce la carbonización de la materia prima, se somete a la materia prima a la pirolisis en una atmósfera inerte a temperaturas que varían entre 450 °C a 850 °C, presentando una porosidad insipiente bloqueado por el alquitrán producido en el proceso térmico. Por ello pasa a la segunda etapa con un tratamiento térmico utilizando agentes gaseosos (dióxido de carbono, vapores, aire) a temperaturas que varían entre 800 °C a 1000 °C, para aumentar la porosidad y aumentar la capacidad de adsorción (Rim Baccar Ep Yangui, 2013; Rodriguez Reinoso & Sepúlveda Escribano, 2001)

2.3.2.3.2. Proceso de activación química

Este proceso implica la carbonización de la materia prima en presencia de agentes activantes como H_3PO_4 , $ZnCl_2$, $NaOH$ y KOH . La materia prima se impregna por agentes activantes químicos, a continuación, la muestra se seca y se carboniza en atmósfera inerte a temperaturas que varían entre 400 °C a 700 °C. Se elimina el agente activante mediante lavado con agua.

Los agentes activantes aumentan el tamaño de poro y la superficie del carbón activado. Por ello cuanto mayor sea el grado de impregnación, mayor será el tamaño de poro y la superficie del carbón activado final. Ante ello se puede afirmar que el

mejor proceso para obtener carbón activados es por el proceso de activación química en comparación del proceso de activación física, además de reducir el tiempo de proceso y necesitar temperaturas más bajas que en el proceso físico (Dabrowski & Świątkowski, 1999; Kwiatkowski, 2012; Rodriguez Reinoso & Sepúlveda Escribano, 2001).

2.3.2.4. Comparación de los mecanismos de los agentes activantes

Según Bandosz (2006) y Kwiatkowski (2012), los agentes activantes más usuales, para la obtención de carbones activados comerciales se tienen al ácido fosfórico, cloruro de zinc, hidróxido de sodio e hidróxido de potasio.

El ácido fosfórico (H_3PO_4), presenta algunas ventajas sobre otros insumos por ser menos tóxico y presenta una recuperación simple mediante el lavado con agua. También el ácido fosfórico reacciona con las especies orgánicas y se convierte en ésteres de fosfato y polifosfato, que funciona como puentes para unir las especies orgánicas entre sí y produce poros en la superficie del carbón activado. Conduciendo al carbón activado a obtener altos rendimientos de absorción y elevadas áreas superficiales (Bandosz, 2006; Kwiatkowski, 2012).

El cloruro de zinc ($ZnCl_2$) muestra algunas desventajas por la presencia de zinc residual en el carbón, es muy nocivo para el medio ambiente, corrosivo y presenta una recuperación química ineficiente. Con el $ZnCl_2$ los poros del carbón activado se forman mediante la degradación de la celulosa y la aromatización del esqueleto de carbono, el $ZnCl_2$ aumenta el rendimiento del carbón por descomposición del material carbonoso y restringe la formación del alquitrán a altas temperaturas dando lugar a microporos amplios, esto da como resultado una capacidad de adsorción ligeramente mayor y una porosidad más amplia que en el caso de la activación térmica (Bandosz, 2006; Kwiatkowski, 2012).

El hidróxido de potasio (KOH) también presenta algunas desventajas, por ser un agente químico corrosivo y costoso, pero obtienen carbones con buena área superficial. El mecanismo de activación del KOH es diferente al de H_3PO_4 y $ZnCl_2$, esta diferencia es debido a la participación de los mecanismos de gasificación en el proceso de formación de poros. Por el efecto de las reacciones de gasificación en la activación, este método necesita temperaturas mayores en comparación con los agentes activantes de H_3PO_4 y $ZnCl_2$. El KOH reacciona con el esqueleto de carbono produciendo productos sólidos y gaseosos, al mismo tiempo se produce una quema de carbono que da lugar a la porosidad, desarrollando carbones de área superficial extremadamente alta (Bandosz, 2006; Kwiatkowski, 2012).

Estos agentes activantes presentan diferentes ventajas y desventajas, pero el agente activante que presenta menores desventajas además de proporcionar una buena área superficial del carbón activado y buen rendimiento de adsorción es el H_3PO_4 , este agente químico es muy utilizado para la obtención de carbón activado para uso en la industria farmacéutica y alimentaria (Bandosz, 2006; Kwiatkowski, 2012).

2.3.2.5. Clasificación del carbón activado

Según Ahmad & Azam (2019), los carbones activados se clasifican en cuatro clases básicas según su apariencia física y son:

- Carbón Activado en Polvo (PAC).
- Carbón Activado Granular (GAC).
- Fibra de Carbón Activado (ACF).
- Tela de Carbón Activado (ACC).

En el tratamiento de agua por lo general se usa el carbón activado en polvo y el carbón activado granular (Newcombe & Dixon, 2006).

2.3.2.5.1. Carbón activado en polvo (PAC)

Presentan partículas de tamaño muy pequeño entre 10 a 100 μm de diámetro (figura 5). El PAC se utiliza preferentemente para la adsorción de contaminantes de ambiente acuoso y gaseoso, su aplicación es comúnmente en el tratamiento de aguas residuales industriales y municipales, en la decoloración del azúcar, los usos farmacéuticos y la eliminación de mercurio y dioxinas de una corriente de gas de combustión. El carbón activado en polvo no se puede utilizar en lecho fijo en columnas de adsorción (Bandosz, 2006; Dabrowski & Świątkowski, 1999; Newcombe & Dixon, 2006).

Figura 5

Carbón activado en polvo



Fuente: (Kwiatkowski, 2012)

2.3.2.5.2. Carbón activado granulado (GAC)

El tamaño de partícula es mayor que el carbón activado en polvo, presenta un tamaño de partícula entre 1 a 5 mm (figura 6). Se utiliza ampliamente en el tratamiento de corrientes contaminadas en fase acuosa y gaseosa. Son utilizadas en lechos fijos de columnas de adsorción en procesos continuos y con baja caída de presión. Son ampliamente utilizados para eliminar micro contaminantes como pesticidas, productos químicos industriales, sabores y olores. Así mismo se está utilizando en países como Australia para la eliminación de sabores, olores y como seguro contra la proliferación de algas tóxicas en fuentes de agua. Presenta ventajas sobre el PAC, puesto que ofrece una menor caída de presión además que tiene la capacidad de reactivar el carbón activado una vez utilizado, reutilizando de manera constante. Así mismo el carbón activado granular viene remplazando al carbón activado en polvo en muchas aplicaciones como el tratamiento de agua potable (Bandosz, 2006; Kwiatkowski, 2012; Newcombe & Dixon, 2006).

Figura 6
Carbón activado granular



Fuente: (Kwiatkowski, 2012)

2.4. PROPIEDADES DEL CARBÓN ACTIVADO COMERCIAL

En la tabla 2 se muestra las propiedades fisicoquímicas de diferentes carbones activados comerciales.

Tabla 2*Propiedades fisicoquímicas de diferentes carbones activados comerciales*

Carbón activado comercial	Porcentaje ceniza (%)	Porcentaje de humedad (%)	Área superficial (m²/g)	Densidad aparente (g/cm³)	Volumen total de poro (cm³/g)
NUCHAR SA*	6,3	8,5	1351		
SN	8,2	9,4	1430		
WVG	6,4	5,5	1607	---	---
WVW	5,5	12,9	1215		
WVL	7,6	7,7	1912		
FILTRASORB*					
100	4,8	3,9	524		
200	3,9	4,0	482	---	---
300	8,5	2,9	600		
400	5,4	3,1	1236		
DARCO HDC*	29,4	4,2	556		
HD3000	18,7	7,9	927		
S51	20,7	5,9	520	---	---
G60	1,6	4,2	410		
KB	3,6	22,3	2162		
CLARIMEX**	5,00	---	600	0,38	0,93

Fuentes: (Corapcioglu & Huang, 1987) *

(Minaya Pereyra et al., 2020) **

2.5. ADSORCIÓN

La adsorción es un proceso por el cual el adsorbato (moléculas, átomos o iones en fase gaseosa o líquida) se concentran en las superficies sólidas del adsorbente, a través de la fuerza impulsora de transferencia de masa y se une a los puntos activos del adsorbente sólido a través de enlaces físicos o químicos (Kwiatkowski, 2012).

El mecanismo de adsorción consta de tres pasos, primero es la transferencia de moléculas contaminantes desde la solución hacia los sitios activos del adsorbente, el segundo paso es la penetración de la partícula contaminante en la estructura interna de las partículas adsorbentes, y el tercer paso es la rápida unión del adsorbato a la superficie interna de los poros y canales (Pourhakkak et al., 2021).

Según Bansal & Goyal (2005) y Pourhakkak et al. (2021), dependiendo de la naturaleza de las fuerzas involucradas la adsorción es de dos tipos:

Adsorción física (fisisorción). - en la adsorción física, el adsorbato se une a la superficie por las fuerzas de Van der Waals relativamente débiles.

Adsorción química (quimisorción). - se basa en las reacciones químicas que ocurren entre los restos funcionales de la superficie del adsorbente y moléculas del adsorbato, seguida de intercambio de electrones dando como resultado un enlace químico fuerte entre ellos.

Existe una diferencia entre estos dos tipos de adsorción siendo la más importante la magnitud de la entalpía de adsorción. Otro punto importante es la diferencia del espesor de la fase adsorbida. En la fisisorción es multimolecular, mientras que en la quimisorción es unimolecular.

2.5.1. Isotermas de adsorción

La interacción de equilibrio entre la concentración de la fase fluida y la concentración de partículas de adsorbente a una temperatura fija se denomina isoterma de adsorción. Este equilibrio se describe expresando la cantidad de soluto adsorbido por unidad de masa de adsorbente en función de la concentración de soluto que queda en la solución (El-Naas & Alhajja, 2011; McCabe et al., 2007).

Las isotermas de adsorción nos brindan información sobre el adsorbato y el adsorbente además del proceso de adsorción, ayudando en la determinación del área superficial del adsorbente, el volumen de poros y su distribución de tamaño, el calor de adsorción y la capacidad de adsorción en un adsorbente (Bansal & Goyal, 2005).

Existen varias representaciones matemáticas de las isotermas de adsorción pero las más comunes son las isotermas de Langmuir, Freundlich (Mousavi et al., 2018).

2.5.1.1. Isotherma de Langmuir

La isoterma de Langmuir es uno de los modelos matemáticos más utilizados en la adsorción, esta isoterma asume que los sitios de adsorción tienen energía y entalpía similar y la adsorción se lleva a cabo en una superficie homogénea como cobertura monocapa sin la interacción de sus moléculas adsorbidas (Kwiatkowski, 2012; Mousavi et al., 2018).

La forma general de la ecuación de Langmuir es la siguiente:

$$\frac{q_e}{Q} = \frac{bC_e}{1 + bC_e} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

- q_e = Cantidad de adsorbato adsorbido en el adsorbente (mg/g)
- C_e = Concentración de equilibrio de adsorbato en la solución (mg/L)
- Q = Constante que muestra la cantidad máxima de adsorbato adsorbido en el adsorbente (mg/g) como cobertura de la monocapa
- b = Constante de la isoterma relacionada con la energía libre (L/mg)

2.5.1.2. Isotherma de Freundlich

El modelo matemático de adsorción de Freundlich, asume que la adsorción tiene lugar como multicapa en una superficie sólida heterogénea. Los sitios de adsorción más fuertes adsorben primero el adsorbato y la fuerza de unión se debilita la ocupación de los sitios de adsorción (Kwiatkowski, 2012; Rim Baccar Ep Yangui, 2013).

La isoterma de Freundlich es la siguiente:

$$q_e = K_F(C_e)^{\frac{1}{n}} \quad (\text{Ec. 2})$$

q_e = Concentración de sorción en equilibrio de soluto por gramo de adsorbente (mg/g)
 C_e = Concentración acuosa en equilibrio del soluto (mg/L)
 K_F, n = Constantes de Freundlich que están relacionados con la capacidad de adsorción y la intensidad de adsorción

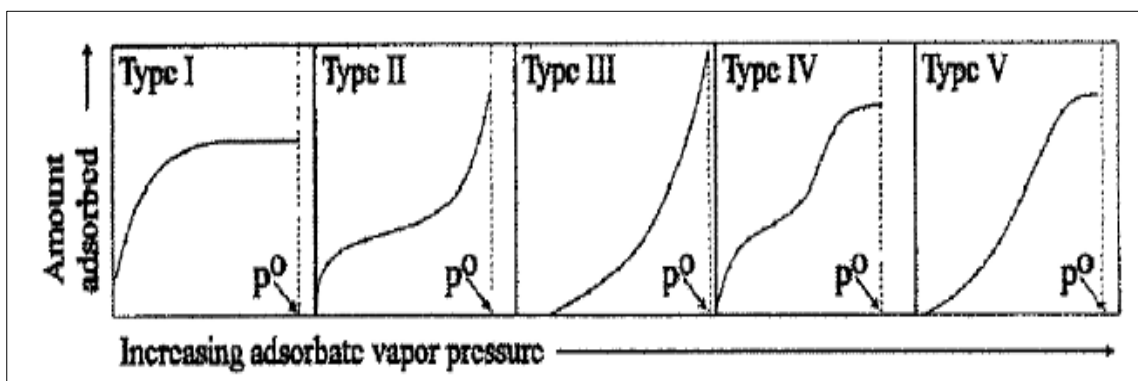
2.5.2. Equilibrio de adsorción

Según Johnson et al. (1999), la relación de equilibrio entre un adsorbato específico y el adsorbente generalmente se enfrenta en términos de isotermas de adsorción, expresa la cantidad de adsorbato adsorbido en función de la concentración de la fase gaseosa a una temperatura constante. Se observa cinco tipos de isotermas que mencionaremos a continuación:

- La isoterma Tipo I, representa sistemas en los que solo se produce la adsorción de una sola capa.
- La isoterma Tipo II, indica la formación de multicapas adsorbidas.
- La isoterma Tipo III, se desarrolla en sistemas donde la cantidad de material adsorbido aumenta sin límite a medida que su saturación se aproxima a la unidad.
- La isoterma Tipo IV, describe un proceso de adsorción multicapa en el que se ha producido el llenado completo de los capilares más pequeños.
- La isoterma Tipo V, es característico de los sistemas en los que se ha producido la condensación del adsorbato.

Figura 7

Tipos de Isotermas



Fuente: (Johnson et al., 1999)

2.6. TECNOLOGÍAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON TINTES SINTÉTICOS

Las aguas residuales de las diversas industrias, que contienen colorantes o tintes sintéticos presentan dificultades para su tratamiento, debido a que colorantes o tintes poseen moléculas con estructuras aromáticas recalcitrantes y estables a la luz. Por ello se ha desarrollado diversas tecnologías para eliminar el color y se dividen en tres

categorías y son: métodos físicos, químicos y biológicos. Utilizando estas tecnologías para el tratamiento de agua residuales es posible contribuir a la protección del medio ambiente y la salud de los seres vivos (Piaskowski et al., 2018; Sivarajasekar & Baskar, 2015; Slama et al., 2021).

2.6.1. Métodos físicos

En el tratamiento de aguas residuales industriales, se utilizan diferentes métodos físicos que implican diversos procesos convencionales como adsorción, filtración, intercambio iónico, sedimentación entre otros. Estos consiguen eliminar sustancias disueltas y no disueltas sin necesidad de cambiar su estructura química (Rim Baccar Ep Yangui, 2013; Sivarajasekar & Baskar, 2015).

El proceso de adsorción es un método físico muy conocido para la eliminación de contaminantes de las aguas residuales, además de tener una operación fácil y eficiente que se aplica para eliminar efluentes que contienen colorantes. Este proceso nos brinda varias opciones resaltantes para el tratamiento de aguas residuales con tintes sintéticos, fundamentalmente por trabajar con adsorbentes económicos, además que este proceso tiene ventajas de no producir residuos perjudiciales, tiene la capacidad de tratar grandes volúmenes de agua y no requieren pasos adicionales de pretratamiento antes de su aplicación (Sivarajasekar & Baskar, 2015; Slama et al., 2021; Srivatsav et al., 2020).

2.6.2. Métodos químicos

En los métodos químicos se encuentran los procesos de coagulación, la floculación, ozonización, precipitación entre otros. Estos métodos químicos se basan en la interacción química de los contaminantes que se desea eliminar del agua y la aplicación de productos químicos que ayudan a la separación de contaminantes del agua (Rim Baccar Ep Yangui, 2013; Slama et al., 2021).

2.6.3. Métodos biológicos

Los métodos biológicos son aquellos que implican a organismos vivos que utilizan sustancias orgánicas o inorgánicas, para la alimentación y así cambiar sus características químicas y físicas. En los métodos biológicos tenemos a la biodegradación como la decoloración fúngica, la degradación microbiana, la adsorción por biomasa microbiana y los sistemas de biorremediación, que se aplican en el tratamiento de aguas residuales industriales debido a que los microorganismos pueden acumular y degradar diferentes contaminantes (Rim Baccar Ep Yangui, 2013; Sivarajasekar & Baskar, 2015).

2.7. COLORANTES O TINTES SINTÉTICOS

En 1856, William Henry Perkin, descubrió accidentalmente el primer tinte sintético, la mauveína, al intentar sintetizar la quinina. Este descubrimiento, inició una nueva generación de colorantes. A partir de finales del siglo XIX ya se habían desarrollado 10 000 nuevos tintes sintéticos. Los colorantes en la actualidad se utilizan ampliamente en las diversas industrias, donde podemos citar la textil, alimentaria, cosmética, papel, entre otras. Es importante anotar que la industria textil es el mayor consumidor de colorantes (Benkhaya et al., 2017, 2020).

Según Benkhaya et al. (2020) y Pereira & Alves (2012), los tintes sintéticos son sustancias orgánicas insaturadas complejas que absorben la luz y dan color a la región visible. Son solubles en agua y aceite. Imparten color debido a que cuentan con grupos cromóforos y auxocromo. Existen diversos sistemas de clasificación de colorantes, entre ellos el más representativo es la clasificación de colorantes por su aplicación industrial (tabla 3) y son:

Tabla 3

Clasificación de los colorantes sintéticos por su aplicación industrial

Colorantes	Ejemplo de colorantes	Aplicaciones
Tintes ácidos	Rojo congo Metilo (naranja y rojo) Ácido (azul, negro, violeta)	Lana, seda, nailon (poliamida), poliuretano, fibras.
Tintes básicos	Azul de metileno, rojo básico, violeta cristal, verde brillante	Poliéster, lana, seda, nylon, papel.
Tintes directos	Amarillo martius, directo (negro, naranja, azul, violeta, rojo)	Algodón, lana, lino, seda, cuero.
Tintes azoicos	Monoazoico, diazoico, triazo	Textil, cosméticos, cuero, papel, pintura, farmacéutica, industrias alimentarias.
Tintes de azufre	Azufre negro Leuco azufre negro	Fibras celulósicas, seda y papel en cantidades limitadas.

Colorantes	Ejemplo de colorantes	Aplicaciones
Tintes de tina	Índigo, benzantrona, tina azul, tina verde	Lana, lino, lana, fibras de rayón, algodón.
Tintes reactivos	Reactivo (rojo, azul, amarillo, negro) Remazol (azul, amarillo, rojo)	Fibra de lana, poliamida.
Tintes dispersos	Disperso (azul, rojo, naranja, marón)	Poliamida, fibras poliéster, nailon, poliacrilonitrilo.
Tintes mordientes	Mordiente azul	Lana, cuero, seda.

Fuente: (Affat, 2018; Benkhaya et al., 2020)

2.8. IMPACTO DE LOS TINTES SINTÉTICOS EN EL MEDIO AMBIENTE

El uso de los tintes sintéticos en las industrias textiles y otras industrias, traen consigo efluentes que contienen tintes, causando peligros ambientales principalmente por la contaminación del agua (Chavan, 2013; Pereira & Alves, 2012).

Los tintes sintéticos son fáciles de detectar, pero difíciles de eliminar del agua, debido a su estructura química aromática. Los efluentes industriales descargados en los cuerpos de agua, son estables y resistentes a la luz, permaneciendo por periodos largos. Al acumularse ocasionan el incremento de la demanda bioquímica de oxígeno, afectando el pH y la demanda química de oxígeno. Además estos efluentes industriales coloreados, no solo afectan el mérito estético de los cuerpos de agua también afectan en la fotosíntesis de las plantas acuáticas, al dificultar la penetración de la luz (Chavan, 2013; Pereira & Alves, 2012; Piaskowski et al., 2018; Sivarajasekar & Baskar, 2015; Soni et al., 2021).

En la actualidad la industria textil es el mayor consumidor de colorantes sintéticos, se estima que cada año se produce 700 000 toneladas de tintes sintéticos en todo el mundo, de los cuales 200 000 toneladas se liberan como efluentes residuales en los cuerpos de agua (Soni et al., 2021).

Estos efluentes alteran los parámetros del agua, como la demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, pH, etc., ya que los colorantes sintéticos contienen anillos aromáticos que causan toxicidad, mutagenicidad, tienen efectos carcinogénicos, afectando la vida acuática. El color oscuro y su alta turbidez de estos efluentes provocan la interferencia de la luz solar a través del agua, disminuyendo la cantidad de oxígeno disuelto y alterando el pH. Estos factores conducen a la inhibición de la fotosíntesis en las plantas acuáticas, aumentan el crecimiento de

microorganismos afectando la flora y fauna (Jadhav & Jadhav, 2021; Slama et al., 2021; Soni et al., 2021).

2.9. APLICACIONES DEL CARBÓN ACTIVADO

El carbón activado es el adsorbente más versátil, por presentar una gran área superficial, estructura porosa y alta capacidad de adsorción. Como ya hemos indicado, el carbón activado es aplicado por múltiples industrias para la eliminación de especies químicas potencialmente tóxicas, mediante procesos de adsorción en fase líquida o gaseosa (Dabrowski & Świątkowski, 1999; Rodríguez Reinoso & Sepúlveda Escribano, 2001).

2.9.1. Adsorción en la fase líquida

Según Kwiatkowski (2012), el uso del carbón granular y en polvo se utilizan en la fase líquida y sus aplicaciones más relevantes en esta fase son:

2.9.1.1. Tratamiento de agua

El carbón activado se aplica en el tratamiento de agua potable, para la eliminación de compuestos orgánicos y para mejorar el olor y sabor. También es una técnica para la eliminación de trazas de metales pesados (Dabrowski & Świątkowski, 1999; Rodríguez-Reinoso, 2001).

Así mismo el carbón activado se utiliza en el tratamiento de aguas residuales municipales, después de los procesos primarios, secundarios y como proceso terciario (Rodríguez Reinoso & Sepúlveda Escribano, 2001; Rodríguez-Reinoso, 2001).

El carbón activado también se utiliza en el tratamiento de aguas residuales industriales, por contar con la capacidad de adsorber diferentes contaminantes como los compuestos aromáticos, hidrocarburos, detergentes, colorantes, fenoles, entre otros. Se utiliza para tratar efluentes de diversas industrias como la industria textil, tintes, fábricas de pulpa y papel, fertilizantes, cosméticos, farmacéutica, etc (Rodríguez-Reinoso, 2001).

2.9.1.2. Procesamiento de alimentos y bebidas

Se utiliza el carbón activado en las industrias de alimentos y bebidas, para la eliminación de colores y olores causado por contaminantes. Se utiliza en el tratamiento de vino y licores para eliminar rastros de aceite de fusel. También en la producción de aguardiente es usado para eliminar sabores indeseables y reducir la cantidad de aldehídos en el destilado crudo. En la industria de la cerveza se utiliza para mejorar su color y eliminar sabores atribuidos al fenol (Dabrowski & Świątkowski, 1999; Rodríguez-Reinoso, 2001).

2.9.1.3. Industria farmacéutica

Se utiliza el carbón activado en la industria farmacéutica, para la purificación y recuperación de antibióticos, analgésicos, esteroides, vitaminas, aminoácidos entre otros (Corporation, s. f.; Rodríguez-Reinoso, 2001).

2.9.1.4. Otros

En otras aplicaciones tenemos el uso del carbón activado para la recuperación de oro. También se aplica el carbón activado como medicamento para la eliminación de sobredosis de droga por ingesta oral. El carbón activado se utiliza para resolver problemas gastrointestinales por ingesta oral en forma de tabletas (Activated carbon as raw ingredient in chemicals, pharma, s. f.; Dabrowski & Świątkowski, 1999).

2.9.2. Adsorción en la fase gaseosa

Según Kwiatkowski (2012), el carbón activado en la fase gaseosa se utiliza generalmente en forma de gránulo, fibras, tela, para adsorber gases. Las aplicaciones más relevantes en la fase gaseosa son:

2.9.2.1. Purificación de gases

Según Dabrowski & Świątkowski (1999) y Kwiatkowski (2012), el uso del carbón activado es utilizado en los espacios como hospitales, laboratorios, oficinas y plantas químicas donde se requiere aire limpio, para su purificación se utilizan sistemas con filtro de carbón tipo panel.

También se usa en los sistemas de purificación de aire de las cabinas de automóviles. Así mismo, se puede instalar carbón activado en los tanques de combustible de automóviles para evitar la fuga de los vapores de gasolina hacia la atmósfera, así como para la eliminación de dióxido de azufre y óxido nitroso del gas de combustión. También es aplicado para fines militares, como el uso de máscaras de gas impregnados con carbón activado.

2.9.2.2. Recuperación de solventes

El carbón activado es muy importante en la industria para la recuperación de vapores solventes de las corrientes de aire. Los principales solventes recuperados por la adsorción del carbón activado son acetona, benceno, tolueno, etanol, éter etílico, pentano, xileno, hidrocarburos clorados y aromáticos, tetrahidrofurano (Rodríguez Reinoso & Sepúlveda Escribano, 2001).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

El presente trabajo de investigación es del tipo experimental, puesto que se manipulan variables y el sesgo es controlado por el investigador.

Un estudio experimental, se lleva a cabo cuando un investigador desea rastrear relaciones de causa y efecto, realizando un control adecuado de las variables independientes con el objetivo de crear el fenómeno mismo que se indaga y poder observarlo (Avalos Jacobo, 2014; Tanner, 2018).

Según Hernández Sampieri & Fernández Collado (2014), el tipo de investigación experimental, manipula tratamientos, estímulos, influencias o interacciones denominadas variables independientes por ello se utilizó en el presente trabajo las variables de temperatura, concentración del activante químico y el tiempo, para observar sus efectos sobre otras variables que son las dependientes (área superficial y capacidad de adsorción) en una situación de control.

Existen diferentes análisis del tipo y nivel de investigación por diferentes autores, pero se toman en cuenta a los autores que brinden mayor confianza.

3.2. NIVEL DE INVESTIGACIÓN

En concordancia con los artículos 1.1, 8.1, 11.1, 20.1 mostrado en el trabajo de Rojas Cairampoma (2015), se elige el nivel de investigación aplicada, porque se relaciona con la naturaleza del trabajo de investigación realizado, donde se busca aplicar creativamente los conocimientos científicos y tecnológicos, para resolver un problema relacionado con la remoción de colorantes sintéticos. El considerar este trabajo de

investigación como aplicativo, es consistente también con lo declarado por Tanner (2018), quien indica que un trabajo de investigación presenta nivel aplicativo porque nos plantea resolver un problema, enmarcando una innovación técnica científica (Tanner, 2018).

El presente trabajo de investigación planteó resolver un problema, que en este caso es la remoción de colorantes sintéticos por adsorción, utilizando como material adsorbente al carbón activado obtenido a partir de mazorcas de maíz, por tanto se considera que es de nivel aplicativo.

3.3. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

Se empleó un diseño experimental factorial 2^3 , el cual nos permitió evaluar el impacto de tres factores sobre la capacidad de adsorción de colorantes de los carbones activados obtenidos (temperatura, tiempo y concentración de ácido fosfórico). Cada variable presenta 2 niveles, obteniéndose 8 combinaciones (tabla 4).

Mediante el diseño factorial empleado fue posible evaluar el impacto de estos 3 factores, sobre la capacidad de adsorción del carbón activado y seleccionar la combinación de variables con la cual se obtiene el mejor carbón activado en términos de capacidad de adsorción.

El análisis estadístico fue realizado mediante ANOVA factorial, para probar la significancia de los resultados.

Así mismo, se utilizó la metodología de superficie respuesta, con fines de optimización.

