

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO**

**FACULTAD DE INGENIERIA DE PROCESOS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA QUIMICA**



**TESIS**

**ADSORCION DE CLORO RESIDUAL DEL AGUA POTABLE  
CON CARBON ACTIVADO OBTENIDO A PARTIR DE LA  
MADERA DE EUCALIPTO (GLOBULUS LABILL)**

**PRESENTADO POR:**

**Br. MARCO WILLIAM PUMA CASTILLA**

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL  
DE INGENIERO QUIMICO**

**ASESORA:**

**DRA. MERY LUZ MASCO ARRIOLA**

**CUSCO – PERÚ**

**2024**

## INFORME DE ORIGINALIDAD

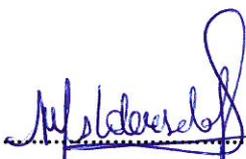
La que suscribe, ha sometido al sistema Turnitin, la tesis titulada “**ADSORCION DE CLORO RESIDUAL DEL AGUA POTABLE CON CARBON ACTIVADO OBTENIDO A PARTIR DE LA MADERA DE EUCALIPTO (GLOBULUS LABILL)**”, presentado por MARCO WILLIAM PUMA CASTILLA, con DNI 72625641, para optar al Título Profesional de Ingeniero Químico, informo, que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 01 vez, mediante el software antiplagio, conforme al Artículo 6° del presente reglamento y de la evaluación de originalidad se tiene un **porcentaje de 8 %**.

### Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación tesis (Art. 7, inc 2 y 3)

Porcentaje	Evaluación y acciones.	Marque con una X
Del 1 al 10 %	No se considera plagio.	<b>X</b>
Del 11 al 30%	Devolver al usuario para las correcciones.	
Mayores a 31 %	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las	

Por tanto, en condición de Directora de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de Procesos, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto la primera hoja del reporte del software antiplagio.

Cusco, 11 de noviembre de 2024



.....  
Dra. Ing. Amanda Rosa MALDONADO FARFAN

DNI: 23822559

ORCID: 0000-0002-4870-7078

#### Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio:  
<https://unsaac.turnitin.com/viewer/submissions/oid:27259:404508969?locale=es-MX>

NOMBRE DEL TRABAJO

**ADSORCION DE CLORO RESIDUAL DEL A  
GUA POTABLE CON CARBON ACTIVADO  
OBTENIDO A PARTIR DE LA MADERA DE  
E**

AUTOR

**MARCO WILLIAM PUMA CASTILLA**

RECUENTO DE PALABRAS

**27194 Words**

RECUENTO DE CARACTERES

**133483 Characters**

RECUENTO DE PÁGINAS

**122 Pages**

TAMAÑO DEL ARCHIVO

**2.9MB**

FECHA DE ENTREGA

**Nov 11, 2024 10:37 PM GMT-5**

FECHA DEL INFORME

**Nov 11, 2024 10:38 PM GMT-5****● 8% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 7% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 4% Base de datos de trabajos entregados
- 1% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

**● Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 20 palabras)

## **DEDICATORIA**

Esta tesis es el resultado de un viaje intelectual lleno de desafíos y aprendizajes.

Quiero dedicar este logro primeramente a DIOS, por brindarme sabiduría, fortaleza, salud y la oportunidad de culminar mi carrera.

A mis padres Victor Jeronimo Puma Lavilla y Yony Castilla Becerra, por haber estado siempre a mi lado brindándome su apoyo, su amor incondicional y paciencia infinita.

A mis hermanos Diego Fernando Puma Castilla y Daisy Fabiola Puma Castilla, quienes han sido mi fuente inagotable de apoyo, motivación a lo largo de esta travesía académica.

A mis amigos, por sus ánimos y momentos de distracción que mantuvieron mi cordura.

A mis profesores y mentores, por su guía sabia y orientación constante.

Esta tesis no solo representa mi esfuerzo, sino también el respaldo de todos ustedes. Gracias por creer en mí y por ser parte fundamental de este logro. Con cariño y gratitud.

**ATTE: MARCO WILLIAM PUMA CASTILLA**

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la culminación de mi tesis. Este logro no habría sido posible sin el apoyo, la orientación y el aliento de muchos individuos excepcionales.

Agradezco a mi familia en especial a mi tío RIDO DURAND BLANCO por su constante respaldo emocional, comprensión y amor incondicional a lo largo de este arduo proceso. Gracias por estar siempre allí para mí.

A mis amigos, quienes fueron un faro de luz en los momentos más oscuros de mi investigación. Su amistad y distracción ocasional fueron un bálsamo para el estrés.

A mi asesora la Ingeniero MERY LUZ MASCO ARRIOLA, quien compartió su experiencia y conocimientos, guiándome en cada paso de mi investigación. Su compromiso con mi crecimiento académico ha sido invaluable.

También a quiero agradecer a mis profesores el Dr. BALTAZAR NICOLAS CACERES HUAMBO y el Mgt. FIDEL GAMARRA SOTO por la guía, mejora y recomendaciones que compartieron para poder culminar esta tesis.

Finalmente, agradezco a mí mismo por la dedicación y perseverancia que puse en este proyecto. Este logro es un testimonio de mi compromiso con el aprendizaje y el crecimiento personal.

A todos ustedes, mi más profundo agradecimiento. Sin su apoyo, esta tesis no sería una realidad.

Con gratitud, **MARCO WILLIAM PUMA CASTILLA**

## **PRESENTACIÓN**

Señor DECANO de la facultad de INGENIERIA DE PROCESOS de la UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO, distinguidos miembros del jurado y respetada audiencia. Es un honor y un privilegio estar hoy aquí en cumplimiento a lo dispuesto por el reglamento de Grados y Títulos de la Facultad de Ingeniería de Procesos de la Escuela Profesional de Ingeniería Química para presentarles mi tesis titulada “ADSORCION DE CLORO RESIDUAL DE AGUA POTABLE CON CARBON ACTIVADO OBTENIDO A PARTIR DE LA MADERA DE EUCALIPTO (GLOBULUS LABILL)”.

A lo largo de todo este tiempo de investigación y esfuerzo incansable, he explorado si se podrá realizar el proceso de adsorción de cloro residual del agua potable de la red de Santa Ana del Cusco utilizando carbón activado a partir de la madera de eucalipto. Esta tesis representa un importante paso en mi trayectoria académica y estoy emocionado de compartir los resultados de mi trabajo con todos ustedes.

## CONTENIDO

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
PRESENTACIÓN .....	iv
LISTA DE TABLAS .....	x
LISTA DE FIGURAS .....	xii
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT .....	xv