Tabla 4

Diseño factorial 2^3 sin replica

Pruebas	Tratamientos del carbón activado	Temperatura (°C)	Tiempo (h)	Concentración de H_3PO_4 (%)
1	B-85%	500	2	85
2	D-85%	400	2	85
3	M-85%	500	1,5	85
4	L-85%	400	1,5	85
5	A-45%	500	2	45
6	S-45%	400	2	45
7	P-45%	500	1,5	45
8	X-45%	400	1,5	45

3.4. POBLACIÓN

Se recolectaron 20 kg de mazorcas de maíz amiláceo, las cuáles fueron utilizadas para la obtención del carbón activado.

3.5. MUESTRA

De los 20 kg de mazorcas de maíz tomados aleatoriamente en el distrito de Ongoy, se optó por tomar una muestra final de 13 kg el cual se utilizó para el proceso de obtención del carbón activado.

3.6. MATERIALES Y EQUIPOS

3.6.1. Materiales

03 soportes universales
03 embudos de vidrio
02 fioles de 500 mL
02 fioles de 25 mL
02 probetas de 10 mL
30 tubos de ensayo
01 espátula
Papel aluminio
01 bandeja de aluminio
02 pisetas
04 crisoles de porcelana capacidad 200 mL
04 vasos de precipitación de 500 mL
02 varillas de vidrio
01 luna de reloj
1 metro de papel filtro Whatman 40
01 pinza metálica
01 jeringa de 60 mL
01 desecador

3.6.2. Equipos

Balanza analítica
Molino de martillo
Espectrofotómetro UV- VIS
pH metro
Balanza electrónica
Equipo de tamizado
Determinador de humedad digital
Equipo de volutrol de 100 mL
Mufla de 800 °C
Horno eléctrico de 300 °C

03 equipos de agitación magnética

3.6.3. Reactivos

Agua destilada H_2O

Ácido fosfórico H_3PO_4

Nigrosina $C_{22}H_{14}N_6Na_2O_9S_2$

Azul de metileno $C_6H_{18}ClN_3S \cdot XH_2O$

3.7. MATERIA PRIMA

Se emplearon mazorcas de maíz de la variedad amiláceo como materia prima (figura 8 y 9), las cuales fueron recolectadas en el distrito de Ongoy (Latitud Sur $13^\circ 24' 14''$, Longitud Oeste $73^\circ 40' 12''$), provincia de Chincheros del departamento de Apurímac.

Figura 8

Mazorcas de maíz amiláceo



Figura 9

Maíz amiláceo



3.8. LUGAR DE INVESTIGACIÓN

El presente trabajo de investigación, se realizó en los laboratorios de Tránsito de Masa y de Química Orgánica, de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, en un año calendario del 2022.

3.9. MÉTODO DE OBTENCIÓN

3.10. Preparación de la materia prima (mazorcas de maíz)

La materia prima recolectada (mazorcas de maíz), fue clasificada, pesada y tamizada. El proceso se muestra en el anexo 2 con mayor detalle.

3.10.1. Caracterización de la materia prima (mazorca de maíz molida)

La materia prima molida y tamizada fue caracterizada mediante la determinación de la humedad y contenido de ceniza.

3.10.1.1. Determinación de la humedad

La determinación de humedad se realizó empleando el método descrito por Marshall, (2010). Se describe en el anexo 2.

3.10.1.2. Determinación de cenizas

La determinación de cenizas se realizó empleado el método AOCA 900.02 A o B 920.117,923.03 (Marshall, 2010). Se describe en el anexo 2.

3.10.2. Obtención de carbón activado mediante activación química con ácido fosfórico

El carbón activado de mazorcas de maíz, fue obtenido mediante un proceso de activación química con ácido fosfórico.

De acuerdo al diseño experimental factorial planteado, se variaron tres parámetros en el proceso de obtención del carbón activado: concentración de agente activante (85% y 45%), temperatura de carbonización (400 °C y 500 °C) y tiempo de carbonización (1,5 horas y 2 horas).

Se describe el proceso de obtención de carbón activado en el anexo 3.

3.10.3. Caracterización del carbón activado obtenido a partir de mazorcas de maíz amiláceo

El carbón activado obtenido a partir de las mazorcas de maíz, fue caracterizado en función del porcentaje de humedad, contenido de cenizas, densidad aparente, distribución de tamaño de partícula, difracción de rayos X y determinación del área superficial por el método BET.

La determinación del área superficial y la difracción de rayos X del carbón activado obtenido, fue realizado en el Laboratorio de Investigación de Fisicoquímica (LABINFIS) de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). La

determinación del área superficial fue realizada empleando el equipo Gemini VII 2390 V1.02.

3.10.3.1. Determinación de humedad

Para la determinación de la humedad del carbón activado, se ha empleado el método descrito por Marshall (2010), el cual se describe en el anexo 3.

3.10.3.2. Determinación de ceniza

La determinación de ceniza del carbón activado se realizó empleando el método ASTM D2866-11 (ASTM D2866 – 11, s. f.), el cual se describe en el anexo 3.

3.10.3.3. Determinación de la densidad aparente

La determinación de la densidad aparente se realizó utilizando el método descrito por Mkungunugwa et al. (2021), el cual se describe en el anexo 3.

3.10.3.4. Distribución de tamaño de partícula

Para la determinación de la distribución de tamaño de partícula del carbón activado, se utilizó el método ASTM D 2862-97 (ASTM D 2862 – 97, s. f.) modificado. El procedimiento se indica en el anexo 3.

3.10.3.5. Análisis de difracción de rayos X

El análisis de difracción de rayos X se llevó a cabo mediante el equipo Rigaku Miniflex II Desktop en el Laboratorio de Investigación de Físicoquímica (LABINFIS) de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI).

3.10.3.6. Análisis de área superficial

La determinación del área superficial del carbón activado obtenido, fue realizado en el Laboratorio de Investigación de Físicoquímica (LABINFIS) de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), empleando el equipo Gemini VII 2390 V1.02.

3.10.3.7. Prueba de adsorción de colorantes del carbón activado obtenido

Para la prueba de adsorción de colorantes, se utilizaron los métodos de Farnane et al. (2018) y Rim Baccar Ep Yanguí (2013), con ligeras modificaciones. Se describe en el anexo 4.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Resultados

4.1.1. Caracterización de la Materia Prima

Tabla 5

Caracterización física de las mazorcas de maíz. Laboratorio de Transferencia de Masa de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho 2022.

Muestra	Porcentaje (%) de humedad	Porcentaje (%) de cenizas totales
Mazorcas de maíz molido	5,693	0,019

4.1.2. Rendimiento de los carbones activados de mazorcas de maíz obtenidos por activación química con H_3PO_4

Tabla 6

Rendimiento de carbón activado obtenido a partir de mazorcas de maíz amiláceo. Laboratorio de Transferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.

En la tabla 6 se visualiza los resultados del rendimiento de cada uno de los carbones activados obtenidos a partir de mazorcas de maíz por activación química empleando H_3PO_4 . De acuerdo a ella, el tipo de carbón activado que presenta mayor rendimiento

Tratamiento del carbón activado	Porcentaje de rendimiento
B-85%	42,254
D-85%	55,206
M-85%	52,296
L-85%	42,957
A-45%	57,569
S-45%	50,829
P-45%	54,288
X-45%	40,897

en su obtención es el A-45%, el cual ha sido obtenido bajo las siguientes condiciones de operación: T = 500 °C, t = 1,5 h y % H₃PO₄= 45%. Lo cual indica que el mayor rendimiento en la obtención del carbón activado se ha obtenido al trabajar con la menor concentración de agente activante.

4.1.3. Caracterización Física de los Carbones Activados Obtenidos

Tabla 7

Caracterización física de los carbones activados de mazorcas de maíz. Laboratorio de Transferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.

Tratamiento del carbón activado de mazorcas de maíz	Porcentaje (%) de cenizas totales	Porcentaje (%) de humedad	Densidad de aparente (g/mL)
B - 85%	14,860	14,595	0,241
A - 45%	12,762	12,370	0,230
D- 85%	13,700	17,750	0,231
S - 45%	13,500	15,540	0,224
M - 85%	16,000	15,510	0,232
P - 45%	15,910	13,925	0,234
L - 85%	16,762	15,990	0,242
X - 45%	14,762	13,860	0,215

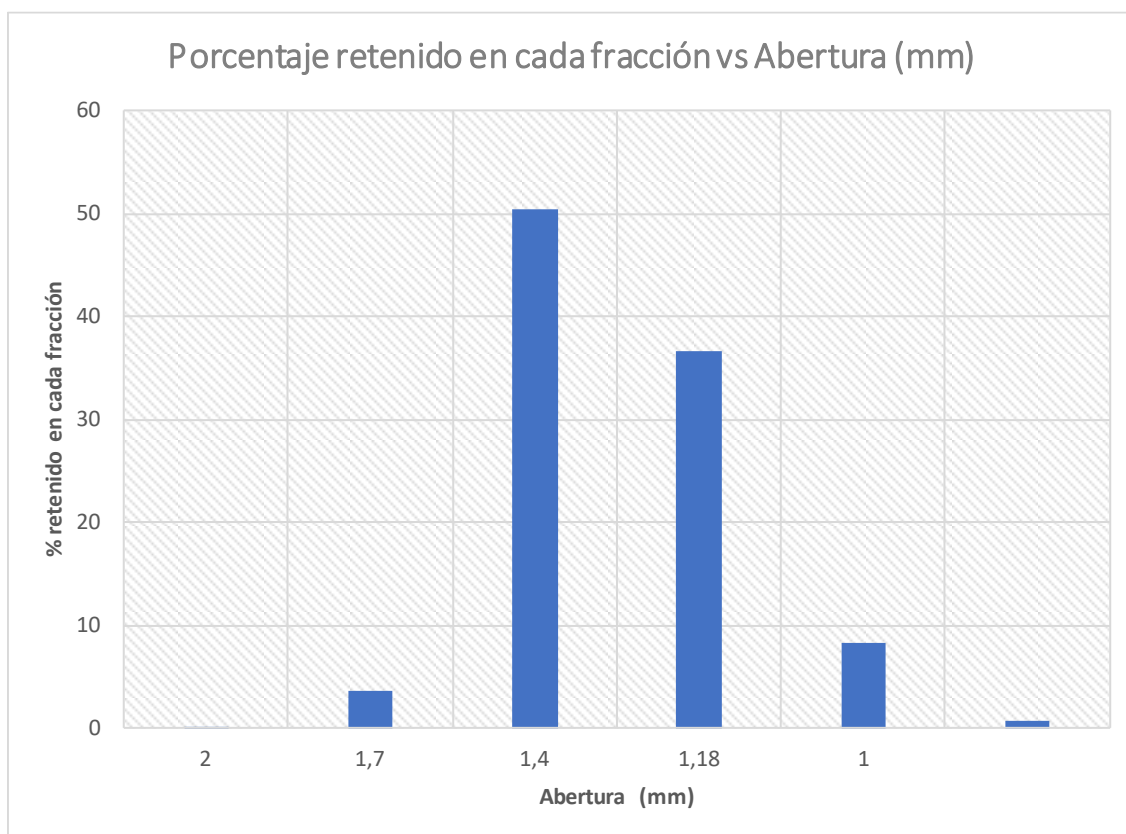
En la tabla 7, se visualiza los resultados del porcentaje de cenizas totales, porcentaje de humedad y la densidad aparente del carbón activado de mazorcas de maíz caracterizadas. Donde el carbón A-45% presenta los menores valores en comparación a los demás carbones activados.

4.1.4. Determinación del tamaño de partícula del carbón activado

En la figura 10, se visualiza el análisis de tamaño de partícula del carbón activado A-45%. El análisis se realizó en este carbón activado, debido a que fue el que presentó mayor capacidad de adsorción de colorantes.

Figura 10

Determinación del tamaño de partícula del carbón activado A-45% de mazorcas de maíz. Laboratorio de Transferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.



4.1.5. Capacidad de adsorción del carbón activado con el colorante azul de metileno

Se ha evaluado la capacidad de adsorción y el porcentaje de remoción del colorante azul de metileno de los 8 tipos de carbón activado obtenidos a partir de mazorcas de maíz (B-85%, D-85%, M-85%, L-85%, A-45%, S-45%, P-45%, X-45%) y en un carbón activado de origen comercial con la finalidad de comparar sus capacidades de adsorción.

La capacidad de adsorción fue evaluada empleando una solución de azul de metileno con concentración inicial de 100 ppm, en un sistema con agitación continua a una velocidad de 450 rpm a temperatura ambiente. Las tablas 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 y las figuras 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 y 18, muestran la capacidad de adsorción de los 8 tipos de carbones activados obtenidos en función del tiempo, observándose que, en todos los casos, la capacidad de adsorción del colorante azul de metileno incrementa en función del tiempo, obteniéndose en algunos de ellos un estado cuasi estacionario a los 180 minutos.

Tabla 8

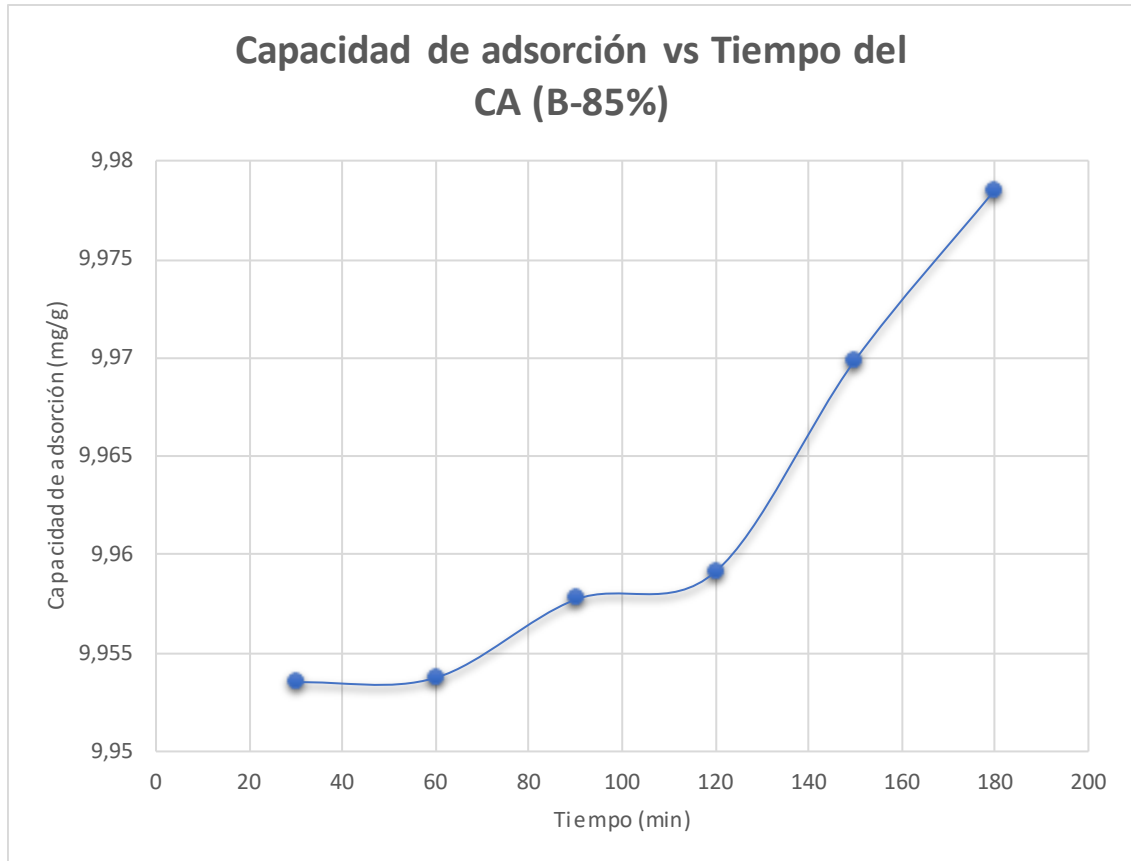
Resultados de la capacidad de adsorción del carbón activado (B-85%), utilizando el colorante azul de metileno. Laboratorio de Trasferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.

(B-85%)			
Tiempo (minutos)	Concentración del colorante (ppm)	% remoción	Capacidad de adsorción (mg/g)
0	100	---	---
30	0,464	99,536	9,954
60	0,462	99,538	9,954
90	0,422	99,578	9,958
120	0,408	99,592	9,959
150	0,301	99,699	9,970
180	0,214	99,786	9,979

Nota: parámetros de proceso de obtención de B-85%: temperatura = 500 °C, tiempo = 2 h, concentración del H₃PO₄ = 85%

Figura 11

Efecto del tiempo de contacto sobre la capacidad de adsorción de carbón activado (B-85%) con el colorante azul de metileno. Laboratorio de Trasferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.



CA (Carbón activado)

La tabla 8 y la figura 11 muestran que la capacidad de adsorción de azul de metileno del carbón activado B-85% se incrementa en función del tiempo, obteniéndose al minuto 180 una capacidad de adsorción de 9,970 mg/g.

Tabla 9

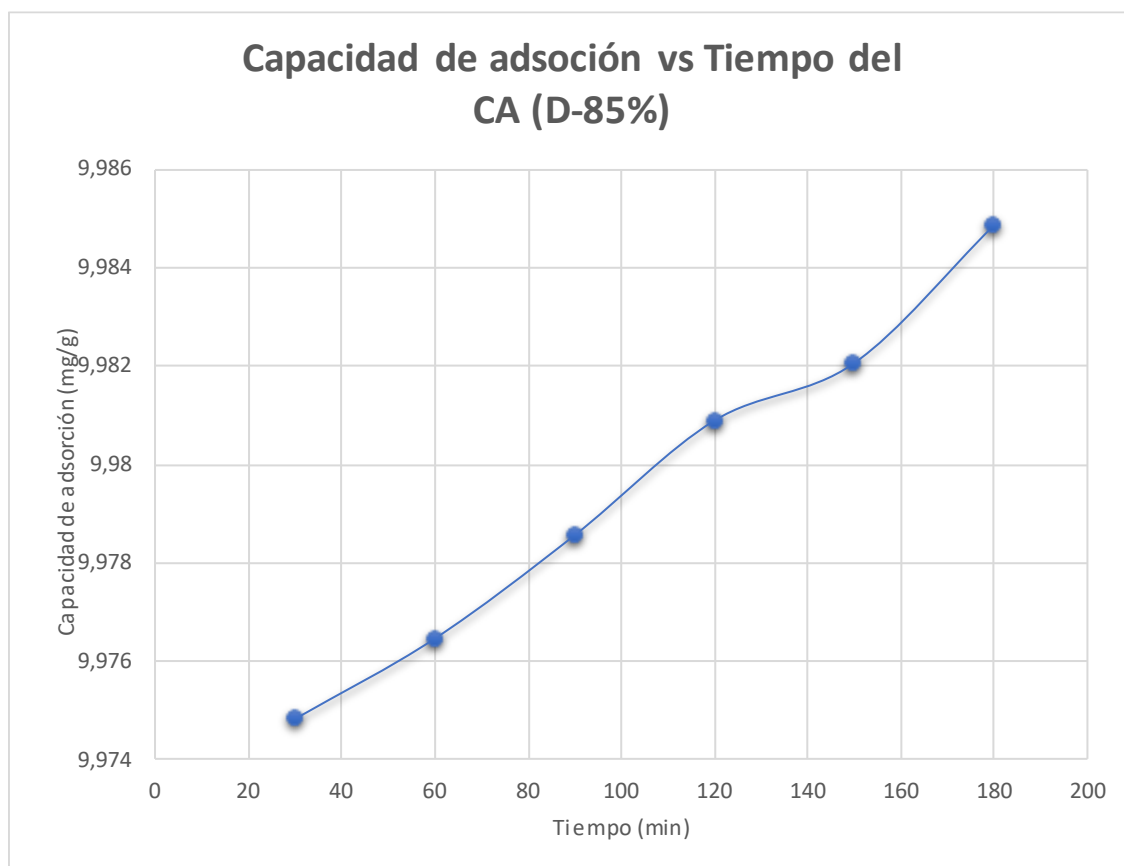
Resultados de la capacidad de adsorción del carbón activado (D-85%), utilizando el colorante azul de metileno. Laboratorio de Transferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.

(D-85%)			
Tiempo (minuto)	Concentración del colorante (ppm)	% remoción	Capacidad de adsorción (mg/g)
0	100	----	----
30	0,252	99,748	9,975
60	0,236	99,764	9,976
90	0,214	99,786	9,979
120	0,191	99,809	9,981
150	0,179	99,821	9,982
180	0,151	99,849	9,985

Nota: parámetros de proceso de obtención de D-85%: temperatura = 400 °C, tiempo = 2 h, concentración del H₃PO₄ = 85%

Figura 12

Efecto del tiempo de contacto sobre la capacidad de adsorción de carbón activado (D-85%) con el colorante azul de metileno. Laboratorio de Trasferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.



CA (Carbón activado)

La tabla 9 y la figura 12 muestran que la capacidad de adsorción de azul de metileno del carbón activado D-85% se incrementa en función del tiempo, obteniéndose al minuto 180 una capacidad de adsorción de 9,985 mg/g.

Tabla 10

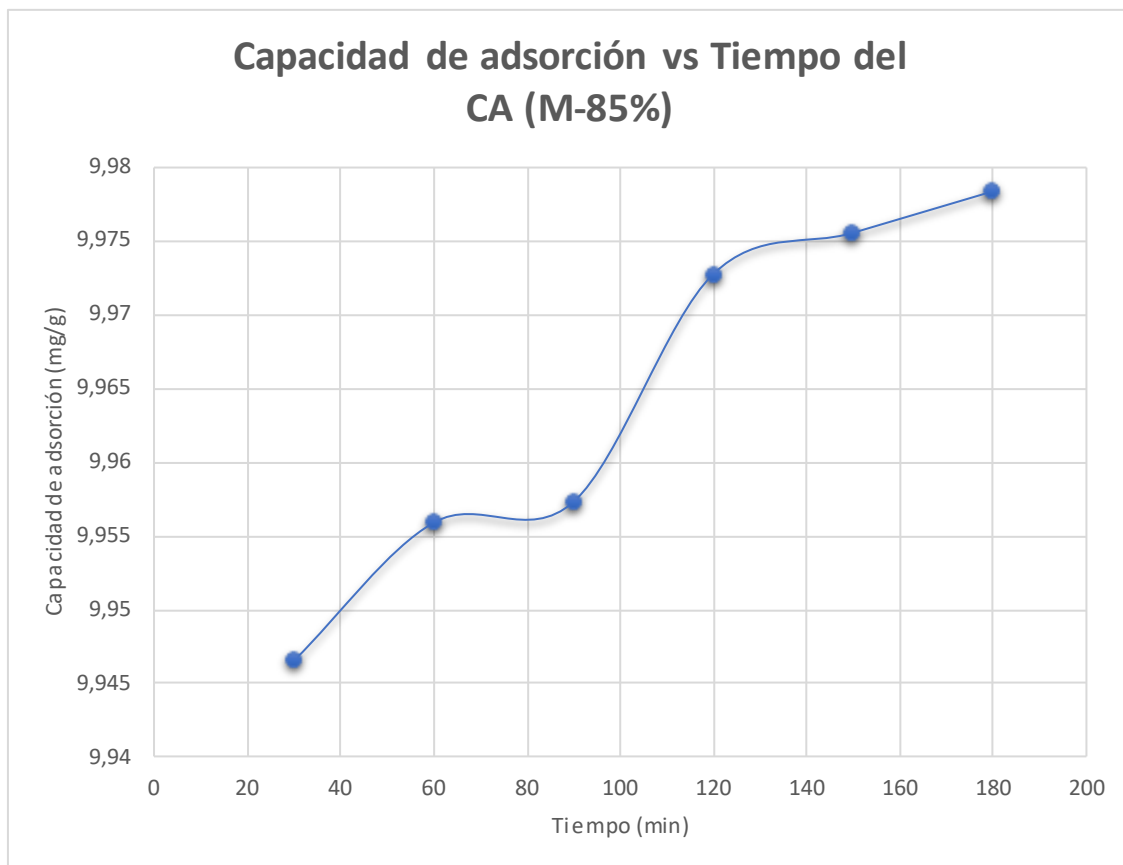
Resultados de la capacidad de adsorción del carbón activado (M-85%), utilizando el colorante azul de metileno. Laboratorio de Transferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.

(M-85%)			
Tiempo (minutos)	Concentración del colorante (ppm)	% remoción	Capacidad de adsorción (mg/g)
0	100	----	----
30	0,535	99,465	9,947
60	0,441	99,559	9,956
90	0,427	99,573	9,957
120	0,273	99,727	9,973
150	0,245	99,755	9,976
180	0,217	99,783	9,978

Nota: parámetros de proceso de obtención de M-85%: temperatura = 500 °C, tiempo = 1,5 h, concentración del H₃PO₄ = 85%

Figura 13

Efecto del tiempo de contacto sobre la capacidad de adsorción de carbón activado (M-85%) con el colorante azul de metileno. Laboratorio de Trasferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.



CA (Carbón activado)

La tabla 10 y la figura 13, muestran que la adsorción del colorante azul de metileno incrementa en función del tiempo al emplear el carbón activado M-85%, observándose que a partir del minuto 150 el incremento de la capacidad de adsorción se ralentiza. Lo cual es un indicativo de que se ha logrado abatir casi la totalidad del colorante por adsorber.

Tabla 11

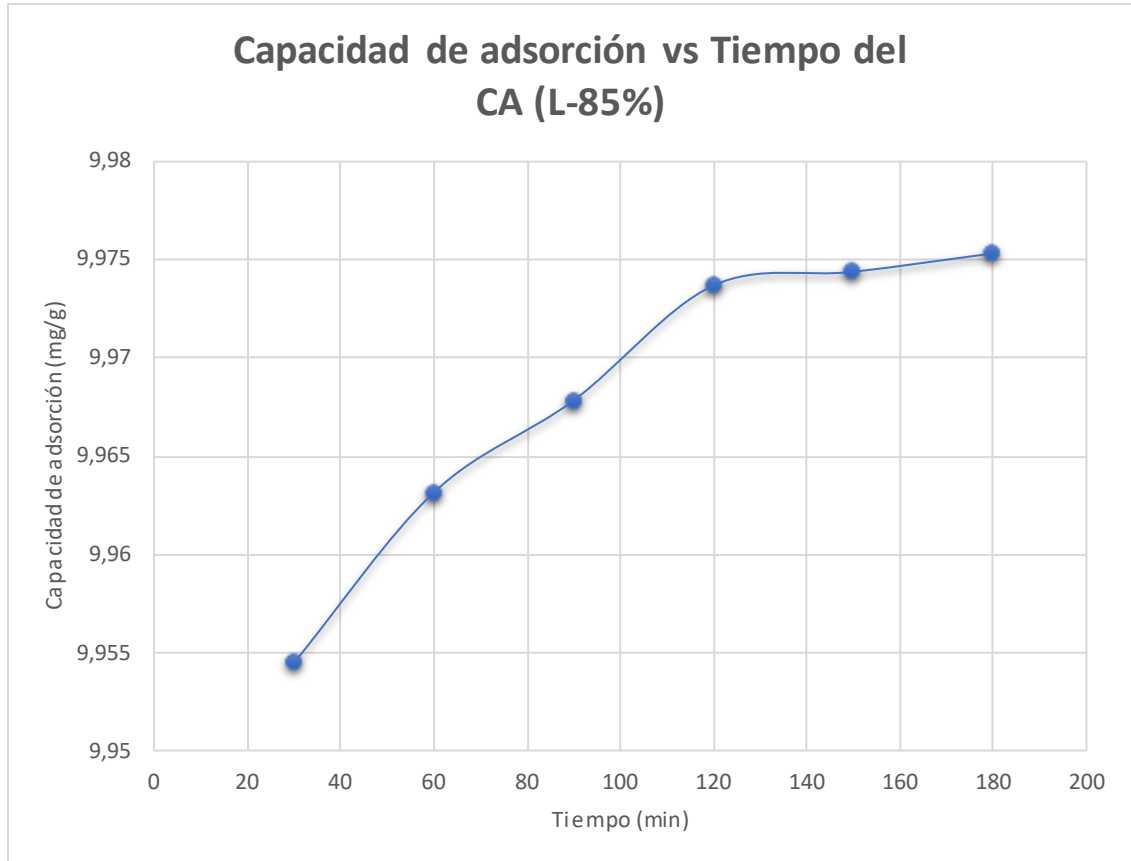
Resultados de la capacidad de adsorción del carbón activado (L-85%), utilizando el colorante azul de metileno. Laboratorio de Tránsito de Masa de la FIQM-UNSC, Ayacucho 2022.

(L-85%)			
Tiempo (minutos)	Concentración del colorante (ppm)	% remoción	Capacidad de adsorción (mg/g)
0	100	----	----
30	0,455	99,545	9,954
60	0,369	99,631	9,963
90	0,322	99,678	9,968
120	0,264	99,736	9,974
150	0,257	99,743	9,974
180	0,247	99,753	9,975

Nota: parámetros de proceso de obtención de L-85%: temperatura = 400 °C, tiempo = 1,5 h, concentración del H₃PO₄ = 85%

Figura 14

Efecto del tiempo de contacto sobre la capacidad de adsorción de carbón activado (L-85%) con el colorante azul de metileno. Laboratorio de Trasferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.



CA (Carbón activado)

La tabla 11 y la figura 14 muestran el proceso de adsorción del colorante azul de metileno sobre el carbón activado L-85%. El proceso de adsorción incrementa en función del tiempo; los primeros minutos de este proceso muestran mayor velocidad y se ralentiza a partir del minuto 120, lo cual es un indicativo de que se ha logrado abatir casi la totalidad del colorante por adsorber.

Tabla 12

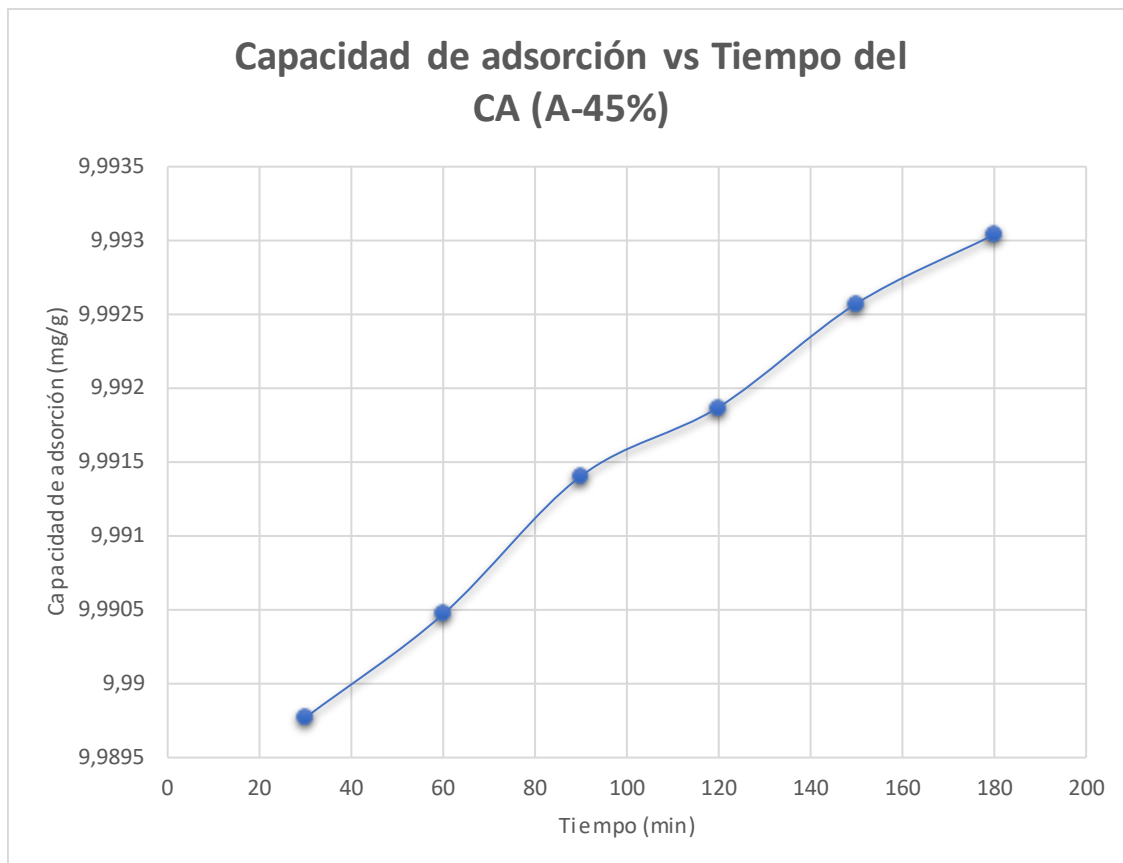
Resultados de la capacidad de adsorción del carbón activado (A-45%), utilizando el colorante azul de metileno. Laboratorio de Trasferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.

(A-45%)			
Tiempo (minutos)	Concentración del colorante (ppm)	% remoción	Capacidad de adsorción (mg/g)
0	100	----	----
30	0,102	99,898	9,990
60	0,095	99,905	9,990
90	0,086	99,914	9,991
120	0,081	99,919	9,992
150	0,074	99,926	9,993
180	0,070	99,930	9,993

Nota: parámetros de proceso de obtención de A-45%: temperatura = 500 °C, tiempo = 2 h, concentración del H₃PO₄ = 45%

Figura 15

Efecto del tiempo de contacto sobre la capacidad de adsorción de carbón activado (A-45%) con el colorante azul de metileno. Laboratorio de Trasferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.



CA (Carbón activado)

La tabla 11 y la figura 24 muestra que la capacidad de adsorción del azul de metileno del carbón activado A-45% se incrementa en función del tiempo, obteniéndose al minuto 180 una capacidad de adsorción de 9,993 mg/g.

Tabla 13

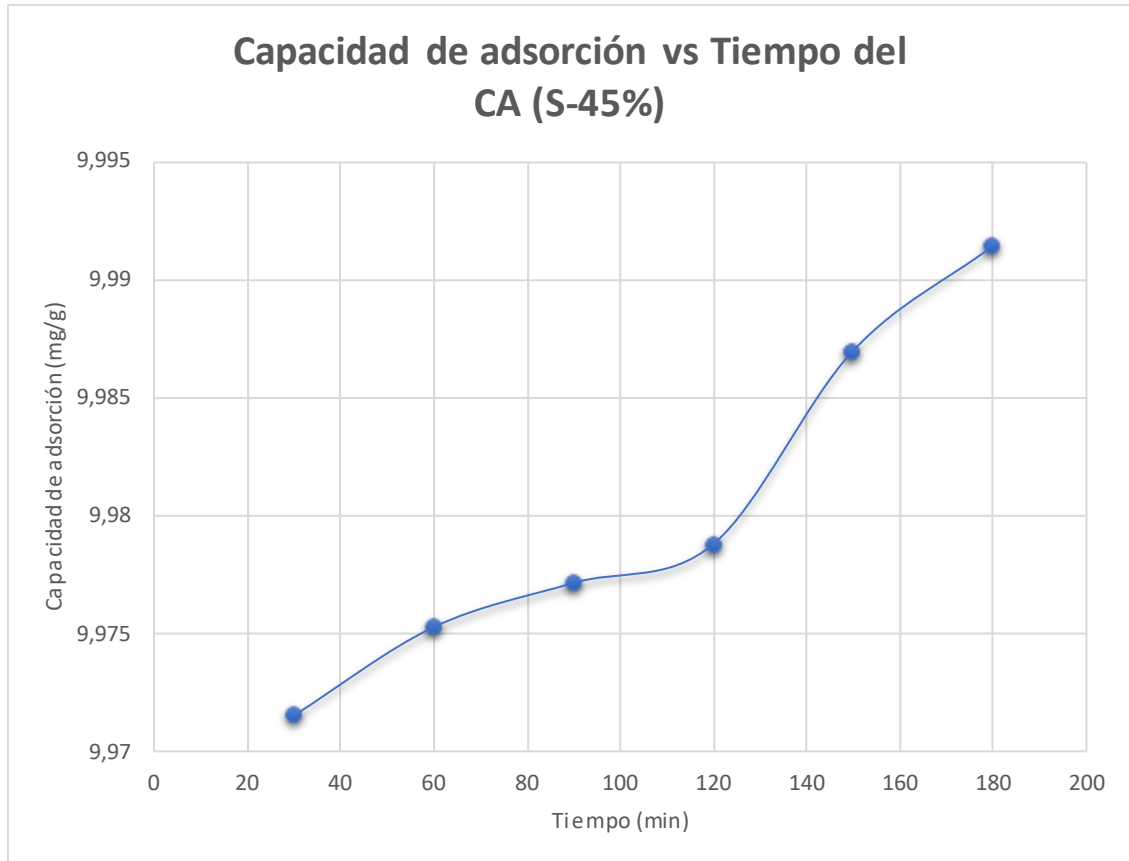
Resultados de la capacidad de adsorción del carbón activado (S-45%), utilizando el colorante azul de metileno. Laboratorio de Trasferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.

(S-45%)			
Tiempo (minutos)	Concentración del Colorante (ppm)	% remoción	Capacidad de adsorción (mg/g)
0	100	----	----
30	0,285	99,715	9,972
60	0,247	99,753	9,975
90	0,229	99,771	9,977
120	0,212	99,788	9,979
150	0,130	99,870	9,987
180	0,086	99,914	9,991

Nota: parámetros de proceso de obtención de S-45%: temperatura = 400 °C, tiempo = 2 h, concentración del H₃PO₄ = 45%

Figura 16

Efecto del tiempo de contacto sobre la capacidad de adsorción de carbón activado (S-45%) con el colorante azul de metileno. Laboratorio de Trasferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.



CA (Carbón activado)

La tabla 13 y la figura 16 muestra que la adsorción del colorante azul de metileno sobre el carbón activado S-45% es dependiente del tiempo, observándose una mayor velocidad de adsorción a partir del minuto 120.

Tabla 14

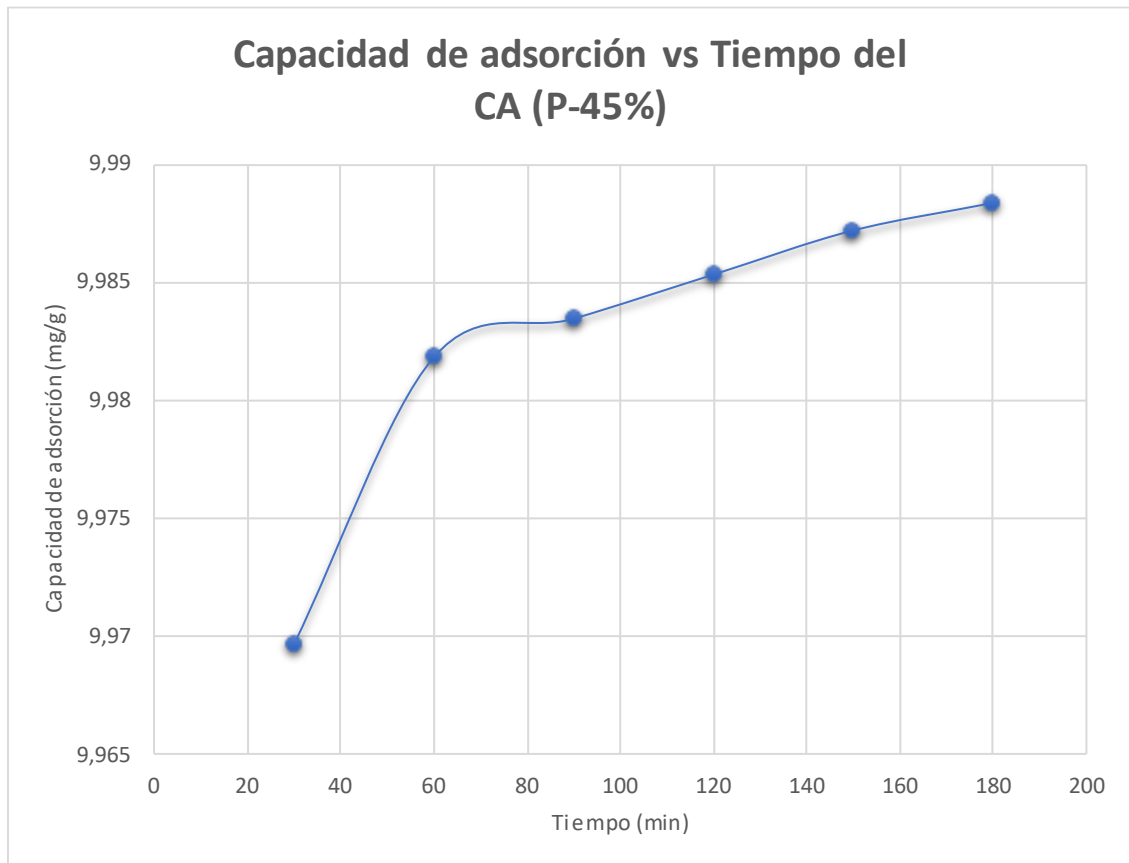
Resultados de la capacidad de adsorción del carbón activado (P-45%), utilizando el colorante azul de metileno. Laboratorio de Tránsito de Masa de la FIQM-UNSCCH Ayacucho 2022.

(P-45%)			
Tiempo (minutos)	Concentración del colorante (ppm)	% remoción	Capacidad de adsorción (mg/g)
0	100	----	----
30	0,303	99,697	9,970
60	0,182	99,818	9,982
90	0,165	99,835	9,983
120	0,147	99,853	9,985
150	0,128	99,872	9,987
180	0,116	99,884	9,988

Nota: parámetros de proceso de P-45%: temperatura = 500 °C, tiempo = 1,5 h, concentración del H₃PO₄ = 45%

Figura 17

Efecto del tiempo de contacto sobre la capacidad de adsorción de carbón activado (P-45%) con el colorante azul de metileno. Laboratorio de Trasferencia de Masa de la FIQM-UNSCH. Avacucho 2022.



CA (Carbón activado)

La tabla 14 y la figura 17, muestra el proceso de adsorción del colorante azul de metileno sobre el carbón activado P-45%. El proceso de adsorción es dependiente del tiempo, observándose una mayor velocidad de adsorción en los primeros minutos del proceso, el cual va ralentiéndose a medida que incrementa el tiempo.

Tabla 15

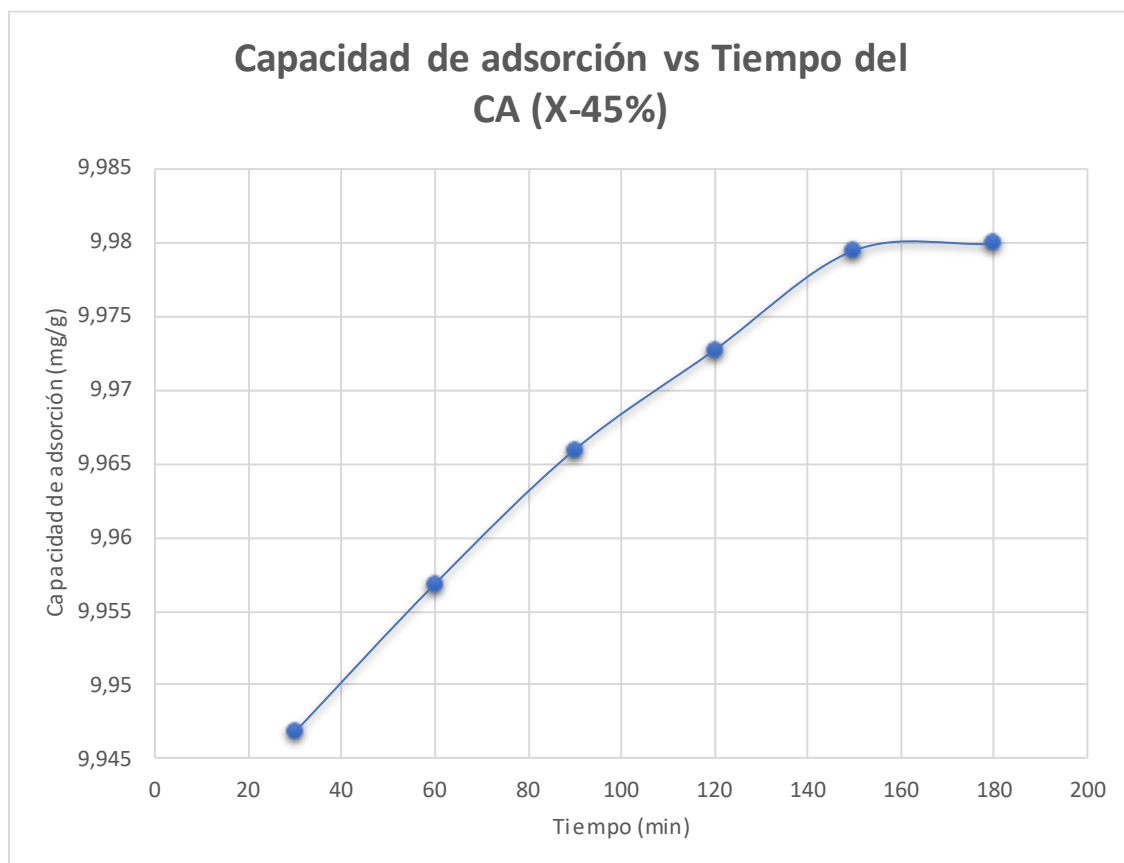
Resultados de la capacidad de adsorción del carbón activado (X-45%), utilizando el colorante azul de metileno. Laboratorio de Trasferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.

(X - 45%)			
Tiempo (minutos)	Concentración del colorante (ppm)	% remoción	Capacidad de adsorción (mg/g)
0	100	----	----
30	0,532	99,468	9,947
60	0,432	99,568	9,957
90	0,341	99,659	9,966
120	0,273	99,727	9,973
150	0,205	99,795	9,979
180	0,200	99,800	9,980

Nota: parámetros de proceso de obtención de X-45%: temperatura = 400 °C, tiempo = 1,5 h, concentración del H₃PO₄ = 45%

Figura 18

Efecto del tiempo de contacto sobre la capacidad de adsorción de carbón Activado (X-45%) con el colorante azul de metileno. Laboratorio de transferencia de masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.



CA (Carbón activado)

La tabla 15 y la figura 18 muestran que la adsorción del colorante azul de metileno sobre el carbón activado X-45% es dependiente del tiempo. La velocidad de adsorción es mayor en los primeros minutos y va ralentizándose a medida que incrementa el tiempo. Observándose que a partir del minuto 150 el incremento de la capacidad de adsorción se ralentiza, lo cual es un indicativo de que se ha logrado abatir casi la totalidad del colorante por adsorber.

4.1.6. Capacidad de adsorción del carbón activado comercial con el colorante azul de metileno

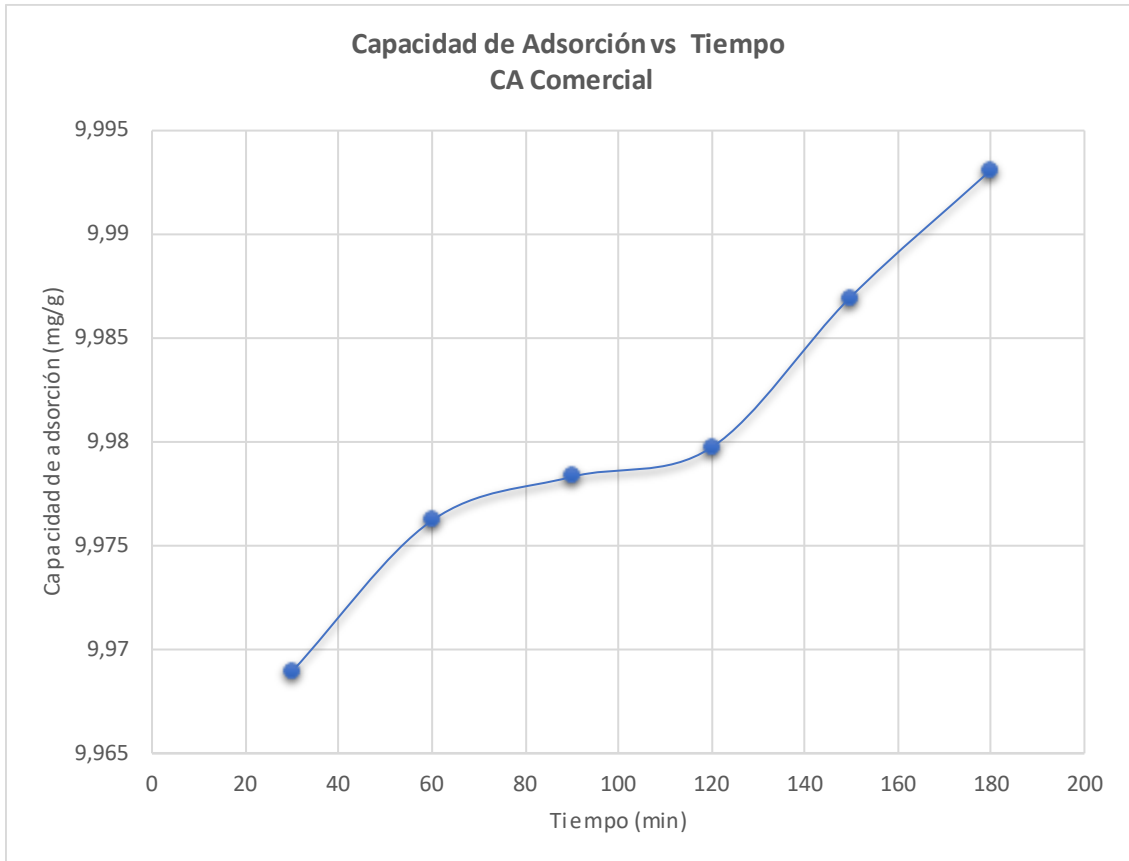
Tabla 16

Resultados de la capacidad de adsorción del carbón activado comercial, utilizando el colorante azul de metileno. Laboratorio de Trasferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.

Carbón activado comercial			
Tiempo (minutos)	Concentración del colorante (ppm)	% de remoción	Capacidad de adsorción (mg/g)
0	100	----	----
30	0,310	99,690	9,969
60	0,238	99,762	9,976
90	0,217	99,783	9,978
120	0,203	99,797	9,980
150	0,130	99,870	9,987
180	0,065	99,935	9,994

Figura 19

Efecto del tiempo de contacto sobre la capacidad de remoción del azul de metileno. Utilizando el carbón activado comercial. Laboratorio de Tránsito de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.



CA (Carbón activado)

La tabla 16 y la figura 19, muestran el proceso de adsorción del colorante azul de metileno sobre el carbón activado comercial. El proceso de adsorción es dependiente del tiempo.

4.1.7. Capacidad de adsorción del carbón activado A-45% con el colorante nigrosina

Se evaluó la capacidad de adsorción del carbón activado A-45% sobre el colorante aniónico nigrosina, debido a que el carbón activado A-45% mostró mejor capacidad de adsorción en los experimentos realizados con el colorante catiónico azul de metileno.

Tabla 17

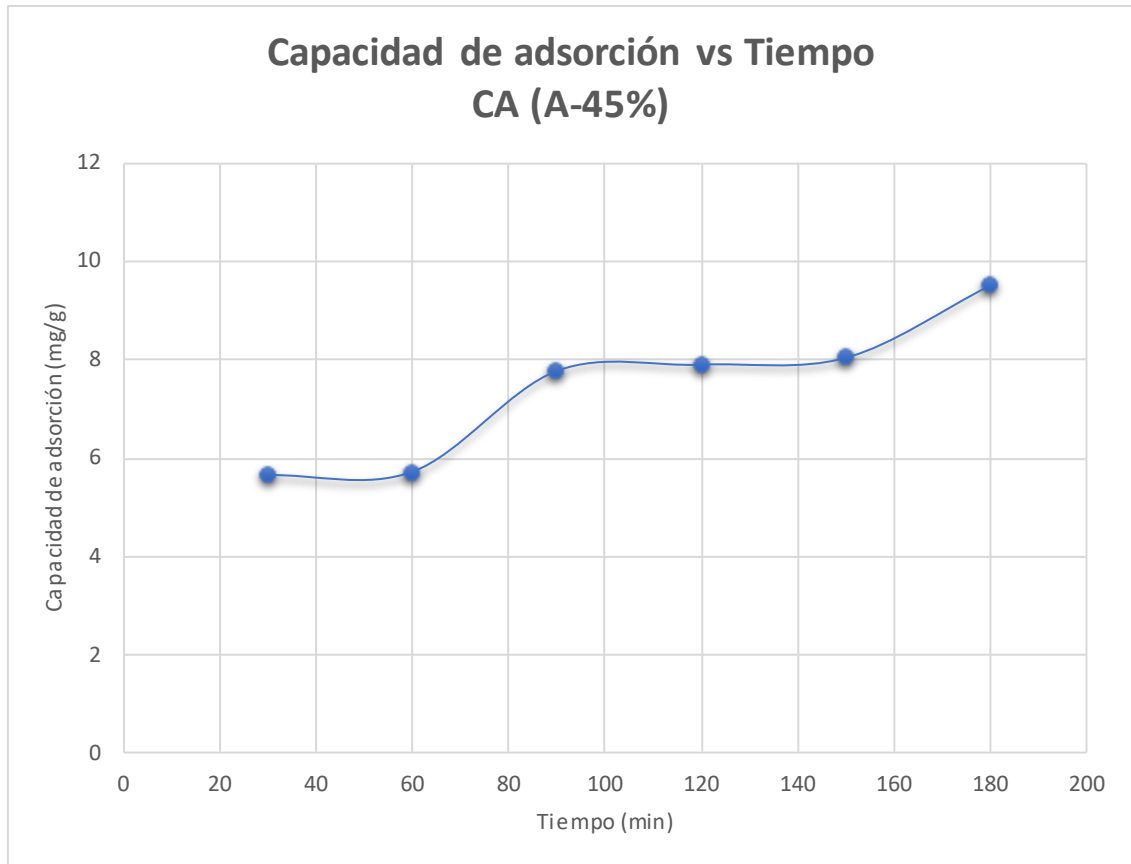
Resultados de la capacidad de adsorción del carbón activado (A-45%), utilizando la colorante nigrosina. Laboratorio de Trasferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.

(A-45%) CARBÓN ACTIVADO DE MAZORCAS DE MAÍZ			
Tiempo (minutos)	Concentración del Colorante (ppm)	% Remoción	Capacidad de adsorción (mg/g)
0	100	----	---
30	43,535	56,465	5,646
60	42,831	57,169	5,717
90	22,221	77,779	7,778
120	20,953	79,047	7,905
150	19,545	80,455	8,046
180	4,756	95,244	9,524

Nota: parámetros de proceso de A-45%: temperatura = 500 °C, tiempo = 2 h, concentración del H₃PO₄ = 45%

Figura 20

Efecto del tiempo de contacto sobre la capacidad de adsorción de carbón activado (A-45%) con el colorante nigrosina. Laboratorio de Tránsito de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.



CA (Carbón activado)

La tabla 17 y la figura 20, muestran que el carbón activado A-45% tiene también la capacidad de adsorber al colorante nigrosina, observándose que la capacidad de adsorción se incrementa a medida que pasa el tiempo y luego se ralentiza; así mismo se observa que la capacidad y velocidad de adsorción de este colorante es inferior al observado con el colorante azul de metileno, puesto que la capacidad de adsorción del colorante nigrosina a los 30 minutos es de 5,646 mg/g y de 9,524 mg/g a los 180 minutos, mientras que la capacidad de adsorción del azul de metileno fue de 9,990 mg/g a los 30 minutos y 9,993 mg/g a los 180 minutos.

4.1.8. Resumen de la capacidad de adsorción y porcentaje de remoción del colorante azul de metileno y nigrosina de los carbones activados obtenidos

Tabla 18

Resumen de la capacidad de adsorción y porcentaje de remoción del colorante azul de metileno y nigrosina a los 180 minutos

Tratamiento del carbón activado	% remoción en el tiempo 180 min	Capacidad de adsorción (mg/g) en el tiempo 180 min
Colorante azul de metileno (catiónico)		
B-85%	99,786	9,979
D-85%	99,849	9,985
M-85%	99,783	9,978
L-85%	99,753	9,975
A-45%	99,930	9,993
S-45%	99,914	9,991
P-45%	99,884	9,988
X-45%	99,800	9,980
CARBÓN ACTIVADO COMERCIAL	99,935	9,994
Colorante nigrosina (aniónico)		
A-45%	95,244	9,524

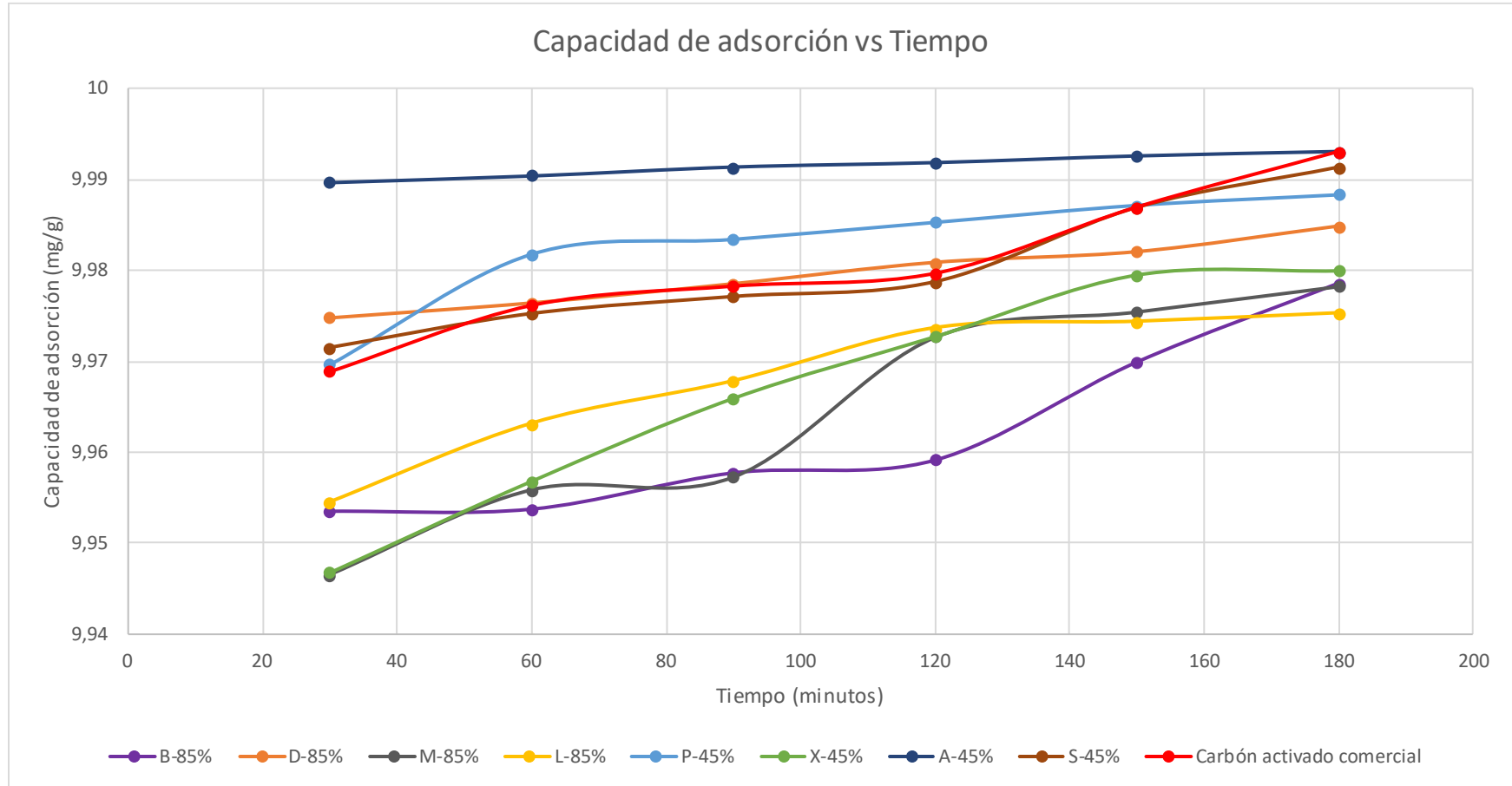
La tabla 18 muestra la capacidad de adsorción del carbón activado comercial a los 180 minutos. En ella se observa que el carbón activado de código A-45%, presentó mayor capacidad de adsorción del colorante catiónico azul de metileno (9,993 mg/g); así mismo se observa que este valor es parecido a la capacidad de adsorción del carbón activado comercial (9,994 mg/g).

Considerando que con el carbón activado A-45% se obtuvo la mayor capacidad de adsorción del colorante catiónico empleado, se buscó también determinar la capacidad de adsorción de este carbón activado sobre un colorante aniónico como la nigrosina, encontrándose que este carbón activado también es capaz de remover colorantes aniónicos, sin embargo, la capacidad de adsorción obtenida con la nigrosina (9,524 mg/g) es menor; en comparación con el resultado obtenido con el azul de metileno.

4.1.9. Resumen de la capacidad de adsorción de azul de metileno de los carbones activados obtenidos a partir de las mazorcas de maíz

Figura 21

Resumen de la capacidad de adsorción vs tiempo



La figura 21 muestra que la capacidad de adsorción de los carbones activados obtenidos incrementan en función del tiempo, inicialmente la velocidad de adsorción incrementa rápidamente y en las etapas finales se ralentiza. En el caso de los carbones activados L-85% y X-45% se observa una curva asintótica, lo cual indica que se ha llegado al equilibrio. La figura nos muestra que, de todos los carbones activados obtenidos, el carbón activado A-45% es el que presenta la mayor capacidad de adsorción (9,993 mg/g). El análisis comparativo del proceso de adsorción del carbón activado A-45% con el carbón comercial, indica que el primero muestra mejor capacidad de adsorción desde el minuto 30 hasta el 150, mientras que al minuto 180 el carbón activado comercial tiene una capacidad de adsorción de 9,994 mg/g, valor ligeramente superior al obtenido con el carbón activado A-45%.

4.1.10. Caracterización textural del carbón activado obtenido a partir de mazorcas de maíz

Tabla 19

Caracterización textural del carbón activado obtenido a partir de mazorcas de maíz. Laboratorio de Investigación de Fisicoquímica (LABINFIS) de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería, Lima 2022.

Muestra	Temperatura °C	Tiempo h	Área superficial BET (m ² /g)	Área de poro (m ² /g)	Volumen en poro (cm ³ /g)	Volumen total en poro (cm ³ /g)	Ancho medio de poro (nm)	Ancho de poro promedio (nm)	Diámetro de poro promedio BJH (nm)	Área del microporo (m ² /g)
A-45%	500	2	306,5	4,368	0,13166	0,14458	1,4464	2,37098	2,7778	186,7841
L-85%	400	1.5	180,7	4,571	0,07535	0,08365	1,4472	2,48123	3,7243	138,6222

La determinación del área superficial se realizó con los carbones activados que obtuvieron la mayor y menor capacidad de remoción del colorante azul de metileno (A-45% y L-85% respectivamente). Esta caracterización fue realizada en el Laboratorio de Investigación de Fisicoquímica de la Universidad Nacional de Ingeniería, empleando el equipo Gemini VII 2390, dichos resultados se muestran en la tabla 19.

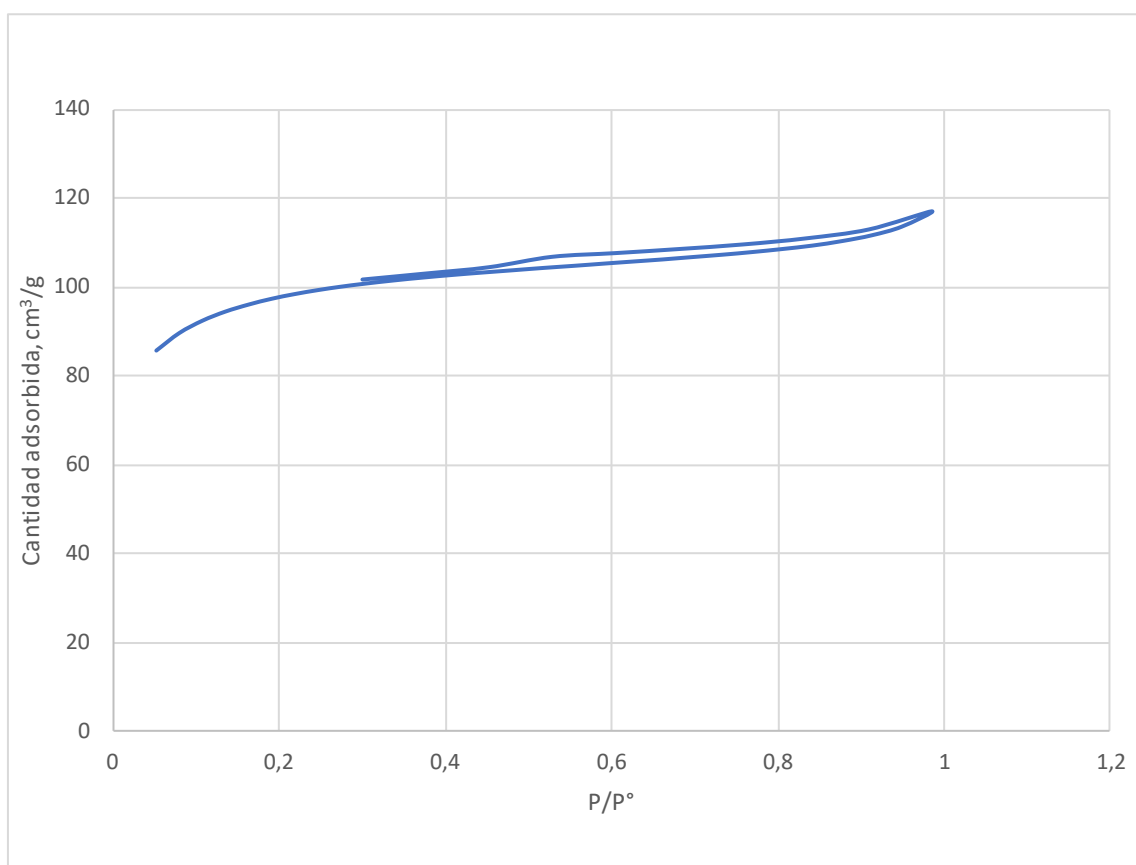
Mediante la isoterma de adsorción - desorción del N₂ a 77 °K, se logró determinar el área superficial del carbón activado para lo cual se utiliza el método Brunauer Emmet- Teller (BET) y para determinar el tamaño de poros se utiliza el método Barrett Joyner y Halenda (BJH).

4.1.11. Isotermas de adsorción-desorción de N₂ para los carbones activados A-45% y L-85%

En las figuras 22 y 23 se muestra las isotermas de adsorción -desorción de N₂ para el carbón activado de mazorcas de maíz, mostrando la relación entre la presión relativa y la cantidad adsorbida del gas en el carbón activado de las muestras de (A-45% y L-85%).

Figura 22

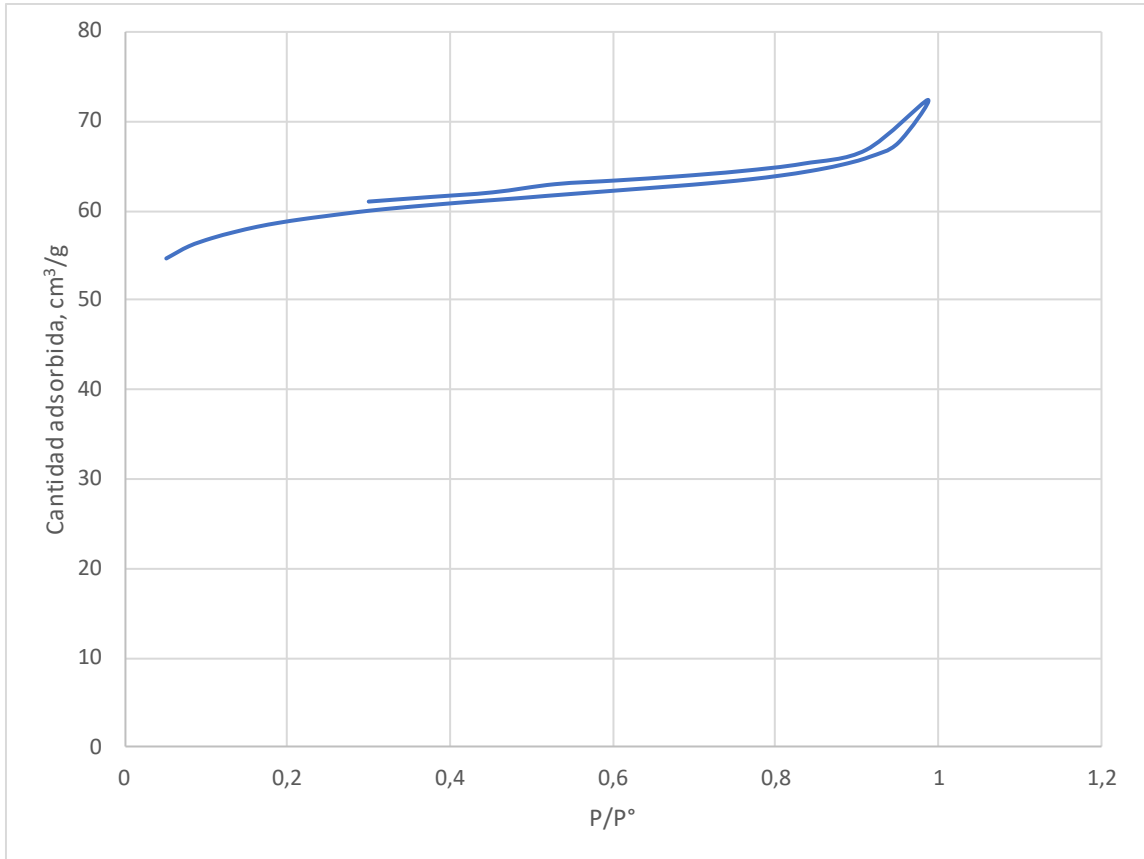
Isotermas de adsorción-desorción de N₂ para el carbón activado de mazorcas de maíz (A-45%). Laboratorio de Investigación de Físicoquímica (LABINFIS) de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería, Lima 2022.



La isoterma de adsorción- desorción de nitrógeno de A-45% muestra un aparente bucle de histéresis a partir de la presión relativa (P/P°) de 0,3, lo cual indica la presencia de micromesoporos.

Figura 23

Isotermas de adsorción-desorción de N₂ para el carbón activado de mazorcas de maíz (L-85%). Laboratorio de Investigación de Fisicoquímica (LABINFIS) de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería, Lima 2022.

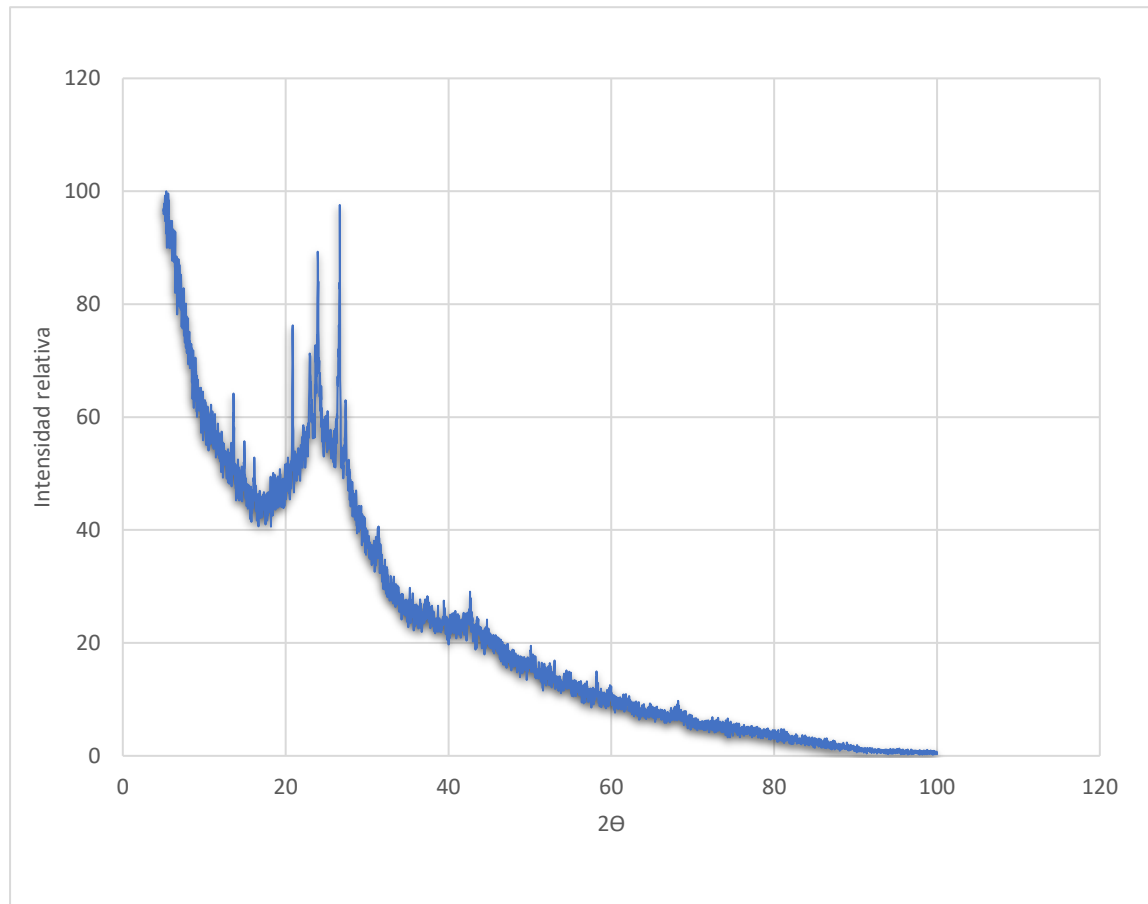


La isoterma de adsorción-desorción de nitrógeno de L-85% muestra menor volumen de adsorción que A-45% y un aparente bucle de histéresis a la presión relativa (P/Po) de 0,3.

4.1.12. Espectro XRD del Carbón Activado A-45%

Figura 24

Espectro XRD del CA (A-45%). Laboratorio de Investigación de Físicoquímica (LABINFIS) de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería, Lima 2022.



CA (Carbón activado)

En la figura 24, se visualiza el resultado de la caracterización estructural del carbón activado A-45% mediante la difracción de rayos X (XRD), este análisis fue realizado para A-45%, puesto que presenta mayor área superficial.

El análisis de difracción de rayos X, muestra picos de difracción definidos y ausencia de picos anchos, lo cual indica la predominancia de estructuras principalmente amorfas.

4.1.13. Análisis de Varianza (ANOVA)

En el presente trabajo de investigación se desarrolló el modelo factorial 2³, diseño que permitió comprender los efectos de tres factores: A, B, C, que son temperatura de carbonización, tiempo de carbonización y concentración del ácido fosfórico respectivamente. Estos factores se emplearon para la producción de los 8 tipos de carbón activado. Este diseño factorial nos permitió identificar cual es el factor que tiene mayor incidencia sobre la capacidad de adsorción y cuál es la combinación de factores con el cual se obtiene el mejor carbón activado en términos de capacidad de adsorción. El análisis estadístico empleado fue el análisis de varianza (ANOVA factorial), el cual permitió comprobar formalmente si los factores empleados tienen o no una relación estadísticamente significativa sobre la capacidad de adsorción del colorante azul de metileno.

En la tabla 20 se tiene los resultados del análisis de varianza (ANOVA factorial), donde se puede concluir primeramente que el coeficiente de determinación de regresión del modelo de (R² de 96,32%) para la capacidad de adsorción del colorante azul de metileno estuvo en buena concordancia con los resultados experimentales, lo que indica que del 96,32% de correlación, el 94,72% es explicado por el modelo predicho. Lo cual indica que el modelo obtenido es confiable.

El modelo predicho tiene una ecuación de regresión pronóstico, que nos sirve para pronosticar como influirán los factores (A, B, C) en el proceso de producción del carbón activado y su capacidad de adsorción. Dicha ecuación es la siguiente:

$$\text{Capacidad de Adsorción} = 9,98372 - 0,000847 A - 0,003242 B + 0,004468 C - 0,002015 A \times B - 0,001665 A \times C - 0,000789 B \times C + 0,000321 A \times B \times C$$

Así mismo a partir de los resultados mostrados en la tabla 20 se verifica que los factores A, B y C, tienen un valor de p menor a 0,05, con lo que se rechaza la hipótesis nula. Esto nos indica que la temperatura de carbonización, tiempo de carbonización y el porcentaje de ácido fosfórico influyen en la capacidad de adsorción del colorante azul de metileno del carbón activado.

Por otro lado interacción de los factores temperatura-tiempo, temperatura-concentración, tiempo-concentración, tienen un valor de p menor a 0,05, lo cual lo cual indica que estas interacciones tienen efecto sobre la capacidad de adsorción del colorante azul de metileno de los carbones activados obtenidos, mientras que la interacción de los 3 factores, esto es, temperatura, tiempo y concentración, tiene un valor de p mayor a 0,05, lo cual indica que no se puede rechazar la hipótesis nula y se concluye que la interacción de estos tres factores no tiene efecto sobre la capacidad

de adsorción del azul de metileno.

En resumen, se tiene que todos los factores y sus interacciones son significativos, exceptuando la interacción de los factores (A, B, C), el cual no es significativo. Además de usar ANOVA se utilizó el diagrama de Pareto, gráfica de efectos principales, gráfica de cubos (medias ajustadas) para estimar los parámetros estadísticos.

Tabla 20
Análisis de Varianza (ANOVA factorial)

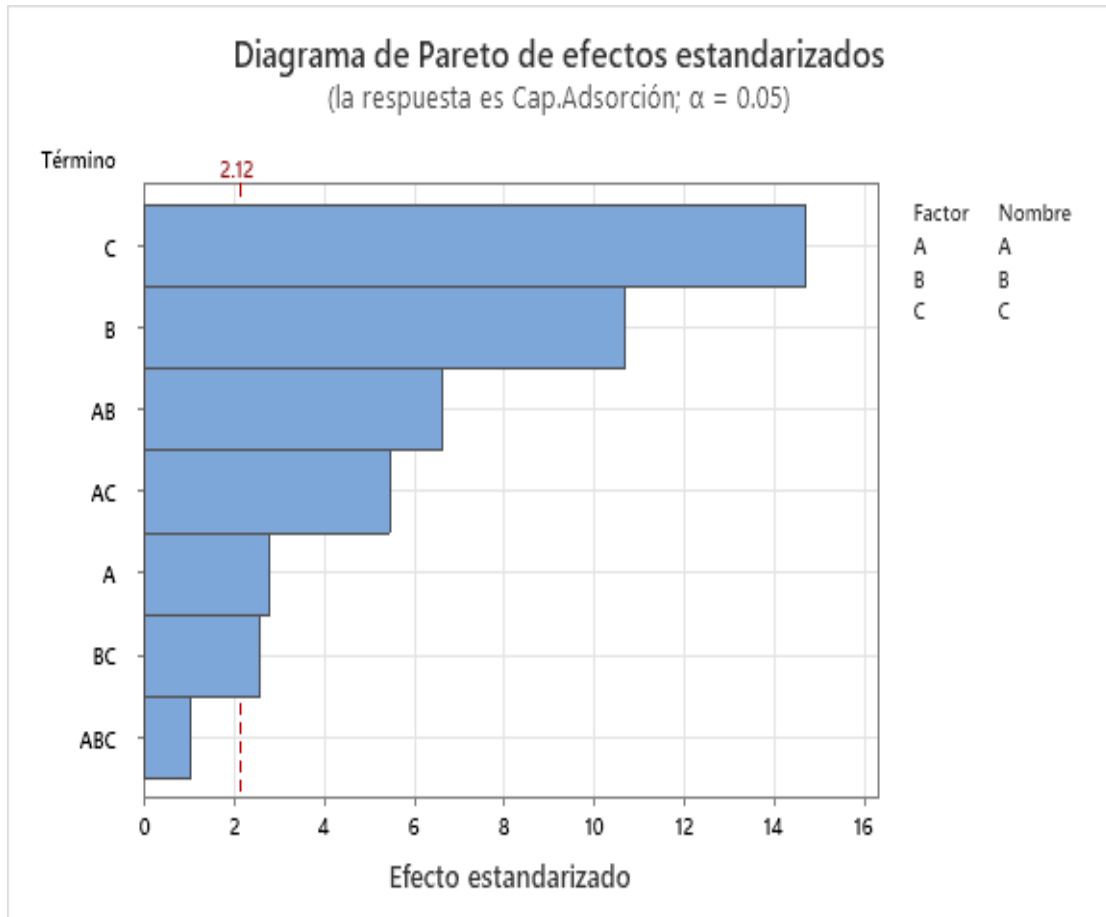
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	7	0,000930	0,000133	59,91	0,000
Lineal	3	0,000749	0,000250	112,53	0,000
A	1	0,000017	0,000017	7,76	0,013
B	1	0,000252	0,000252	113,73	0,000
C	1	0,000479	0,000479	216,08	0,000
Interacciones de 2 términos	3	0,000179	0,000060	26,89	0,000
A*B	1	0,000097	0,000097	43,95	0,000
A*C	1	0,000067	0,000067	29,99	0,000
B*C	1	0,000015	0,000015	6,73	0,020
Interacciones de 3 términos	1	0,000002	0,000002	1,12	0,306
A*B*C	1	0,000002	0,000002	1,12	0,306
Error	16	0,000035	0,000002		
Total	23	0,000966			

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
0,0014892	96,32%	94,72%	91,73%

4.1.14. Diagrama de Pareto de Efectos Estandarizados

Figura 25

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados

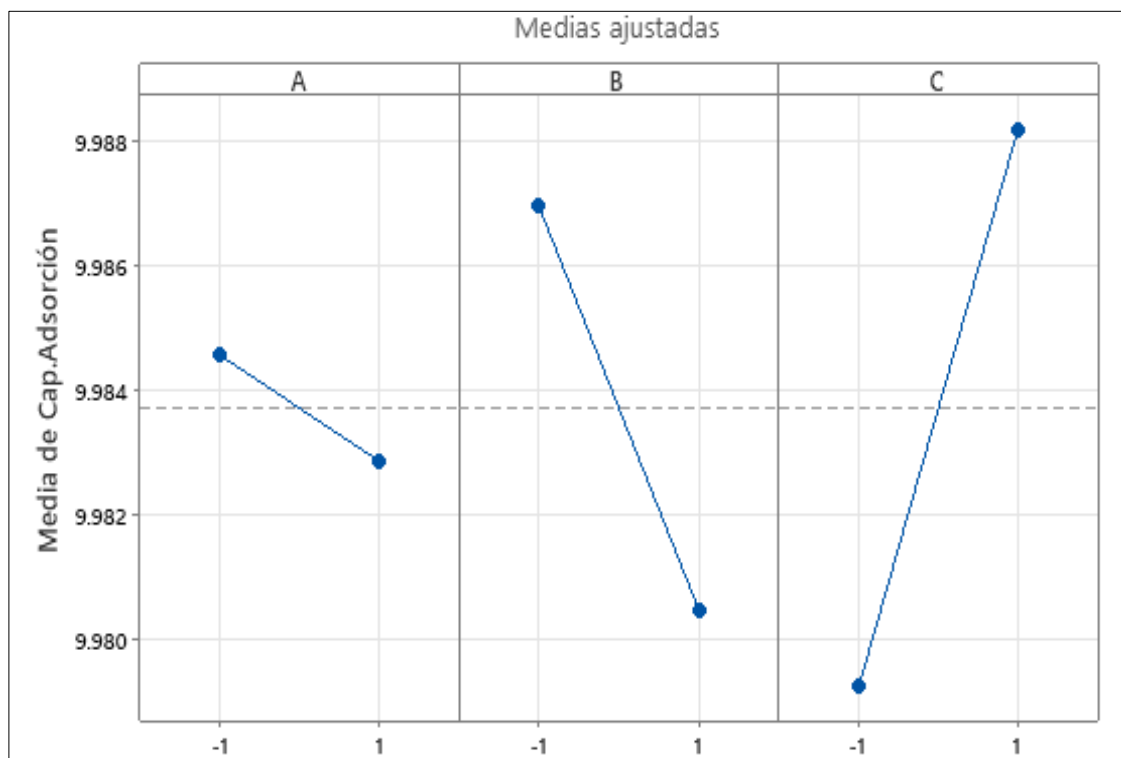


El diagrama de Pareto (figura 25) nos indica que el factor que tiene mayor impacto sobre la capacidad de adsorción del carbón activado es la concentración de ácido fosfórico (factor C), seguido del tiempo de carbonización (factor B) y de la interacción entre la temperatura y tiempo de carbonización (interacción de A y B) y de la interacción de la temperatura de carbonización y concentración de ácido fosfórico (interacción de A y C).

4.1.15. Gráfica de Efectos Principales para la Capacidad de Adsorción

Figura 26

Gráfica de efectos principales para la capacidad de adsorción

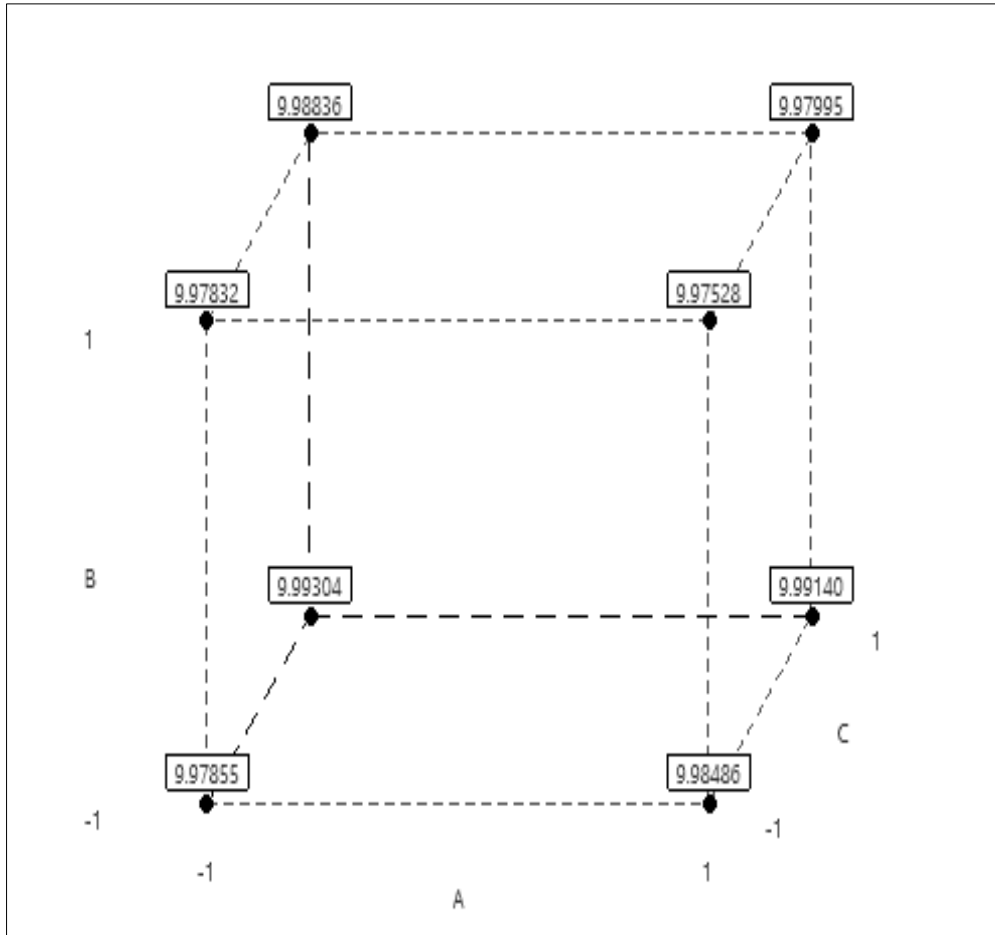


La gráfica de efectos principales para la capacidad de adsorción (figura 26), muestra que la concentración de ácido fosfórico (factor C) tiene un efecto positivo sobre la capacidad de adsorción, mientras que la temperatura y tiempo de carbonización (factores A y B respectivamente) tienen un efecto negativo sobre la capacidad de adsorción del carbón activado.

4.1.16. Gráfica de cubos (medias ajustadas)

Figura 27

Gráfica de cubos (medias ajustadas) de la capacidad de adsorción



La gráfica de cubos de las medias ajustadas de la capacidad de adsorción (figura 27), muestra que la máxima capacidad de adsorción del colorante se obtiene con el máximo valor del factor C (concentración de ácido fosfórico) y con los valores mínimos de los factores A y B (temperatura y tiempo de carbonización).

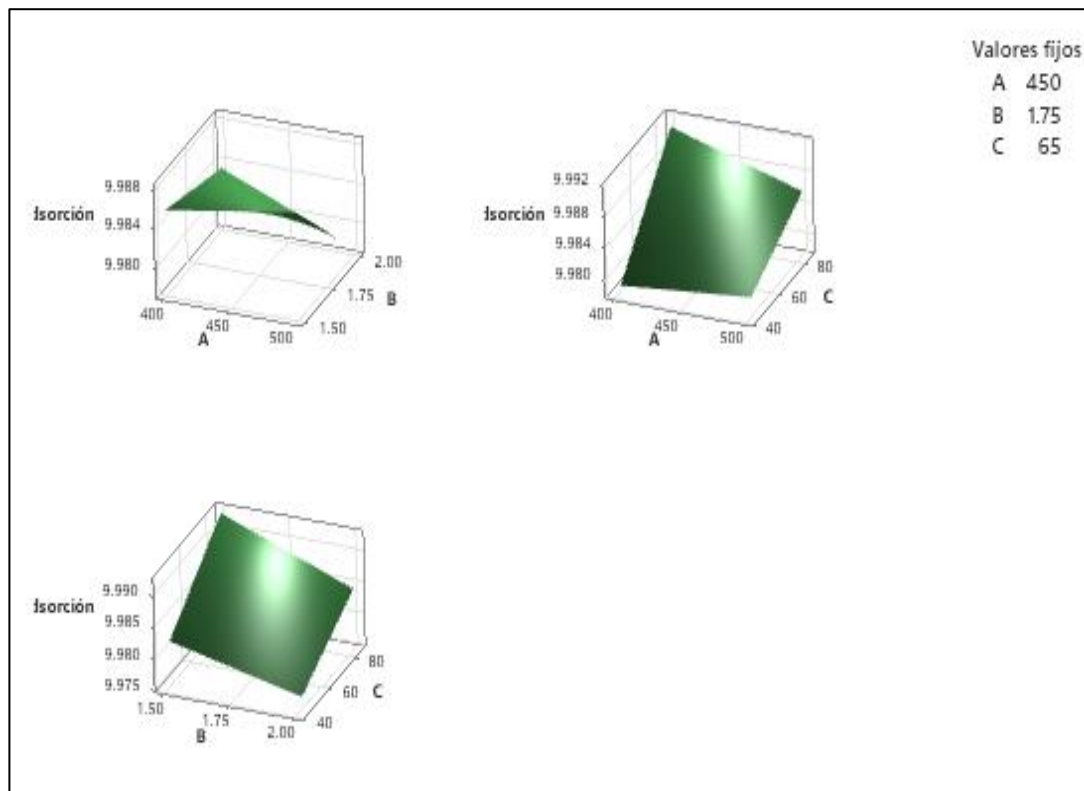
4.1.17. Análisis de Superficie Respuesta

Para el análisis de superficie respuesta se utilizó los datos diseñados con el modelo factorial 2^3 se muestra en la tabla 21, en la figura 28 se muestra el resultado obtenido de la superficie respuesta estimada.

Tabla 21
Datos para el análisis de superficie respuesta

Tratamiento del carbón activado	Pruebas	Factores			Capacidad de adsorción (mg/g)
		Temperatura (°C)	Tiempo (h)	Concentración (%)	
B-85%	1	500	2	85	9,981
D-85%	2	400	2	85	9,987
M-85%	3	500	1,5	85	9,976
L-85%	4	400	1,5	85	9,976
A-45%	5	500	2	45	9,994
S-45%	6	400	2	45	9,992
P-45%	7	500	1,5	45	9,990
X-45%	8	400	1,5	45	9,980

Figura 28
Superficie respuesta estimada



En la figura 28 se muestra los resultados del análisis de superficie respuesta, la cual nos muestra la optimización del proceso de obtención del carbón activado en función de la capacidad de adsorción.

Los resultados optimizados, muestran que el carbón activado con mejor capacidad de adsorción del colorante azul de metileno, se obtendrá trabajando con los siguientes valores:

Temperatura: 450 °C

Tiempo: 1,75 horas

Concentración de ácido fosfórico: 65%

4.2. DISCUSIONES

En este trabajo de investigación, se empleó un diseño factorial 2^3 , para obtener carbón activado a partir de mazorcas de maíz amiláceo y determinar cuál es la combinación de variables que nos brinda el mejor carbón activado, en términos de la capacidad de adsorción. El diseño factorial empleó 3 variables y dos niveles: temperatura (400 °C y 500 °C), tiempo de carbonización (1,5 h y 2 h) y el porcentaje de agente activante (H_3PO_4 al 45 y 85%). En función a ello se obtuvieron 8 tipos de carbón activado a partir de mazorcas de maíz amiláceo (tabla 4). Así mismo se realizó el análisis de superficie respuesta, mostrando la optimización el proceso de obtención del carbón activado en función del tiempo (figura 28).

La tabla 5 resume la caracterización física de la materia prima empleada (mazorcas de maíz molido), presentando un porcentaje de humedad y el porcentaje de ceniza totales de 5,693% y 0,019%, respectivamente.

El bajo contenido de porcentaje de humedad de las mazorcas de maíz comprueba que es recomendable para reducir los tiempos de obtención del carbón activado, lo cual condice con lo señalado con la literatura (Canales Flores et al., 2017). Otro parámetro importante para la producción de carbón activado es el contenido de cenizas totales, el bajo valor obtenido es un indicador positivo definiendo la calidad del carbón activado que se obtendrá. Los resultados obtenidos se asemejan a los valores obtenidos por Canales Flores et al. (2017), donde obtuvo un porcentaje de humedad de 7,57% y contenido de cenizas de 1,53% en las mazorcas de maíz.

La tabla 6 muestra el rendimiento de los ocho carbones activados obtenidos, del cual el carbón activado A-45%, obtiene 57,569% de rendimiento, valor mayor en comparación con los demás carbones activados. Se han obtenido resultados similares en el trabajo de Bahago et al. (2021), quien obtuvo un 55,70% de rendimiento de carbón activado de mazorcas de maíz; así mismo Alkali (2016), obtuvo un rendimiento de carbón activado de mazorcas de maíz de 18%, valor muy inferior al obtenido en

este trabajo. El porcentaje de rendimiento depende de la temperatura de activación, obteniéndose mayores rendimientos a temperaturas menores, tal como lo indican los trabajos de Kaźmierczak et al. (2013) y Zulkania et al. (2018).

Los ocho tipos de carbones activados obtenidos a partir de las mazorcas de maíz, fueron caracterizados en función a la determinación del porcentaje de humedad, porcentaje de cenizas totales, densidad aparente, tamaño de partícula, y capacidad de adsorción de colorantes. Así mismo se determinó el área superficial y se realizó el análisis de difracción de rayos X, con el carbón activado que mostró mejor capacidad de adsorción.

La Tabla 7 muestra los valores del porcentaje de humedad, porcentaje de cenizas totales y densidad aparente de los ocho tipos de carbón activado obtenidos. Los datos plasmados en esta tabla para todos los carbones obtenidos, se asemejan a los obtenidos por Jawad et al. (2020), quien a su vez enfatiza que la baja densidad aparente de los carbones activados, indican teóricamente una alta porosidad.

Los resultados relativamente bajos del porcentaje de ceniza obtenidos, resultan ser favorables, puesto que indican un bajo contenido de residuos minerales o inorgánicos que quedan luego del proceso de activación, dando lugar a un carbón activado con características óptimas y buena capacidad de remoción de contaminantes, en especial de colorantes. Además, el bajo contenido de humedad es favorable para un buen carbón activado, porque aumentaría su capacidad de adsorción. Zulkania et al. (2018). Así mismo comparando con las especificaciones técnicas del carbón activado comercial utilizado, los resultados de porcentaje de cenizas totales, porcentaje de humedad y la densidad aparente del A-45% (12,762%; 12,370%; 0,230 g/mL, respectivamente), son relativamente semejantes (8%, 12% y 0,25 g/mL, respectivamente), lo cual se observa en el anexo 9 y 10.

En la figura 10 tenemos los resultados de la determinación del tamaño de partícula del carbón activado de mazorcas de maíz (A-45%). Para su determinación se utilizó el método según ASTM D 2862 – 97, s. f., los resultados de esta prueba, nos muestran que tenemos un carbón activado granular por presentar un tamaño de partícula de 1,4 mm, este valor está asociado a un carbón granular, eficiente para la remoción de contaminantes en medios líquidos.

La tabla 18 se muestra la capacidad de adsorción y el porcentaje de remoción del colorante azul de metileno de los 8 tipos de carbón activado obtenidos al tiempo de

180 minutos. En ella se observa que el carbón activado A-45% es el que presenta mayor capacidad de adsorción y porcentaje de remoción del colorante azul de metileno (9,930 mg/g y 99,993%, respectivamente). Mientras que el carbón activado de código L-85%, es el que presenta menor capacidad de adsorción y porcentaje de remoción (9,975 mg/g y 99,753, respectivamente). Esto podría atribuirse a que el carbón A-45% presenta mayor área superficial (306,4925 m²/g), por tanto, al tener más sitios activos, adsorbe mayor cantidad del colorante azul de metileno, mientras que el carbón L-85% presenta un área superficial menor (180,7399 m²/g).

En las investigaciones realizadas por Ali et al. (2017) y Ezeugo (2018), se obtuvieron carbones activados a partir de mazorcas de maíz y evaluaron la capacidad de adsorción del colorante azul de metileno, los resultados obtenidos por estos investigadores (9,98 mg/g y 9,91 mg/g) son similares a los obtenidos en este trabajo, mientras que la capacidad adsorbente del colorante azul de metileno de los carbones activados obtenidos por Alkali (2016), presentan menor capacidad de adsorción (1,90 mg/g) que el presente trabajo.

La adsorción del colorante azul de metileno de los carbones activados obtenidos (figuras 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 y 18) nos muestran que el mecanismo del proceso de adsorción es dependiente del tiempo en todos los casos. La adsorción es rápida al inicio del proceso y en las etapas finales va ralentizándose, lo cual indica que la primera fase está manejada por el proceso de difusión del colorante hacia los poros del carbón activado, luego la adsorción disminuye, debido a la saturación de los poros con el adsorbato, hasta llegar a un estado de equilibrio. En los carbones activados X-45% y L-85% se ha llegado al punto de equilibrio, lo cual se demuestra con la obtención de gráficas asintóticas.

Así mismo la tabla 18, muestra que la capacidad de adsorción y porcentaje de remoción del carbón activados A-45% sobre el colorante aniónico nigrosina a los 180 minutos (9,524 mg/g y 95,244%, respectivamente) es inferior en comparación a la capacidad y porcentaje de remoción del colorante catiónico azul de metileno (9,993 mg/g y 99,930 %, respectivamente). Donde la capacidad de adsorción nos indica la cantidad de colorante adsorbido por el carbón activado, mientras que el porcentaje de remoción nos muestra la eficiencia de adsorción del carbón activado.

La diferencia en la capacidad de adsorción del carbón activado A-45% sobre ambos tipos de colorantes, puede deberse al valor del pH de la solución de ensayo. El pH de la solución es un factor importante en la adsorción, generalmente en una solución de

pH bajo, la carga positiva en la interfaz de la solución aumentará y la superficie del carbón activado se cargará positivamente, por ello se obtendrá mayor eficiencia en la remoción de colorantes aniónicos. En el caso de tener soluciones de pH alto, la carga positiva en el interfaz de la solución disminuye y la superficie del carbón se carga negativamente, lo cual permite un aumento en la adsorción de colorantes catiónicos y una disminución de colorantes aniónicos (Chikri et al., 2020).

En la tabla 19, los resultados de este análisis nos muestran que el carbón activado (A-45%) es un carbón micromesoporoso con prevalencia de microporosidad con poros cilíndricos y presenta poros pequeños en poros grandes, presentando dos tamaños de poro (1,4464 nm y 2,7778 nm), que son características de un carbón micromesoporoso como nos muestra Zhang et al. (2020) y Иванова (RU) et al. (2010). El carbón (A-45%), también presenta un área superficial de 306,4925 m²/g, obteniendo resultados similares a la investigación de Tcheka et al. (2021); así mismo el autor de dicha investigación concluyó que con estos valores del área superficial, logró obtener carbones activados eficientes, que lograron remover con alta eficiencia el colorante azul de metileno. Así mismo los resultados del carbón activado (L-85%), nos muestran que es un carbón activado micromesoporoso con prevalencia de microporosidad con poros cilíndricos, presentando un área superficial de 180,7399 m²/g, área menor que el carbón activado A-45%, corroborando que el mejor carbón activado obtenido es el A-45%. También mencionar que el carbón activado A-45% presenta un área superficial semejante al carbón activado comercial G60 con un área de 410 m²/g, como se muestra en la tabla 2.

Las isothermas de adsorción-desorción de nitrógeno de los carbones A-45% y L-85% se muestran en las figuras 22 y 23. Estas isothermas nos muestran que el proceso de adsorción-desorción de los carbones activados obtenidos presentan condensación capilar, debido a su estructura micromesoporosa (Medhat et al., 2021).

En las figuras 22 y 23, estos perfiles de isothermas de adsorción-desorción de nitrógeno de los carbones (A-45% y L-85%), nos muestran un análisis estructural de los poros del carbón activado de mazorcas de maíz, donde se presentan una combinación de isothermas tipo I y tipo IV según la IUPAC, indicándonos la presencia de estructuras micromesoporosas en forma de hendiduras, (Medhat et al., 2021; Mojoudi et al., 2019). Así mismo ambas figuras muestran que las isothermas de adsorción-desorción de nitrógeno de A-45% y L-85% presentan bucles de histéresis. De acuerdo a Liou & Wu

(2009), la presencia de estos bucles de histéresis podría ser causado por la condensación capilar en las estructuras micromesoporosas del carbón activado.

En la figura 24 se muestra el espectro de la difracción de rayos X (XRD) del carbón (A-45%). Los patrones XDR exhiben picos definidos y la ausencia de un pico amplio revela la estructura predominante amorfa del carbón activado A-45%; así mismo presenta la aparición de picos amplios alrededor de $2\theta = 21^\circ, 24^\circ, 28^\circ$ mostrando formación de estructura poco cristalina carbonácea (Farnane et al., 2018).

Este tipo de patrón es característico de los estados de carbono descritos como grupos formados por pequeños fragmentos de capas de grafeno más una cantidad de carbono desorganizado (Farnane et al., 2018).

De manera complementaria al trabajo aquí realizado, se desarrolló el estudio de adsorción del colorante azul de metileno en columna de lecho fijo, utilizando el carbón activado (A-45%). Estos resultados se muestran en el anexo 5. Adicionalmente se obtuvo carbón activado a partir de semillas de molle y se estudió la capacidad de adsorción con el colorante azul de metileno, estos resultados se muestran en el anexo 6.

CONCLUSIONES

1. Se ha obtenido carbón activado a partir de los residuos lignocelulósicos de mazorcas del maíz amiláceo (*Zea mays L. ssp amiláceo*) mediante activación química con ácido fosfórico, con capacidad de adsorber colorantes catiónicos (azul de metileno) y aniónicos (nigrosina).
2. Se han obtenido ocho carbones activados a partir de mazorcas de maíz amiláceo, de los cuales, el máximo rendimiento se obtuvo con el carbón activado de código A-45% (57,569%), mientras que el menor rendimiento se obtuvo con el carbón activado de código X-45% (40,897%).
3. Los carbones activados A-45% y L-85%, fueron caracterizados por el método Brunauer Emmet-Teller (BET) para determinar su área superficial. Los resultados indican que el carbón activado A-45% (carbón con mayor capacidad de adsorción) tiene un área superficial de 306,4925 m²/g, y el carbón activado L-85% (carbón activado con menor capacidad de adsorción de colorante) tiene un área superficial de 180,7399 m²/g. El diámetro promedio de poro y el volumen total de poro para A-45% fue de 2,778 nm y de 0,144 cm³/g, respectivamente. Mientras que el diámetro promedio de poro y el volumen total de poro para L-85% fue de 3,724 nm y 0,084 cm³/g respectivamente, estos resultados, junto con las isothermas de adsorción-desorción de nitrógeno, indican que los carbones activados obtenidos presentan estructura micromesoporosa; así mismo, las áreas superficiales obtenidas son similares a trabajos previos de Medhat et al. (2021).
4. Se ha caracterizado estructuralmente el carbón activado A-45%, empleando difracción de rayos X (XDR), los resultados obtenidos indican que presenta estructura amorfa poco cristalina, característico de los carbones activados obtenidos en trabajos previos de Farnane et al., (2018).
5. La mejor capacidad de adsorción y porcentaje de remoción del colorante catiónico azul de metileno fue obtenido con el carbón activado A-45% (9,993 mg/g y 99,930%, respectivamente). Este carbón activado fue también capaz de remover el 95,244% del colorante aniónico nigrosina. La capacidad de adsorción de este carbón activado sobre el colorante azul de metileno resultó ser similar al obtenido con un carbón activado comercial (9,994 mg/g), mientras que la menor capacidad de adsorción y porcentaje de remoción del colorante azul de metileno, se obtuvo con el carbón activado de código L-85% (9,975 mg/g y 99,753%, respectivamente). Estos

resultados nos brindan la posibilidad de crear carbones activados con materiales lignocelulósicos accesibles y de bajo costo para obtener carbones activados que permitan remover colorantes sintéticos, que contribuyan en la recuperación del medio ambiente.

RECOMENDACIONES

1. Para trabajos de investigación posteriores se recomienda, controlar el pH de la solución de los colorantes puesto que es un factor muy importante que influye en el comportamiento de adsorción del carbón activado. Según investigaciones Chikri et al. (2020), la carga superficial del carbón activado se ve influenciado por el pH, estos estudios demuestran que soluciones de pH bajo (ácidos), la carga positiva en el interfaz de la solución aumentara y la superficie del adsorbente aparecerá cargado positivamente, dando como resultado la eliminación eficiente para tintes aniónicos, directos, reactivos; y por el contrario a pH altos (básicos), la carga positiva en la interfaz de la solución disminuirá y la superficie del adsorbente se carga negativamente, dando como resultado la adsorción eficiente de los colorantes catiónicos, básicos.
2. Del mismo modo se recomienda controlar la temperatura en el proceso de adsorción del colorante, porque es otro factor importante puesto que cambia la capacidad de adsorción dependiendo de la temperatura. En la investigación de Chikri et al. (2020), demuestra si el proceso es endotérmico, la cantidad de adsorción aumenta con el aumento de temperatura mientras la cantidad de adsorción disminuye por el aumento de temperatura cuando es exotérmico.

BIBLIOGRAFÍA

Achaw, O.-W. (2012). A Study of the Porosity of Activated Carbons Using the Scanning Electron Microscope. En *Scanning Electron Microscopy*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/36337>

Activated carbon as raw ingredient in chemicals, pharma. (s. f.), de <http://www.pharmabiz.com/PrintArticle.aspx?aid=94444&sid=21>

Affat, S. S. (2018). *Classifications, Advantages, Disadvantages, Toxicity Effects of Natural and Synthetic Dyes: A Review.* 8, 6.

Ahmad, A., & Azam, T. (2019). Water Purification Technologies. En *Bottled and Packaged Water* (pp. 83-120). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815272-0.00004-0>

Ali, A. F., Kovo, A. S., & Adetunji, S. A. (2017). Methylene Blue and Brilliant Green Dyes Removal from Aqueous Solution Using Agricultural Wastes Activated Carbon. *Journal of Encapsulation and Adsorption Sciences*, 07(02), 95-107. <https://doi.org/10.4236/jeas.2017.72007>

Alkali, A. S. (2016). *Optimization of Activated Carbon Preparation from Corncob Wastewater Treatment.* Ahmadu Bello University.

Al-Tohamy, R., Ali, S. S., Li, F., Okasha, K. M., Mahmoud, Y. A.-G., Elsamahy, T., Jiao, H., Fu, Y., & Sun, J. (2022). A Critical Review on the Treatment of Dye-containing Wastewater: Ecotoxicological and Health Concerns of Textile Dyes and Possible Remediation Approaches for Environmental Safety. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 231, 113160. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.113160>

ASTM D 2862 – 97. (s. f.). *Standard Test Method for Particle Size Distribution of Granular Activated Carbon.pdf.* American Society For Testing and Materials.

ASTM D2866 – 11. (s. f.). *Test Method for Total Ash Content of Activated Carbon.* ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D2866-11>

Bagheri, N., & Abedi, J. (2009). Preparation of High Surface Area Activated Carbon from Corn by Chemical Activation Using Potassium Hydroxide. *Chemical Engineering Research and Design*, 87(8), 1059-1064. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2009.02.001>

Bahago, N. A., Wyasu, G., & Ugboaja, V. C. (2021). *Optimization of Activated Carbon Preparation from Corncob Wastewater Treatment*. 11.

Bandosz, T. J. (2006). *Activated Carbon Surfaces in Environmental Remediation.pdf* (Sexta edición, Vol. 7). ELSEVIER.

Bansal, R. C., & Goyal, M. (2005). *Activated Carbon Adsorption*. Taylor & Francis.

Benkhaya, S., Harfi, S. E., & Harfi, A. E. (2017). *Classifications, Properties and Applications of Textile Dyes: A review*. 10.

Benkhaya, S., M'rabet, S., & El Harfi, A. (2020). A Review on Classifications, Recent Synthesis and Applications of Textile Dyes. *Inorganic Chemistry Communications*, 115, 107891. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2020.107891>

Burchell, T. D. (1999). *Carbon Materials for Advanced Technologiess* (Firts edition). Pergamon.

Canales Flores, R. A., Prieto García, F., Otazo Sánchez, E. M., Bolarín Miró, A. M., & Acevedo Sandoval, O. A. (2017). *Physico-Chemical Characterization of Agricultural Residues as Precursors for Activated Carbon Preparation* [Preprint]. Materials Science. <https://doi.org/10.20944/preprints201712.0086.v1>

Chavan, R. B. (2013). Health and Environmental Hazards of Synthetic Dyes. *Saket Project Limited, Ahmedabad*, 14.

Chikri, R., Elhadiri, N., Benchanaa, M., & El maguana, Y. (2020). Efficiency of Sawdust as Low-Cost Adsorbent for Dyes Removal. *Journal of Chemistry*, 2020, 1-17. <https://doi.org/10.1155/2020/8813420>

Choi, J. Y., Nam, J., Yun, B. Y., Kim, Y. U., & Kim, S. (2022). Utilization of Corn Cob, an Essential Agricultural Residue Difficult to Disposal: Composite Board Manufactured

Improved Thermal Performance Using Microencapsulated PCM. *Industrial Crops and Products*, 183, 114931. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114931>

Corapcioglu, M. O., & Huang, C. P. (1987). The Surface Acidity and Characterization of Some Commercial Activated Carbons. *Carbon*, 25(4), 569-578. [https://doi.org/10.1016/0008-6223\(87\)90200-4](https://doi.org/10.1016/0008-6223(87)90200-4)

Corporation, C. C. (s. f.). *Pharmaceuticals and Fine Chemicals*. Calgon Carbon Corporation. <https://www.calgoncarbon.com/pharmaceutical-companies/>

Dabrowski, A., & Świątkowski, A. (1999). Adsorption and its Applications in Industry and Environmental Protection. En *Studies in Surface Science and Catalysis* (Vol. 120, pp. 69-94). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0167-2991\(99\)80549-7](https://doi.org/10.1016/S0167-2991(99)80549-7)

Danish, M., Hashim, R., Ibrahim, M. N. M., & Sulaiman, O. (2014). Optimized Preparation for Large Surface Area Activated Carbon From Date (*Phoenix dactylifera* L.) Stone Biomass. *Biomass and Bioenergy*, 61, 167-178. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.12.008>

Efiyanti, L., Indrawan, D. A., Hastuti, N., & Darmawan, S. (2020). The Activated Carbon Produced from Mayan Bamboo (*Gigantochloa robusta* Kurz) and its Application as Dye Removal. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 935(1), 012018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/935/1/012018>

El-Naas, M. H., & Alhaija, M. A. (2011). *Modeling of Adsorption Processes*. 23.

El-Sayed, G. O., Yehia, M. M., & Asaad, A. A. (2014). Assessment of Activated Carbon Prepared from Corncob by Chemical Activation with Phosphoric Acid. *Water Resources and Industry*, 7-8, 66-75. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2014.10.001>

Ezeugo, J. N. O. (2018). *Removal of Methylene Blue from Aqueous Solution by Adsorption onto Activated Carbon Prepared from Animal bone and Corncob – an Agricultural waste*. 13.

Farnane, M., Tounsadi, H., Machrouhi, A., Elhalil, A., Mahjoubi, F. Z., Sadiq, M., Abdennouri, M., Qourzal, S., & Barka, N. (2018). Dye Removal from Aqueous Solution

by Raw Maize Corncob and H₃PO₄ Activated Maize Corncob. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 8(2), 214-224. <https://doi.org/10.2166/wrd.2017.179>

García Bendezú, A., & Cerrón Leandro, G. (2014). *Revista de Investigación*. 21(1), 182.

Garg, V. (2004). Basic dye (methylene blue) Removal from Simulated Wastewater by Adsorption Using Indian Rosewood sawdust: A timber industry waste. *Dyes and Pigments*, 63(3), 243-250. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2004.03.005>

Hernández Sampieri, R., & Fernández Collado, C. (2014). *Metodología de la investigación* (P. Baptista Lucio, Ed.; Sexta edición). McGraw-Hill Education.

Hussein, M. A., Radhi, I. K., & Kadhim, Z. N. (2020). Adsorption, Kinetic, Equilibrium, Thermodynamic and Photocatalytic Investigations of the Removal of Nigrosin, Alizarin, Indigo and Acid Fuchsin Dyes on Modified CaO Surface. *Asian Journal of Applied Chemistry Research*, 19-32. <https://doi.org/10.9734/ajacr/2020/v6i430167>

INIA, I. N. de I. A. (2020). *Manual Técnico del Cultivo de Maíz Amarillo Duro.pdf*. 146.

INIA, I. N. de I. A. (2021). *Manual de Producción de Maíz Amiláceo .pdf*. 154.

Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2022, agosto 8). *Informe Técnico*. 63.

Jadhav, A. C., & Jadhav, N. C. (2021). Treatment of Textile Wastewater Using Adsorption and Adsorbents. En *Sustainable Technologies for Textile Wastewater Treatments* (pp. 235-273). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85829-8.00008-0>

Jawad, A. H., Bardhan, M., Islam, Md. A., Islam, Md. A., Syed-Hassan, S. S. A., Surip, S. N., AlOthman, Z. A., & Khan, M. R. (2020). Insights Into the Modeling, Characterization and Adsorption Performance of Mesoporous Activated Carbon from Corn Cob Residue via Microwave-assisted H₃PO₄ activation. *Surfaces and Interfaces*, 21, 100688. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100688>

Johnson, P. J., Setsuda, D. J., & Williams, R. S. (1999). Activated Carbon for Automotive Applications. En *Carbon Materials for Advanced Technologies* (pp. 235-268). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-008042683-9/50010-8>

Kaźmierczak, J., Nowicki, P., & Pietrzak, R. (2013). Sorption Properties of Activated Carbons Obtained from Corn Cobs by Chemical and Physical Activation. *Adsorption*, 19(2-4), 273-281. <https://doi.org/10.1007/s10450-012-9450-y>

Kemp, T. (2017). A Brief 100 Year History of Carbon. *Science Progress*, 100, 293-298. <https://doi.org/10.3184/003685017X14994318577435>

Kulkarni, S. V., Blackwell, C. D., Blackard, A. L., Stackhouse, C. W., & Alexander, M. W. (s. f.). *Textile Dyes and Dyeing Equipment: Classification, Properties, and Environmental aspects*. 5.

Kwiatkowski, J. F. (Ed.). (2012). *Activated Carbon: Classifications, Properties and Applications*. Nova Science Publishers.

Lellis, B., Fávaro-Polonio, C. Z., Pamphile, J. A., & Polonio, J. C. (2019). Effects of Textile Dyes on Health and the Environment and Bioremediation Potential of Living Organisms. *Biotechnology Research and Innovation*, 3(2), 275-290. <https://doi.org/10.1016/j.biori.2019.09.001>

Liou, T.-H., & Wu, S.-J. (2009). Characteristics of Microporous/mesoporous Carbons Prepared from Rice Husk Under Base- and Acid-treated Conditions. *Journal of Hazardous Materials*, 171(1-3), 693-703. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.06.056>

Marshall, M. R. (2010). *Food Analysis* (S. S. Nielsen, Ed.). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1478-1_6

McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriott, P. (2007). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química* (Séptima Edición). The McGraw-Hill.

Medhat, A., El-Maghrabi, H. H., Abdelghany, A., Abdel Menem, N. M., Raynaud, P., Moustafa, Y. M., Elsayed, M. A., & Nada, A. A. (2021). Efficiently Activated Carbons

from Corn Cob for Methylene Blue Adsorption. *Applied Surface Science Advances*, 3, 100037. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2020.100037>

Mekonnen, D. T., Alemayehu, E., & Lennartz, B. (2021). Fixed-Bed Column Technique for the Removal of Phosphate from Water Using Leftover Coal. *Materials*, 14(19), Article 19. <https://doi.org/10.3390/ma14195466>

Minaya Pereyra, M., Cari Rodríguez, P. W., Garate Quispe, J. S., & Achata, L. R. (2020). Carbón Activado de Residuos Maderables de Shihuahuaco (*Dipteryx micrantha*), y su Aplicación en Decoloración de Aceite de Castaña (*Bertholletia excelsa*). *Ciencia Amazónica (Iquitos)*, 8(1), 1-16. <https://doi.org/10.22386/ca.v8i1.277>

Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. (2021). *Marco Orientador de Cultivos 2021-2022*. 19.

Mkungunugwa, T., Manhokwe, S., Chawafambira, A., & Shumba, M. (2021). Synthesis and Characterisation of Activated Carbon Obtained from Marula (*Sclerocarya birrea*) Nutshell. *Journal of Chemistry*, 2021, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2021/5552224>

Mojoudi, N., Mirghaffari, N., Soleimani, M., Shariatmadari, H., Belver, C., & Bedia, J. (2019). Phenol Adsorption on High Microporous Activated Carbons Prepared from Oily Sludge: Equilibrium, Kinetic and Thermodynamic Studies. *Scientific Reports*, 9(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55794-4>

Mousavi, S. J., Parvini, M., & Ghorbani, M. (2018). Experimental Design Data for the Zinc Ions Adsorption Based on Mesoporous Modified Chitosan Using Central Composite Design Method. *Carbohydrate Polymers*, 188, 197-212. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.01.105>

Newcombe, G., & Dixon, D. (2006). Removal of Natural Organic Material and Algal Metabolites Using Activated Carbon. En *Interface Science in Drinking Water Treatment -Theory and Applications* (Vol. 10, p. 21). ELSEVIER.

Pereira, L., & Alves, M. (2012). Dyes—Environmental Impact and Remediation. En A. Malik & E. Grohmann (Eds.), *Environmental Protection Strategies for Sustainable*

Development (pp. 111-162). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1591-2_4

Piaskowski, K., Świdarska-Dąbrowska, R., & Zarzycki, P. K. (2018). Dye Removal from Water and Wastewater Using Various Physical, Chemical, and Biological Processes. *Journal of AOAC International*, 101(5), 1371-1384. <https://doi.org/10.5740/jaoacint.18-0051>

Pourhakkak, P., Taghizadeh, A., Taghizadeh, M., Ghaedi, M., & Haghdoost, S. (2021). Chapter 1—Fundamentals of Adsorption Technology. En M. Ghaedi (Ed.), *Interface Science and Technology* (Vol. 33, pp. 1-70). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818805-7.00001-1>

Rim Baccar Ep Yangui. (2013). *Removal of Water Pollutants by Adsorption on Activated Carbon Prepared From Olive-Water Cakes and by Biological Treatment Using Ligninolytic Fungi*. Universidad Autónoma de Barcelona.

Rodríguez Reinoso, F., & Sepúlveda Escribano, A. (2001). *Porous Carbons in Adsorption and Catalysis*. 5, 47. <https://doi.org/10.1016/B978-012513910-6/50066-9>

Rodríguez-Reinoso, F. (2001). Activated Carbon and Adsorption. En K. H. J. Buschow, R. W. Cahn, M. C. Flemings, B. Ilschner, E. J. Kramer, S. Mahajan, & P. Veyssi re (Eds.), *Encyclopedia of Materials: Science and Technology* (pp. 22-34). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/00005-X>

Rojas Cairampoma, M. R. (2015). *Tipos de Investigación Científica: Precisa Nomenclatura y Clasificación Holística*. 4.

Silva Chávez, J. A. (2018). *Uso del Carbón Activado Obtenido a Partir de la Cascara de Zapallo (cucurbitasp.) en la Remoción de Cloro Total y Libre en Agua Potable de la Ciudad de Tumbes*. Universidad Nacional de Tumbes.

Sivarajasekar, N., & Baskar, R. (2015). *Agriculture Waste Biomass Valorisation for Cationic Dyes Sequestration: A concise review*. 13.

Slama, H. B., Chenari Bouket, A., Pourhassan, Z., Alenezi, F. N., Silini, A., Cherif-Silini, H., Oszako, T., Luptakova, L., Golińska, P., & Belbahri, L. (2021). Diversity of Synthetic Dyes from Textile Industries, Discharge Impacts and Treatment Methods. *Applied Sciences*, 11(14), 6255. <https://doi.org/10.3390/app11146255>

Soni, I., Kumar, P., Sharma, S., & Kudur Jayaprakash, G. (2021). A Short Review on Electrochemical Sensing of Commercial Dyes in Real Samples Using Carbon Paste Electrodes. *Electrochem*, 2(2), 274-294. <https://doi.org/10.3390/electrochem2020020>

Srivatsav, P., Bhargav, B. S., Shanmugasundaram, V., Arun, J., Gopinath, K. P., & Bhatnagar, A. (2020). Biochar as an Eco-Friendly and Economical Adsorbent for the Removal of Colorants (Dyes) from Aqueous Environment: A Review. *Water*, 12(12), 3561. <https://doi.org/10.3390/w12123561>

Tcheka, C., Abia, D., Iya-sou, D., & Tamgue, A. L. T. (2021). *Removal of Crystal Violet dye From Aqueous Solutions Using Chemically Activated Carbons by H₃PO₄ Activation from Corn Cobs and Corn Roots: Kinetic and equilibrium isotherm studies*. 11.

United Nations. (s. f.). *Water Scarcity*. UN-Water. <https://www.unwater.org/water-facts/water-scarcity>

Yu, X., Han, Z., Fang, S., Chang, C., & Han, X. (2019). Optimized Preparation of High Value-Added Activated Carbon and Its Adsorption Properties for Methylene Blue. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 17(8). <https://doi.org/10.1515/ijcre-2018-0267>

Zhang, Z., Jiang, C., Li, D., Lei, Y., Yao, H., Zhou, G., Wang, K., Rao, Y., Liu, W., Xu, C., & Zhang, X. (2020). Micro-mesoporous Activated Carbon Simultaneously Possessing Large Surface Area and Ultra-high Pore Volume for Efficiently Adsorbing Various VOCs. *Carbon*, 170, 567-579. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.08.033>

Zulkania, A., Hanum, G. F., & Sri Rezki, A. (2018). The Potential of Activated Carbon Derived from Bio-char Waste of Bio-oil Pyrolysis as Adsorbent. *MATEC Web of Conferences*, 154, 01029. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201815401029>

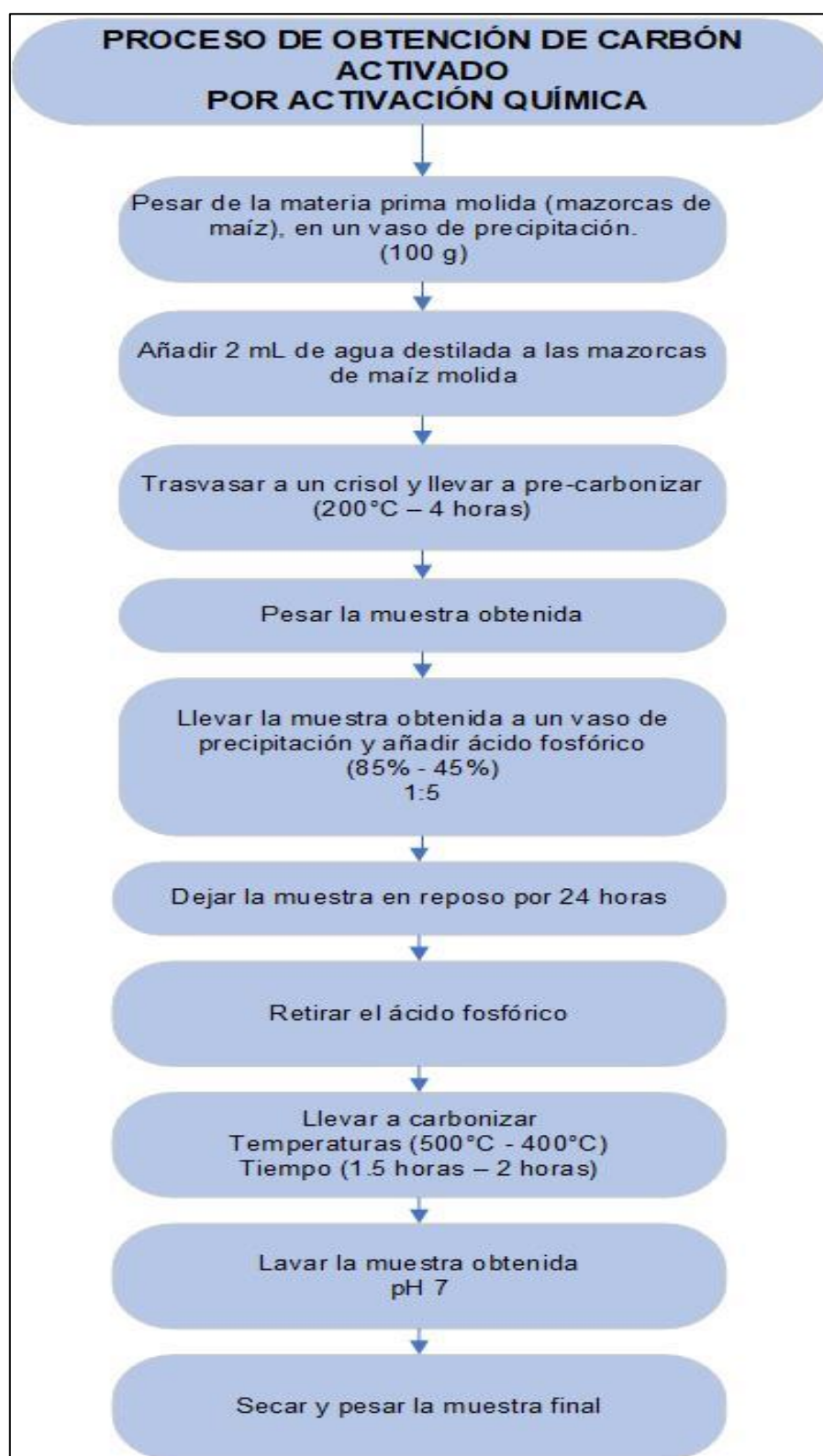
Иванова (RU), И. И., Иванова, И. И., КНЯЗЕВА (RU), Е. Е., Князева, Е. Е.,
Добрякова (RU), И. В., Добрякова, И. В., Монахова (RU), Ю. В., Монахова, Ю. В.,
Кожина (RU), О. В., Кожина, О. В., Тихонова (RU), А. А., & Тихонова, А. А. (2010).
Micro-mesoporous Crystalline Material and Method of Making Said Material (Patent N.º
RU2393992C1). <https://patents.google.com/patent/RU2393992C1/en>

ANEXOS

Anexo 1
**Diagrama de flujo del proceso de obtención de carbón
activado a partir de mazorcas de maíz amiláceo**

Figura 29

Diagrama del proceso de obtención de carbón activado a partir de mazorcas de maíz amiláceo



Anexo 2

Preparación de la materia prima (mazorcas de maíz)

Recolección de mazorcas de maíz

La materia prima empleada en este trabajo de investigación corresponde a mazorcas de maíz de la variedad amiláceo, las cuales, son productos de desecho obtenidos luego del proceso de desgranado del maíz. Este material, es considerado como material de desecho del proceso de producción del maíz y generalmente es subutilizado y empleado como combustible en las zonas rurales (figura 30).

Durante el proceso de recolección, se seleccionaron las mazorcas en buen estado.

Figura 30

Mazorcas de maíz recolectadas



Pesado

Después de la recolección de las mazorcas de maíz, se llevó la materia prima seleccionada a la balanza electrónica para su pesado (figura 31), obteniendo 20 kg.

Figura 31

Pesado de las mazorcas de maíz



Molienda

Lo molienda se realizó en el molino de martillo del Laboratorio de Tránsito de Masa de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia (figuras 32 y 33), se colocó 13 kg de mazorcas de maíz en pequeñas cantidades obteniendo en poco tiempo las mazorcas molidas.

Figura 32

Proceso de molienda de las mazorcas de maíz amiláceo



Figura 33

Resultado final del proceso de molienda



Pesado

Finalmente se realizó el proceso de pesado de las mazorcas de maíz molido (figura 34), obteniendo 12 kg de corontas de maíz molido, se perdió aproximadamente 1 kg de materia prima durante el proceso de molienda.

Figura 34

Pesado de las mazorcas de maíz molido



Tamizado

Terminado el proceso de molienda y su posterior pesado, se separó 6 kg de mazorcas de maíz molido para el proceso de tamizado (figura 35), se utilizó tamiz número 2 mm.

Figura 35

Proceso de tamizado de las mazorcas de maíz molido



Caracterización de la materia prima (mazorca de maíz molido)

La materia prima molida y tamizada fue caracterizada mediante la determinación de la humedad y contenido de ceniza.

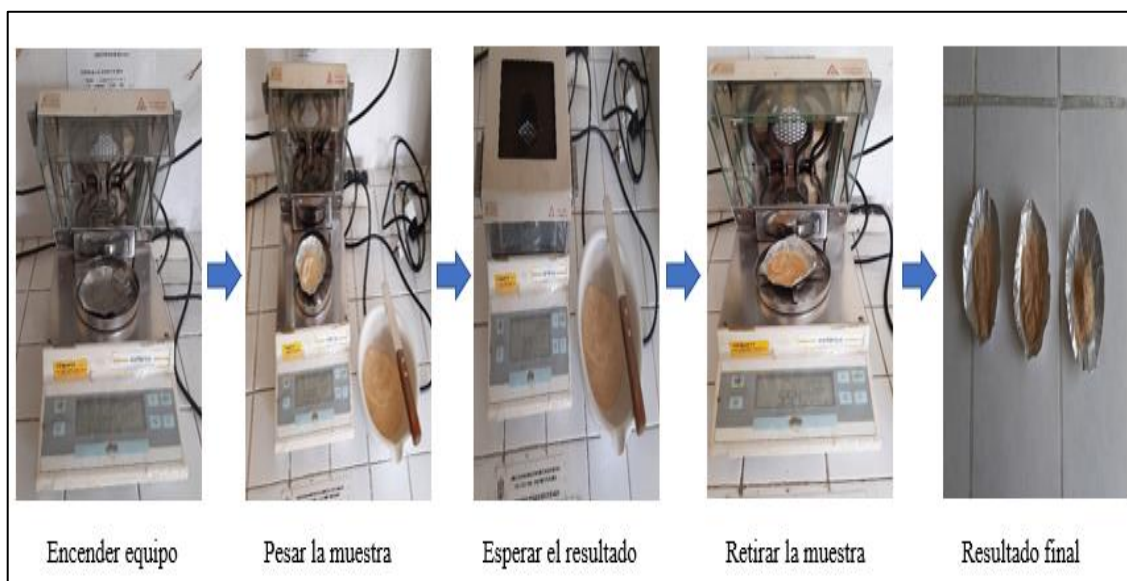
Determinación de la humedad

La determinación de humedad (figura 36), se realizó empleando un equipo de determinador de humedad método descrito por Marshall (2010). Se describe a continuación:

1. Encendido del equipo de determinación de humedad.
2. Colocación de la placa de aluminio porta muestra.
3. Programación de la salida de resultados.
4. Cargado de la placa de aluminio con 3 g de muestra.
5. Obtención de resultados.

Figura 36

Proceso de la determinación de humedad de la muestra (mazorcas de maíz molido)



Determinación de Cenizas

La determinación de cenizas (figura 37), se realizó empleado el método AOCA 900.02 A o B 920.117,923.03 (Marshall, 2010). Realizando los siguientes pasos:

1. Se pesaron 5 g de muestra seca en el crisol, por triplicado.
2. Se colocaron los crisoles en el horno mufla en frío.
3. Se encendió y se programó el horno mufla a una temperatura de 550 °C por 12 h.
4. Se apagó el horno mufla y se esperó para abrirlo hasta tener una temperatura de 100 °C.

5. Se retiraron los crisoles y se llevó al desecador. Se esperó que los crisoles se enfriaran, antes de pesarlos.
6. Se pesaron los crisoles y se tomó nota del resultado.

Figura 37

Proceso de la determinación de ceniza de la muestra (mazorcas de maíz molido)



El contenido de ceniza se calculó empleando la siguiente ecuación:

$$\%ceniza = \frac{P_2 - P_0}{P_1 - P_0} \times 100 \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

- P₂=Peso del crisol con ceniza, g
- P₁=Peso del crisol con muestra, g
- P₀=Peso del crisol vacío, g

Anexo 3

Obtención de carbón activado (mazorcas de maíz) utilizando H_3PO_4 como agente activante

1. Se pesaron 100 g de materia prima (mazorcas de maíz molida) en una balanza analítica.
2. Se añadió 2 mL de agua destilada a la muestra, y se mezcló mediante agitación constante.
3. Se trasvasó la muestra a un crisol de porcelana y se colocó en el horno mufla para su pre-carbonización.
4. Se encendió y se programó el horno mufla a una temperatura de 200 °C por 4 h.
5. Se apagó el horno mufla y se esperó para abrirlo hasta tener una temperatura de 100 °C.
6. Se retiraron los crisoles y se llevaron al desecador.
7. Se pesó la muestra obtenida.
8. En un vaso de precipitación de 500 mL se añadió la muestra pre-carbonizada y se adicionó ácido fosfórico (85% ó 45%) en relación 1:5 P/V.
9. Se dejó en reposo por un periodo de 24 h.
10. Se filtró la muestra mediante un equipo de filtración al vacío.
11. La muestra fue trasvasada a un crisol para su carbonización en el horno mufla. Las temperaturas de carbonización empleadas fueron de 500 °C y 400 °C. Así mismo se varió el tiempo de carbonización (1,5 h ó 2 h), de acuerdo al diseño experimental planteado.
12. Se retiró la muestra y se dejó enfriar a temperatura ambiente.
13. El carbón activado obtenido, fue lavado con agua destilada caliente, hasta obtener pH 7.
14. La muestra obtenida fue secada a una temperatura de 150 °C por 2 h en un horno eléctrico, a una temperatura de 150 °C por 2 h.
15. El carbón activado así obtenido fue pesado empleando una balanza analítica y se calculó el % de rendimiento.

En la figura 38 se muestra el esquema del proceso de obtención del carbón activado.

Figura 38

Proceso de obtención del carbón activado a partir de mazorcas de maíz por activación química



El rendimiento del carbón activado fue obtenido mediante la siguiente ecuación:

$$\%Rendimiento = \frac{\text{Peso del carbón activado (g)}}{\text{Peso de la materia prima (g)}} \times 100 \quad (\text{Ec. 4})$$

Caracterización del carbón activado obtenido a partir de mazorcas de maíz amiláceo

Para la determinación de la humedad del carbón activado, se ha empleado el método descrito por Marshall (2010), el cual se describe a continuación:

1. Se realizó el encendido del equipo de determinación de humedad.
2. Se colocó la placa de aluminio porta muestra.
3. Se programó la salida de resultados.
4. Se carga la placa de aluminio con 3 g de muestra.
5. Se espero el resultado obtenido.

Determinación de ceniza

La determinación de ceniza del carbón activado se realizó empleando el método ASTM D2866-11 (ASTM D2866 – 11, s. f.), el cual se describe a continuación:

1. Se pesó 5 g de muestra seca de carbón activado en el crisol de porcelana.
2. Se llevó los crisoles de porcelana a la mufla a temperatura de 650 °C por un tiempo de 3 h.
3. Se retiró los crisoles de la mufla y se colocó al desecador dejando que se enfrié.
4. Se pesó el crisol y se tomó nota de los resultados.
5. Se preparó las muestras por triplicado.

El cálculo del contenido de cenizas de la muestra de carbón activado se realiza usando la relación:

$$\% \text{ cenizas totales} = \frac{D - B}{C - B} \times 100 \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde:

D=Peso del crisol con ceniza, g

C=Peso del crisol con muestra original, g

B=Peso del crisol vacío, g

Determinación de la densidad aparente

La determinación de la densidad aparente se realizó utilizando el método descrito por Mkungunugwa et al. (2021), para lo cual se siguió los siguientes pasos:

1. Se utilizó una probeta graduada de 10 mL y se vertió la muestra de carbón activado hasta un volumen conocido.
2. Se pesó la probeta anotando el resultado.
3. Se realizó la prueba por triplicado.

La densidad aparente del carbón activado se calculó con la siguiente relación:

$$\text{Densidad aparente} \left(\frac{g}{mL} \right) = \frac{\text{masa del carbón activado (g)}}{\text{volumen del carbón activado (mL)}} \quad (\text{Ec. 6})$$

Distribución de tamaño de partícula

Para la determinación de la distribución de tamaño de partícula del carbón activado, se utilizó el método ASTM D 2862-97 (ASTM D 2862 – 97, s. f.) modificado. El procedimiento se indica a continuación:

1. Se utilizaron tamices número 10,12,14,16,18 y la tara, pesando cada uno de los tamices y la tara.
2. Se apiló los tamices en el equipo de tamizado, en orden creciente del número de tamiz.
3. Se colocó 50 g de carbón activado en los tamices apilados.
4. Se instaló la tapa del tamiz y se dejó agitar durante 10 min.
5. Finalizado el proceso se pesaron los tamices.

Se utilizó la siguiente ecuación para calcular el porcentaje retenido en cada fracción:

$$R = \left(\frac{F}{S}\right) \times 100 \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde:

F= Peso de fracción de tamiz

S=Suma de los pesos de las fracciones del tamiz

R= Porcentaje retenido en cada fracción

Análisis de difracción de rayos X

El análisis de difracción de rayos X se llevó a cabo mediante el equipo Rigaku Miniflex II Desktop en el laboratorio de investigación de fisicoquímica (LABINFIS) de la facultad de ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI).

Análisis de área superficial

La determinación del área superficial del carbón activado obtenido, fue realizado en el Laboratorio de Investigación de Fisicoquímica (LABINFIS) de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), empleando el equipo Gemini VII 2390 V1.02.

Anexo 4

Prueba de adsorción de colorantes del carbón activado obtenido

Para la prueba de adsorción de colorantes, se utilizaron los métodos de Farnane et al. (2018) y Rim Baccar Ep Yanguí (2013), con ligeras modificaciones.

Se evaluó la capacidad de adsorción de colorantes del carbón activado obtenido empleando 2 colorantes: azul de metileno y nigrosina.

La capacidad de adsorción de colorantes de los 8 carbones activados obtenidos, fue evaluado empleando el colorante azul de metileno, mientras que la capacidad de adsorción sobre el colorante nigrosina, fue evaluado empleando el carbón activado que mostró mejor respuesta en la prueba de adsorción con azul de metileno.

Los ensayos de adsorción se realizaron empleando 2 g de carbón activado, el cual fue introducido y mezclado con 200 mL de una solución que contenía 100 ppm de colorante (azul de metileno o nigrosina). Esta mezcla estuvo sometida a agitación constante durante todo el desarrollo del ensayo. Cada 30 min se tomaron alícuotas de muestra, las cuales fueron filtradas y posteriormente, se cuantificó el contenido de colorante, empleando un espectrofotómetro UV-Vis (Genesys modelo 10S UV-Vis).

La cuantificación del contenido de colorantes azul de metileno y nigrosina fueron realizadas a 666 nm y 586 nm de longitud de onda respectivamente.

Finalmente se determinó la capacidad de adsorción y el porcentaje de remoción de colorantes de los carbones activados obtenidos.

La capacidad de adsorción del carbón activado se calculó con la siguiente fórmula:

$$q = \frac{V(C_o - C_e)}{m} \quad (Ec. 8)$$

Donde:

q= capacidad de adsorción (mg/g)

V= volumen de solución (L)

Co=concentración inicial de la solución (mg/L)

Ce=concentración final de la solución (mg/L)

m= masa del adsorbente (g)

El porcentaje de remoción (eficiencia de eliminación o eficiencia de adsorción), fue calculado mediante la siguiente fórmula:

$$\%Remoción = \frac{(C_o - C_e)}{C_o} \times 100 \quad (Ec. 9)$$

Donde:

Co = concentración inicial de la solución (mg/L)

Ce=concentración final de la solución (mg/L)

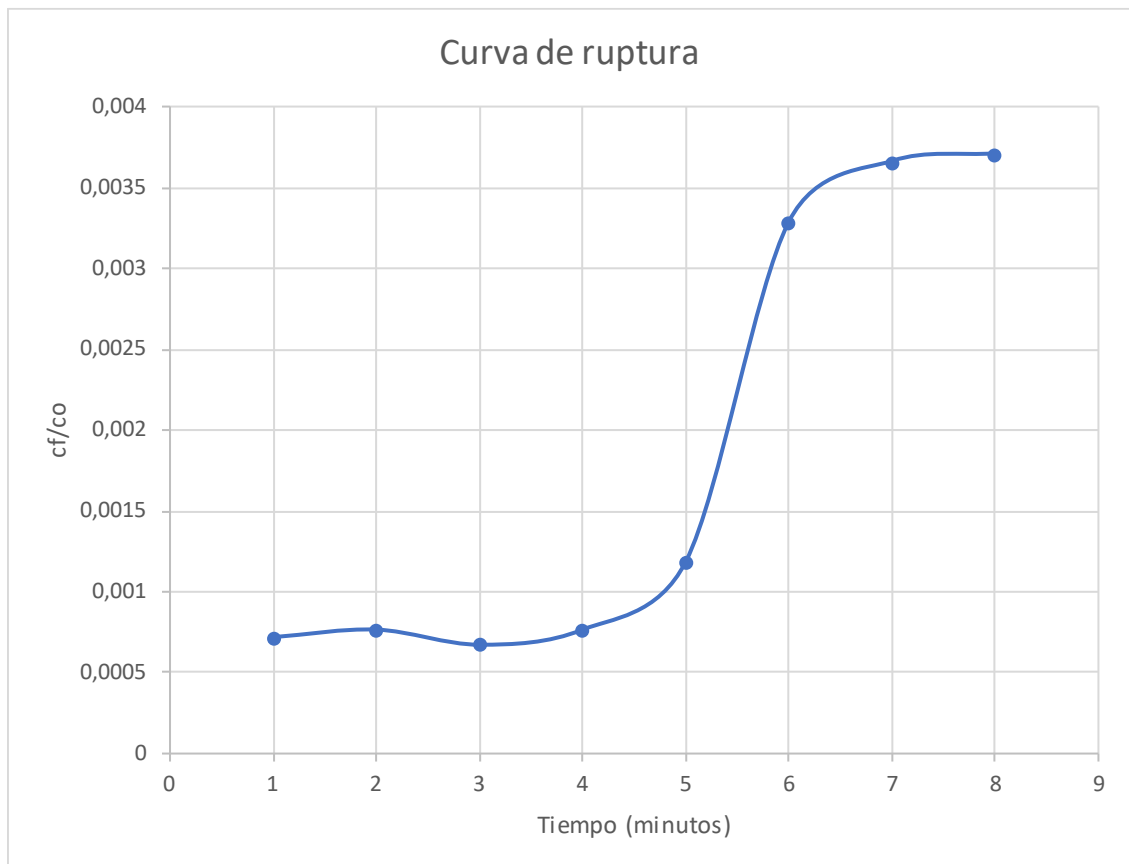
Anexo 5

Curva de ruptura del carbón activado A-45% en columna de lecho fijo

Como un estudio complementario se desarrolló el estudio de adsorción de columna de lecho fijo utilizando el carbón activado (A-45%), mostrando los siguientes resultados.

Figura 39

Curva de ruptura utilizando un sistema de adsorción de columna de lecho fijo



$C_0=100$ ppm de azul de metileno

Para ello se utilizó una columna de plástico con un diámetro de 3 cm y una longitud de 120 cm. La columna se llenó con un poco de algodón y 3 g de carbón activado (A-45%). El diagrama del sistema se muestra en la figura 42.

El estudio de adsorción del colorante azul de metileno en una columna de lecho fijo, se utilizó para estimar la curva de ruptura. Donde se representa la relación de C_t/C_0 en relación al tiempo.

Donde C_t es la concentración del colorante a la salida de la columna, C_0 es la concentración del colorante en la entrada (Mekonnen et al., 2021).

La curva obtenida se muestra en la figura 39, se puede observar el punto de ruptura, este punto nos indica que la concentración del efluente aumenta rápidamente en un tiempo determinado y un punto de saturación que es la concentración del adsorbato en el efluente se aproxima a la concentración de entrada.

Además se utilizó un modelo matemático para describir el comportamiento de la adsorción del carbón activado en la columna del lecho fijo, para ello se empleó el modelo matemático de Yoon-Nelson, este modelo se basa en la suposición de que la tasa de adsorción de cada colorante es proporcional a la tasa de disminución de la adsorción (Mekonnen et al., 2021).

El modelo está representado por la ecuación linealizada:

$$\ln\left(\frac{C_t}{C_0 - C_t}\right) = k_{yn}t - \tau k_{yn} \quad (Ec. 10)$$

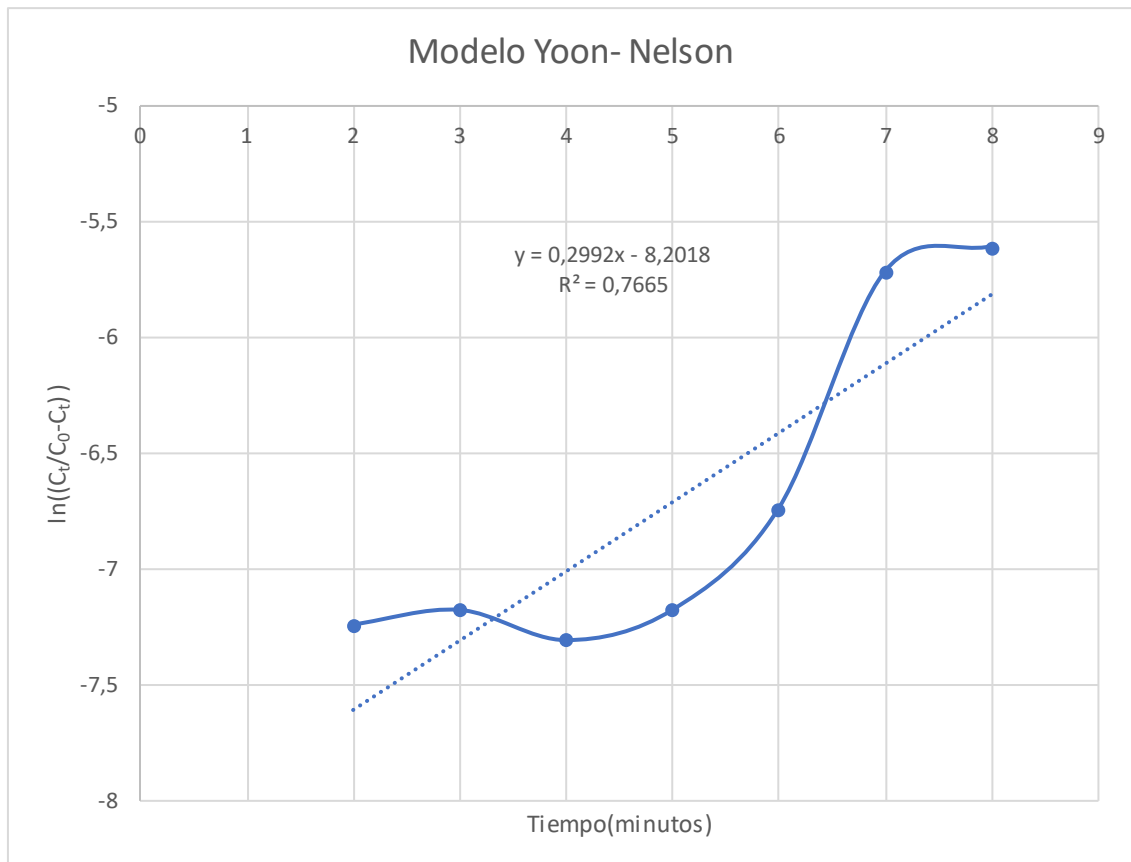
Donde:

k_{yn} = Constante de la velocidad, min^{-1} .

τ = Tiempo requerido para retener el 50% del adsorbato inicial, minutos.

Figura 40

Modelo de Yoon-Nelson para la descripción del comportamiento de eliminación del contaminante

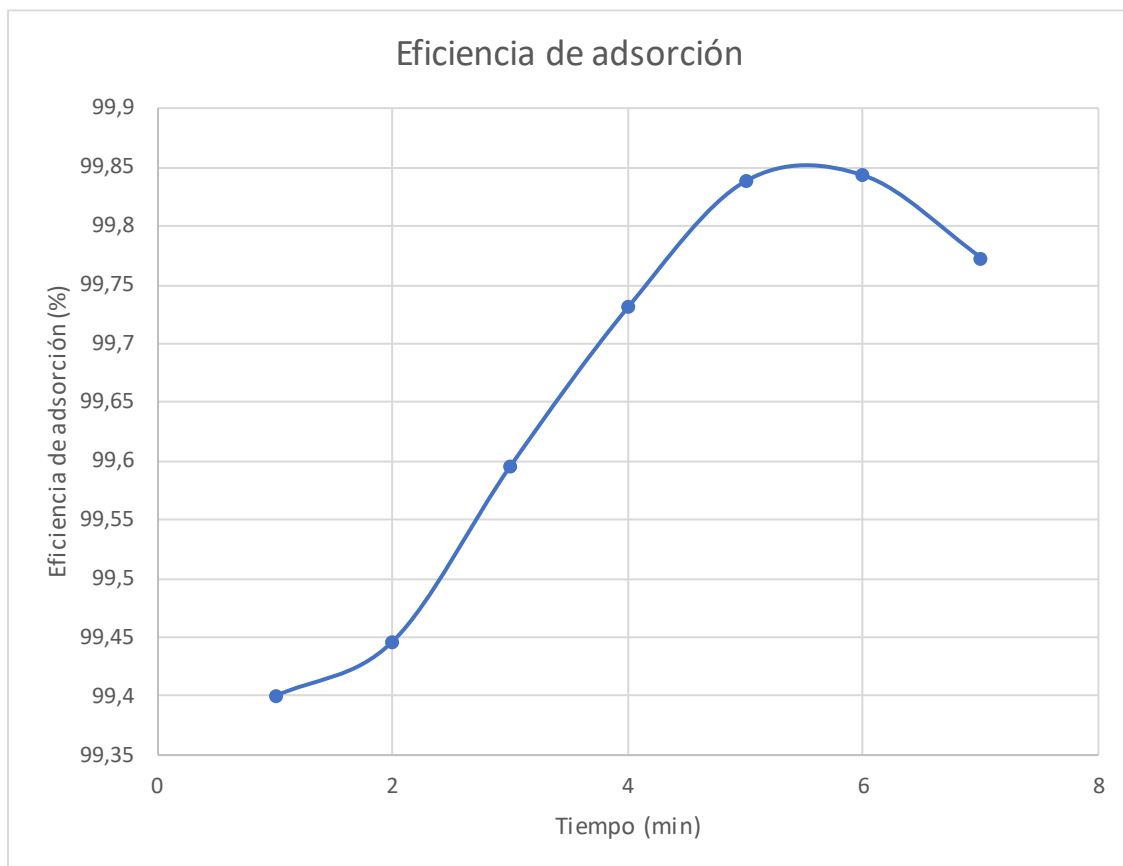


En la tabla 22 se muestra los resultados obtenidos. Aquí se ve que el tiempo requerido para que el 50% de avance del colorante es 4 min, obteniendo un porcentaje de remoción en ese momento de 99.923%, mostrando un comportamiento eficiente de remoción del colorante en la columna de adsorción.

Tabla 22
Parámetros del modelo Yoon-Nelson

Parámetros del modelo		
k_{YN} (min ⁻¹)	τ (50%) (min)	R ²
0,2992	4	0,7852

Figura 41
Estudio de adsorción en columna de lecho fijo



Simultáneamente se desarrolló el estudio de eficiencia de adsorción del colorante azul de metileno ($C_0 = 100$ ppm), utilizando una columna de lecho fijo.

Se observa que la eficiencia de adsorción avanza de manera rápida, hasta alcanzar un punto de saturación con una eficiencia de 99,85%.

Figura 42
Sistema de adsorción de columna de lecho fijo



Anexo 6

Capacidad de adsorción del carbón activado de semillas de molle (6-85%), utilizando el colorante azul de metileno

Adicionalmente se desarrolló la obtención de carbón activado a partir de semillas de molle, presentado los siguientes resultados. Se realizó el mismo proceso de obtención del carbón activado de maíz, presentando mejor resultado el carbón activado (6-85%).

Tabla 23

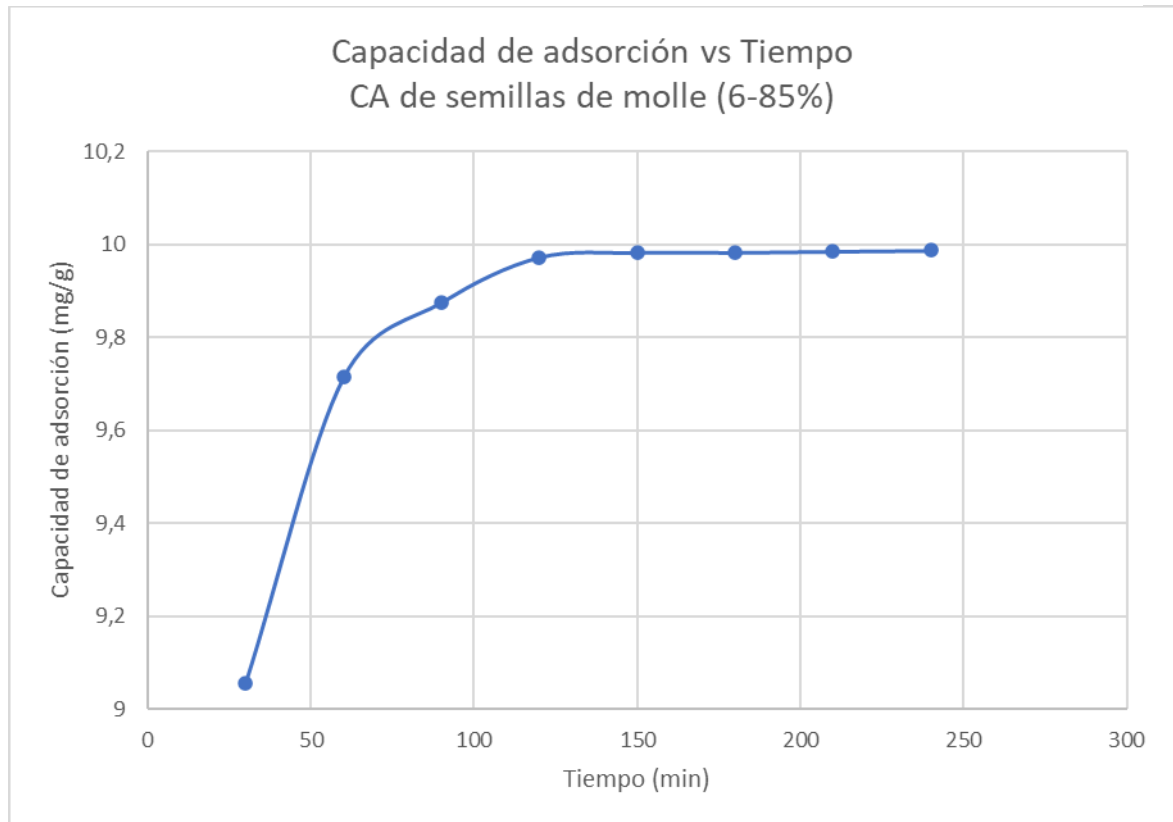
Resultados de la capacidad de adsorción del carbón activado de semillas de molle (6-85%), Utilizando el colorante azul de metileno. Laboratorio de Trasferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.

Carbón activado de semillas de molle (6-85%)			
Tiempo (minutos)	Concentración del colorante (ppm)	% remoción	Capacidad de adsorción (mg/g)
0	100	----	----
30	9,436	90,564	9,056
60	2,857	97,143	9,714
90	1,245	98,755	9,876
120	0,273	99,727	9,973
150	0,170	99,830	9,983
180	0,170	99,830	9,983
210	0,147	99,853	9,985
240	0,128	99,872	9,987

Nota: parámetros de proceso de 6-85%: temperatura = 500 °C, tiempo = 1,5 h, concentración del H₃PO₄ = 85%

Figura 43

Gráfico de la capacidad de adsorción versus tiempo del carbón activado de semillas de molle (6-85%). Laboratorio de Transferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.



CA (Carbón activado)

Para la obtención del carbón activado de semillas de molle 6-85%, se utilizó 85% de ácido fosfórico para su activación química, 500 °C para su carbonización por un tiempo de una hora y media. Se menciona que es el mejor carbón activado de semillas de molle porque obtuvo la mejor capacidad de adsorción en comparación de los demás carbones activados. Estos resultados se muestran en la tabla 23 y en la figura 43.

Estos resultados nos muestran que tanto el carbón activado de mazorcas de maíz y el carbón activado de semillas de molle son eficientes para la remoción de un colorante sintético. Se llega a la conclusión que depende mucho del tipo de materia prima y el proceso para obtener un carbón activado que remueva eficientemente los colorantes sintéticos.

Anexo 7
Panel fotográfico

Figura 44

Muestras de carbón activado de mazorcas de maíz. Laboratorio de Trásferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.

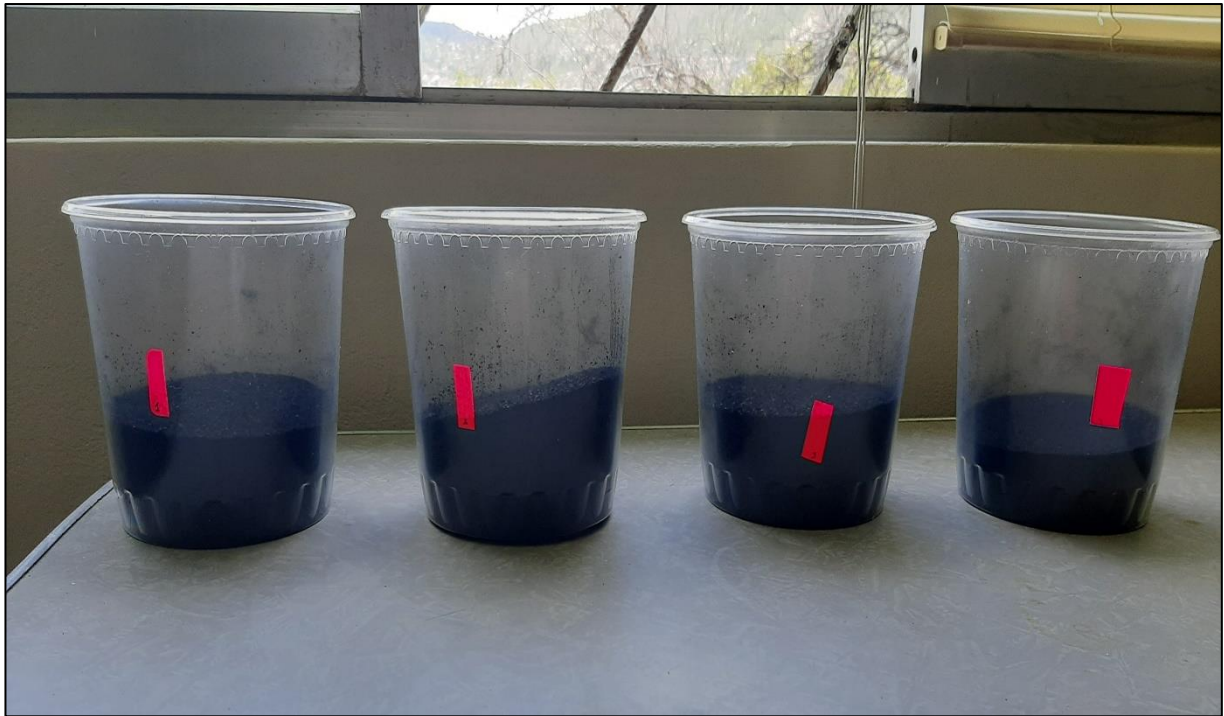


Figura 45

Carbonización del carbón activado. Laboratorio de Química Orgánica. FIQM-UNSCH. Avacucho 2022.



Figura 46

Carbón activado de mazorcas de maíz. Laboratorio de Transferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.



Figura 47

Carbón activado de mazorcas de maíz. Laboratorio de Tránsito de Masa de la FIQM-UNSC, Ayacucho 2022.



Figura 48

Lavado del carbón activado hasta obtener pH 7. Laboratorio de Transferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.



Figura 49

Determinación de la densidad aparente del carbón activado. Laboratorio de Tránsito de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.



Figura 50

*Análisis de tamaño de partícula del carbón activado.
Laboratorio de Trásferencia de Masa de la FIQM-
UNSCH, Ayacucho 2022.*



Figura 51

Prueba de adsorción del carbón activado de mazorcas de maíz con el azul de metileno. Laboratorio de Tránsito de Masa de la FIQM-UNSC, Ayacucho 2022.



Figura 52

Resultado de la prueba de adsorción. utilizando el carbón activado de mazorcas de maíz. Laboratorio de Tránsito de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.



Figura 53

Prueba de adsorción del carbón activado de mazorcas de maíz con nigrosina. Laboratorio de Tránsito de Masa de la FIQM-UNSC, Ayacucho 2022.



Figura 54

Resultado de la prueba de adsorción. Utilizando el carbón activado de mazorcas de maíz. Laboratorio de Tránsito de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.



Figura 55

Carbón activado de semillas de molle. Laboratorio de Trasferencia de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.

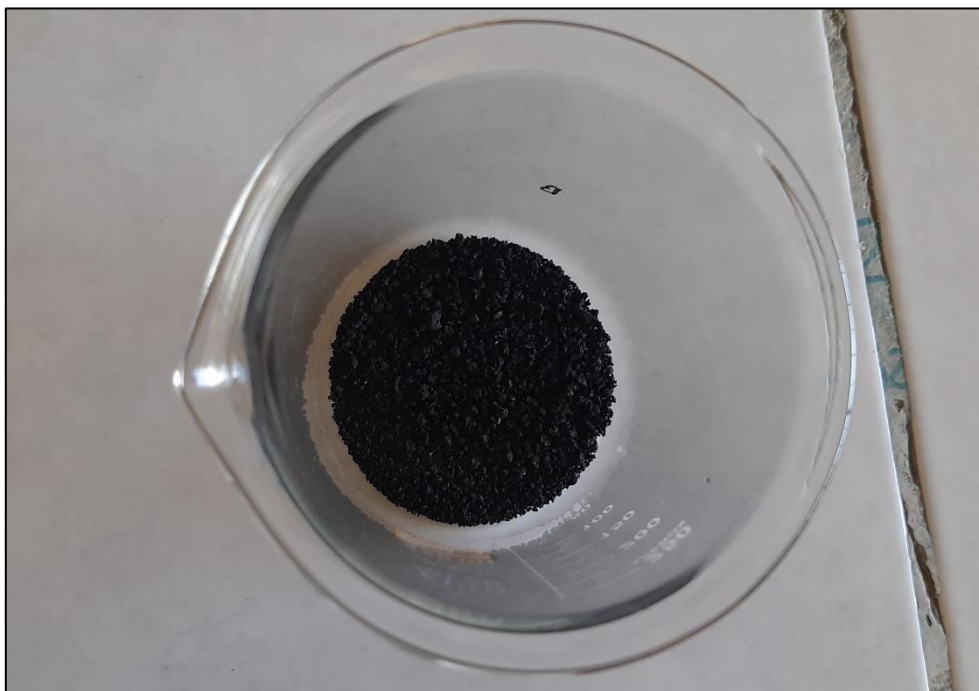


Figura 56

Prueba de adsorción del carbón activado a partir de semillas de molle con el azul de metileno. Laboratorio de Tránsito de Masa de la FIQM-UNSCH, Ayacucho 2022.



Figura 57

Resultado de la prueba de adsorción. Utilizando el carbón activado de semillas de molle. Laboratorio de Tránsito de Masa de la FIQM-UNSC, Ayacucho 2022.

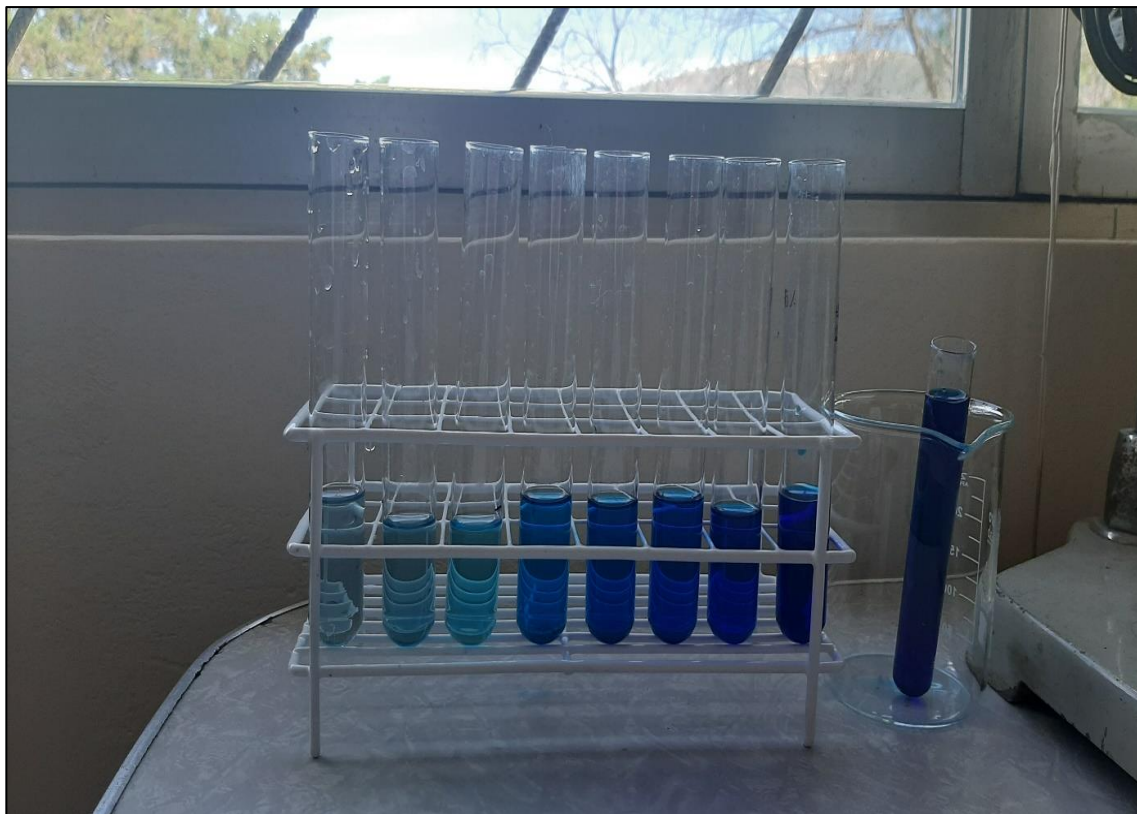


Figura 58

Análisis de la adsorbancia. Laboratorio de la UNSCH, Ayacucho 2022.



Figura 59

Lectura de la adsorbancia de los resultados de la prueba de adsorción. Utilizando carbón activado de mazorcas de maíz. Laboratorio de la UNSCH, Ayacucho 2022.

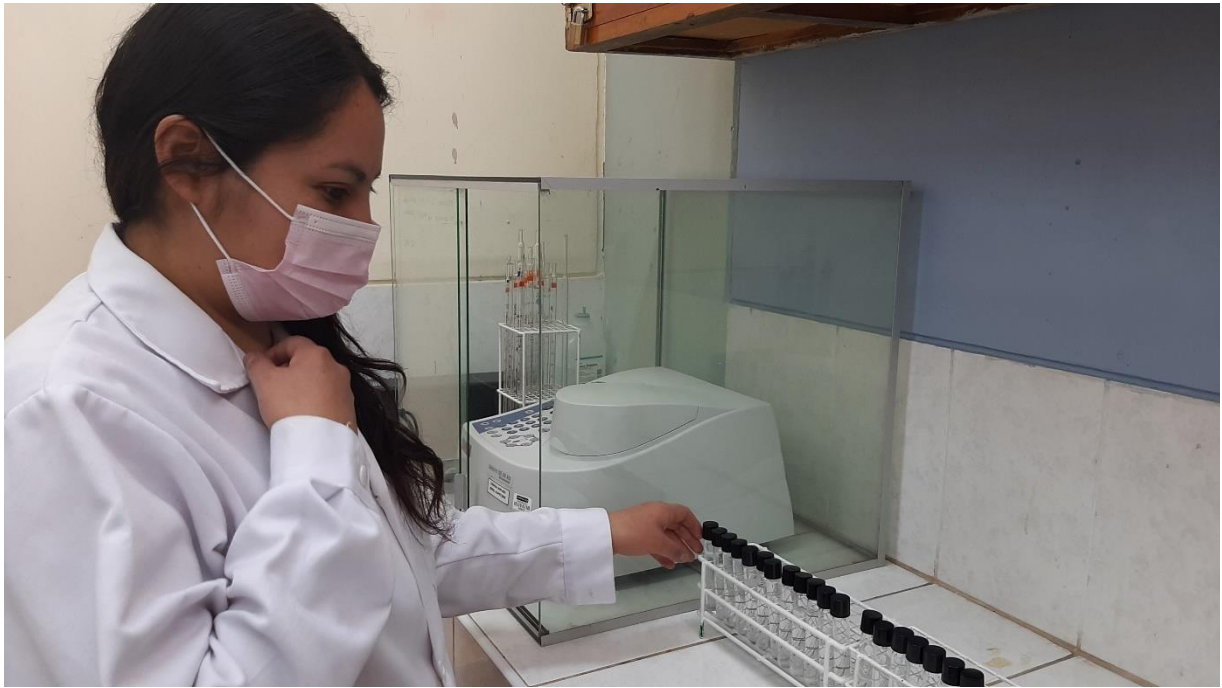


Figura 60

Lectura de la adsorbancia de los resultados de la prueba de adsorción utilizando carbón activado de molle. Laboratorio de la UNSCH, Ayacucho 2022.



Figura 61

Sistema de columna de adsorción. Laboratorio de Tránsito de Masa de la FIQM-UNSC, Ayacucho 2022.



Figura 62

Resultado de la prueba de adsorción. Utilizando la columna de adsorción. Laboratorio de Tránsito de Masa de la FIQM-UNSC, Ayacucho 2022.



Anexo 8

Constancia de análisis de los carbones activados



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE CIENCIAS

LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN DE FISCOQUÍMICA

Constancia

Por la presente, dejo constancia que las muestras enviadas por Rosmery Bautista Godoy para determinar el área BET (3 muestras) y las características cristalinas por la técnica de difracción de rayos X (1 muestra) se realizaron en el Laboratorio de Investigación de Fiscoquímica (LABINFIS) de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI).

Suscribo la presente constancia para los fines que se considere necesario.

Atentamente,



Dr. Gino Picasso
Jefe de Laboratorio de Investigación de Fiscoquímica

Av. Túpac Amaru Nº 210-Lima 25-Perú Apartado 31-139

Telefax: 3813868, anexo 17 E-mail: gpicasso@uni.edu.pe

Anexo 9

Ficha técnica del carbón activado comercial



CLARIMEX CAE ULTRA

FICHA TÉCNICA

CARBON ACTIVADO EN POLVO

Carbón activado en polvo, de origen vegetal, fabricado a partir de madera y activado químicamente bajo condiciones cuidadosamente controladas.

Por su alto grado de activación y excelente capacidad de adsorción, el carbón activado **CLARIMEX CAE ULTRA** puede usarse en un amplio rango de procesos de decoloración de diversos productos químicos y alimenticios.

Este producto es especialmente efectivo en la adsorción de impurezas orgánicas de alto peso molecular tales como proteínas y grandes moléculas precursoras de color.

PARÁMETRO	ESPECIFICACIONES	PROPIEDADES TÍPICAS
pH	2.8-5.5	
Humedad al empacar, %	12 máx.	
Decoloración de melazas	195 mín.	
Adsorción de azul de metileno, g AM/100 g	24 mín.	
Número de yodo, mg I ₂ / g	950 mín.	
Solubles en agua, %	4 máx.	
Cenizas, %		8
Densidad aparente, g/cc		0.20-0.25
GRANULOMETRIA DISPONIBLE		
Pasa malla 325, %	75 mín.	

EPT-45 P

R03 07-15

CLARIMEX, S.A. DE C.V.
TEL: (+52 55) 5390 8711 www.clarimex.com • ventasmx@clarimex.com • ventasexport@clarimex.com

CARBON ACTIVADO EN POLVO - CLARIMEX CAE ULTRA

Anexo 10

Comparación entre el carbón A-45% de mazorcas de maíz obtenido entre el carbón activado comercial CLARIMEX

Parámetros del carbón activado	Carbón activado A-45%	Carbón activado comercial CLARIMEX CAE ULTRA
Porcentaje de humedad	12,370%	12%
Contenido de cenizas totales	12,762%	8%
Densidad aparente	0,230 g/mL	0,25 g/mL
Tamaño de partícula	1,4 mm	---
Área BET	306,5 m ² /g	---

Anexo 11

Selección de valores de las variables de proceso para la obtención del carbón activado a partir de mazorcas de maíz amiláceo

Tabla 24

Selección de valores de las variables de proceso para la obtención del carbón activado a partir de mazorcas de maíz amiláceo

Temperatura	Tiempo	Concentración de H ₃ PO ₄
400°C	2 h	85%
500°C	1,5 h	45%

Se estandarizaron las variables de proceso (temperatura, tiempo de carbonización y concentración de agente activante) para poder obtener un buen carbón activado a partir de mazorcas de maíz amiláceo, capaz de remover colorantes sintéticos.

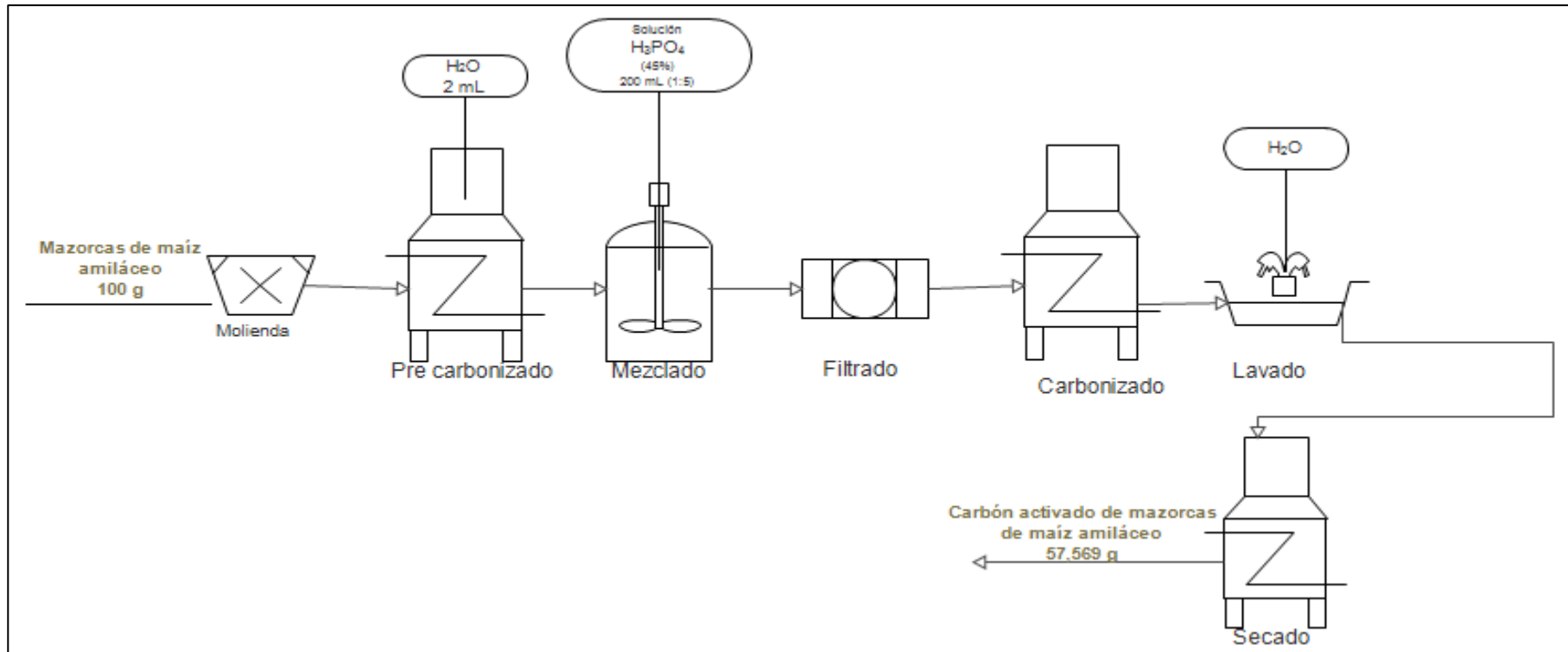
La selección fue realizada mediante una batería de experimentos en laboratorio, evitando obtener ceniza en lugar de carbón activado. Las condiciones de temperatura, tiempo y concentración de ácido fosfórico, mostradas en la tabla 24, mostraron ser favorables para la obtención de carbón activado, evitando obtener ceniza durante el proceso. Por tanto, fueron fijadas como niveles de las variables en estudio.

Anexo 12

Diagrama de Flujo para la producción de carbón activado a partir de mazorcas de maíz amiláceo

Figura 63

Diagrama de flujo para la producción de carbón activado



Se realizó un diagrama de flujo para la producción de carbón activado a partir de mazorcas de maíz, donde se utilizó 100 g de mazorcas de maíz amiláceo, obtenido un rendimiento de 57,569%. Para lo cual se utilizó 200 mL de ácido fosfórico al momento de la activación.

Anexo 13

Propuesta de producción de carbón activado A-45% a partir de mazorcas de maíz amiláceo para fines comerciales

Tabla 25

Costo estimado de producción para obtener 1000 g de carbón activado a partir de mazorcas de maíz

		Cantidad	Unidad	Precio por unidad (S/.)	Total (S/.)
Insumos	Mazorcas de maíz amiláceo	1754	g	0,0005	0,88
	H ₃ PO ₄	1754	mL	1,6x10 ⁻⁵	0,03
	Agua destilada	14	L	0,18	2,52
	Energía	15	Kw/h	0,85	12,75
Mano de obra		1 operario		17	17
Costo total de producción					33,2

Se presenta una pequeña propuesta de producción de carbón activado de mazorcas de maíz amiláceo para fines comerciales, donde el costo total de producción de 1000 g de carbón activado, elaborado en un día es de 33,2 soles.

Sabiendo que el costo actual de 200 g de carbón activado comercial CLARIMEX CAE ULTRA, es de 28 soles, el proceso que planteamos resulta ser rentable.

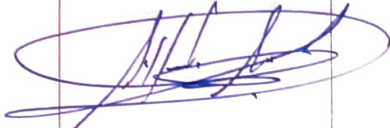
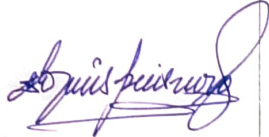

No se realizó un estudio de costos detallado, puesto que no ha sido el objetivo del presente trabajo de investigación.

Anexo 14
Matriz de consistencia

Matriz de Consistencia					
PROBLEMA	HIPÓTESIS	OBJETIVO	VARIABLES E INDICADORES	INSTRUMENTOS	METODOLOGÍA
<p>PROBLEMA PRINCIPAL: ¿El carbón activado obtenido mediante activación química a partir de mazorcas de maíz amiláceo, tendrá la capacidad de remover un colorante sintético?</p> <p>PROBLEMA SECUNDARIO: ¿Mediante la activación química con el reactivo ácido fosfórico, se podrá obtener carbón activado a partir de mazorcas de maíz amiláceo? ¿Se podrá caracterizar el carbón activado obtenido, mediante la determinación del área superficial por el método BET? ¿Se podrá caracterizar estructuralmente el carbón activado que presente mejor área superficial, empleando el método de difracción de rayos X? ¿Se podrá determinar la capacidad de adsorción del carbón activado obtenido para la remoción de un colorante sintético?</p>	<p>HIPÓTESIS GENERAL: Los carbones activados obtenidos por activación química a partir de mazorcas de maíz amiláceo, tienen la capacidad de remover un colorante sintético, debido a su área superficial y las interacciones físico químicas con las moléculas del colorante.</p> <p>HIPÓTESIS ESPECÍFICA: La activación química de la biomasa de mazorcas de maíz amiláceo con el reactivo de ácido fosfórico, permite la obtención de carbón activado con propiedades superficiales óptimas. Es posible caracterizar el carbón activado obtenido mediante la determinación del área superficial con el método BET. Es posible caracterizar estructuralmente el carbón activado de mayor área superficial empleando la difracción de rayos X. Es posible determinar la capacidad de adsorción del carbón activado obtenido en función de la remoción de un colorante sintético.</p>	<p>OBJETIVO GENERAL: Obtener carbón activado a partir de mazorcas de "maíz amiláceo" (<i>Zea mays L. ssp amiláceo</i>) mediante un activante químico, para dotarle la capacidad de remover un colorante sintético.</p> <p>OBJETIVOS SECUNDARIOS: Obtener carbón activado a partir de mazorcas de maíz amiláceo, mediante activación química con ácido fosfórico y determinar su rendimiento. Caracterizar el carbón activado obtenido, mediante la determinación del área superficial por el método BET. Caracterizar estructuralmente el carbón activado de mayor área superficial empleando difracción de rayos X. Determinar la capacidad de adsorción del carbón activado obtenido para la remoción de un colorante sintético.</p>	<p>VARIABLES INDEPENDIENTES: 1. Temperatura INDICADOR: Grados centígrados °C 2. Concentración INDICADOR: Mol sobre litro 3. Tiempo INDICADOR: Minutos, segundos, horas</p> <p>VARIABLES DEPENDIENTES 1. Área superficial INDICADOR: Área por gramo de carbón activado 2. Capacidad de adsorción INDICADOR: Cantidad de colorante adsorbido</p>	<p>Termómetro</p> <p>Volumetría</p> <p>Cronómetro</p> <p>Equipo BET de Fisisorción</p> <p>Espectrofotómetro UV-VIS</p>	<p>I. TIPO DE INVESTIGACIÓN Estudio experimental</p> <p>II. NIVEL DE INVESTIGACIÓN Aplicada</p> <p>III. DISEÑO EXPERIMENTAL Factorial 2³</p> <p>IV. POBLACIÓN Y MUESTRA Población: 20 kg de mazorcas de maíz. Muestra: 13 kg de mazorcas de maíz.</p> <p>V. ANÁLISIS ESTADÍSTICO Anova factorial al 95% de confianza, empleando el paquete estadístico de Minitab.</p>

ACTA DE CONFORMIDAD

Los que suscribimos, miembros de Jurado Designado para el Acto Público de Sustentación de Tesis cuyo Título es: "OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE MAZORCA DE "MAÍZ AMILÁCEO" (Zea mays L. ssp amiláceo) POR ACTIVACIÓN QUÍMICA, PARA LA REMOCIÓN DE UN COLORANTE SINTÉTICO". Presentado por la bachiller en Ingeniería Química Rosmery GODOY BAUTISTA, el cual fue expuesto el día 3 de marzo del 2023, en mérito a la Resolución Decanal N° 038-2023-UNSCH-FIQM/D, damos nuestra conformidad a la tesis mencionada y declaramos a la recurrente apta para que pueda iniciar las gestiones administrativas conducentes a la expedición y entrega de título profesional de Ingeniera Química.

MIEMBROS DEL JURADO	DNI	FIRMA
Dr. Alfredo Arias Jara	20259736	
Ing. Juan Luis Quispe Cisneros	28263538	
Mg. Aníbal Pablo García Bendezú	19831529	

Ayacucho, 17 de marzo del 2023

**UNSCH**FACULTAD DE INGENIERÍA
QUÍMICA Y
METALURGIA**ACTA DE SUSTENTACION DE LA TESIS PRESENCIAL****“OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE MAZORCA DE “MAIZ AMILACEO” (Zea mays L. sus amiláceo) POR ACTIVACIÓN QUÍMICA, PARA LA REMOCION DE UN COLORANTE SINTÉTICO”****Expositora: Rosmery GODOY BAUTISTA**
Bachiller en Ingeniería Química

Expediente N° 2280099

Resolución Decanal N° 038-2023-UNSCH-FIQM/D.

Fecha: 01-03-2023.

En la Sala de Conferencia “Pedro Villena Hidalgo” de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia, ubicada en la Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga (H-121), siendo las nueve de la mañana con cinco minutos del día jueves tres de marzo del año dos mil veintitrés, se reunieron la Bachiller en Ingeniería Química **Rosmery GODOY BAUTISTA**, los Docentes Miembros del Jurado de Sustentación Ingenieros: Dr. Alfredo ARIAS JARA, Ing. Juan Luis QUISPE CISNEROS y Mg. Aníbal Pablo GARCIA BENDEZU, bajo la Presidencia del Dr. Guido PALOMINO HERNANDEZ (Decano de la Facultad), Mg. Cipriano MENDOZA ROJAS (Docente Asesor de la Tesis), Dr. Alfredo PALOMINO INFANTE (Coasesor), el Mg. José Alberto CUEVA VARGAS (Secretario-Docente) y el público asistente;

Acto seguido, el Presidente del Jurado de Sustentación dispuso que el Secretario Docente dé lectura a los antecedentes tramitados para el presente Acto Público de Sustentación de la Tesis: **“OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE MAZORCA DE “MAIZ AMILACEO” (Zea mays L. sus amiláceo) POR ACTIVACIÓN QUÍMICA, PARA LA REMOCION DE UN COLORANTE SINTÉTICO”**, presentado por la Bachiller **Rosmery GODOY BAUTISTA**. A continuación, el Secretario-Docente procedió a dar lectura a la Resolución Decanal N° 038-2023-UNSCH-FIQM/D.

Luego, el Presidente del Jurado invitó a la Bachiller **Rosmery GODOY BAUTISTA**, a pasar al estrado y exponer su trabajo de Tesis en un tiempo máximo de treintaicinco minutos.

Finalizada la exposición de la Bachiller, el presidente invitó a los Señores Miembros del Jurado de Sustentación a que formulen sus preguntas y señalen sus observaciones, en el siguiente orden: Mg. Aníbal Pablo GARCIA BENDEZU, Ing. Juan Luis QUISPE CISNEROS y Dr. Alfredo ARIAS JARA. Luego el Presidente invitó al Dr. Guido PALOMINO HERNANDEZ para que, en su condición de Docente Asesor, se sirva levantar las observaciones del Jurado y efectuar las aclaraciones que considere conveniente.

A continuación, el presidente del jurado invito al sustentante y al público para que se sirva abandonar la sala de conferencia con la finalidad de permitir al jurado de sustentación deliberar sobre la evaluación a otorgar. Se alcanzó el siguiente resultado. **APROBADA POR UNANIMIDAD PROMEDIO DIECISEIS (16)**.



UNSCH

FACULTAD DE INGENIERIA
QUÍMICA Y
METALURGIA

ACTA DE SUSTENTACION DE LA TESIS PRESENCIAL

"OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE MAZORCA DE "MAIZ AMILACEO" (Zea mays L. sus amiláceo) POR ACTIVACIÓN QUÍMICA, PARA LA REMOCION DE UN COLORANTE SINTÉTICO"

Expositora: Rosmery GODOY BAUTISTA
Bachiller en Ingeniería Química

Expediente N° 2280099

Resolución Decanal N° 038-2023-UNSCH-FIQM/D.

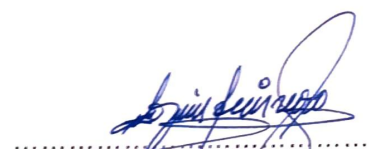
Fecha: 01-03-2023.


Finalmente, el Presidente del Jurado dispuso que se invite a la Sustentante y al público asistente a que se sirvan ingresar a la sala de conferencias y anunció que, la Bachiller **Rosmery GODOY BAUTISTA**, ha resultado **APROBADA POR UNANIMIDAD**, y por lo tanto a partir de la fecha la Universidad y la Facultad cuenta con una flamante **INGENIERA QUIMICA** y le augura éxitos en su desempeño profesional.

Siendo las diez de la mañana con cincuenta minutos se dio por finalizado este acto académico de Sustentación de Tesis. En fe de lo cual firmamos:


.....
Dr. Guido PALOMINO HERNANDEZ
Presidente


.....
Dr. Alfredo ARIAS JARA
Miembro


.....
Ing. Juan Luis QUISPE CISNEROS
Miembro


.....
Mg. Aníbal Pablo GARCIA BENDEZU
Miembro


.....
Mg. José Alberto CUEVA VARGAS
(Secretario Docente)



UNSCH

FACULTAD DE
INGENIERÍA QUÍMICA Y
METALURGIA

ESCUELA PROFESIONAL DE
INGENIERÍA QUÍMICA

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD N° 007-2023-UNSCH-FIQM/EPIQ

El que suscribe, Directora de la **Escuela Profesional de Ingeniería Química** de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, emite la siguiente:

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD

Que, habiendo recibido el requerimiento de Constancia de Originalidad por parte de la Bach. **Rosmery GODOY BAUTISTA**, se procedió a la evaluación y regularización de originalidad del archivo adjunto con el **TURNITIN - UNSCH**, de acuerdo a los criterios establecidos en el **Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación de la UNSCH**, aprobado con Resolución del Consejo Universitario N° 039-2021-UNSCH-CU; cuyos resultados son:

Tesis: Obtención de Carbón activado a partir de mazorca de "maíz amiláceo" (*Zea mays L. ssp amiláceo*) por activación química, para la remoción de un colorante sintético

Autor Bach.: Rosmery GODOY BAUTISTA

N° Trabajo : 2101547807

Fecha : 25 de mayo del 2023

Archivo : Tesis

Se expide la presente constancia de originalidad, con reporte del 14 (**catorce**) % de **ÍNDICE DE SIMILITUD** realizado con **Depósito de trabajos estándar**, a fin de proseguir con los trámites pertinentes; cabe señalar que, los documentos del procedimiento se archivan en el repositorio documental de la Escuela.

Ayacucho, 25 de mayo del 2023.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN
CRISTÓBAL DE HUAMANGA
E.P. INGENIERÍA QUÍMICA



DR. ALFREDO ARIAS JARA
DIRECTOR DE ESCUELA

Adjunto **Reporte de Índice de Similitud**
cc. archivo

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA
QUÍMICA Av. Independencia S/N –
Ayacucho Telf. 066-312510 Anexo. 152
Correo: ep.quimica@unsch.edu.pe



Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por **Turnitin**. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: Rosmery Godoy Bautista
Título del ejercicio: Constancia GODOY R
Título de la entrega: Obtención de carbón activado a partir de mazorca de "maíz ...
Nombre del archivo: GODOY_R_Carbon_Activado_Maiz.pdf
Tamaño del archivo: 1.27M
Total páginas: 79
Total de palabras: 18,086
Total de caracteres: 92,920
Fecha de entrega: 25-may.-2023 05:46a. m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega... 2101547807

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



TESIS

Obtención de carbón activado a partir de mazorca de "maíz
amiláceo" (*Zea mays L. ssp amiláceo*) por activación química, para
la remoción de un colorante sintético

PRESENTADO POR

Bach. Rosmery GODOY BAUTISTA

Para optar el título profesional de:

INGENIERA QUÍMICA

ASESOR: M.Sc. Cipriano Mendoza Rojas

COASESOR: Dr. Rubén Alfredo Palomino Infante

AYACUCHO-PERÚ

2022

Obtención de carbón activado a partir de mazorca de "maíz amiláceo" (*Zea mays* L. ssp amiláceo) por activación química, para la remoción de un colorante sintético

por Rosmery Godoy Bautista

Fecha de entrega: 25-may-2023 05:46a.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2101547807

Nombre del archivo: GODOY_R_Carbon_Activado_Maiz.pdf (1.27M)

Total de palabras: 18086

Total de caracteres: 92920

Obtención de carbón activado a partir de mazorca de "maíz amiláceo" (*Zea mays* L. ssp amiláceo) por activación química, para la remoción de un colorante sintético

INFORME DE ORIGINALIDAD

14%

INDICE DE SIMILITUD

16%

FUENTES DE INTERNET

9%

PUBLICACIONES

4%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	3%
2	repositorio.lamolina.edu.pe Fuente de Internet	2%
3	repositorio.unal.edu.co Fuente de Internet	1%
4	repositorio.unsch.edu.pe Fuente de Internet	1%
5	tesis.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	1%
6	repositorio.unj.edu.pe Fuente de Internet	1%
7	Submitted to Universidad Nacional del Centro del Peru Trabajo del estudiante	1%
8	bdigital.uncu.edu.ar Fuente de Internet	<1%

9	ri.uaemex.mx Fuente de Internet	<1 %
10	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga Trabajo del estudiante	<1 %
11	apptransparencia.unsch.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
12	1library.co Fuente de Internet	<1 %
13	dspace.esPOCH.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
14	studylib.es Fuente de Internet	<1 %
15	Carmona González José Antonio. "Eliminación del azul de metileno con escorias metalúrgicas provenientes de la producción de hierro y acero", TESIUNAM, 2019 Publicación	<1 %
16	www.scielo.org.co Fuente de Internet	<1 %
17	Submitted to Universidad San Francisco de Quito Trabajo del estudiante	<1 %
18	sedici.unlp.edu.ar Fuente de Internet	<1 %

19

dokumen.pub

Fuente de Internet

<1 %

20

es.scribd.com

Fuente de Internet

<1 %

21

biblioteca.uniatlantico.edu.co

Fuente de Internet

<1 %

22

Grey Castellar-Ortega, Evert De Jesus
Mendoza Colina, Edgardo Ramon Angulo
Mercado, Javier Enrique Jaramillo Colpas et al.
"Equilibrio, cinética y termodinámica de la
adsorción del colorante DB-86 sobre carbón
activado de la cáscara de yuca", Revista MVZ
Córdoba, 2019

Publicación

<1 %

23

Rocha Lay Daniel Raymundo. "Remoción de
materia orgánica natural del agua de la presa
madín mediante procesos fisicoquímicos",
TESIUNAM, 2011

Publicación

<1 %

24

Submitted to Universidad Centroamericana
Jose Simeon Canas

Trabajo del estudiante

<1 %

25

repositorio.ucv.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

26

Submitted to Universidad Andina Nestor
Caceres Velasquez

Trabajo del estudiante

<1 %

27 Submitted to Universidad Cesar Vallejo <1 %
Trabajo del estudiante

28 Pulido Perez Ricardo. "Evaluacion de la aplicacion de carbon activado generado a partir de fondos de barril mexicanos en la desulfuracion de gases de combustion", TESIUNAM, 2005 <1 %
Publicación

29 Arreguin Juarez Elizabeth, Hernandez López Felipe. "Produccion de carbones activados a partir de materiales economicos y su aplicacion para la remocion de fenol y azul de metileno contenidos en agua", TESIUNAM, 2002 <1 %
Publicación

30 Uribe Gomez Ernesto. "Uso del lirio acuatico (Eichhornia crassipes (Mart.) Solms-Laubaeh) como carbon activado en un filtro de agua tipo domestico", TESIUNAM, 1995 <1 %
Publicación

31 repositorio.untumbes.edu.pe <1 %
Fuente de Internet
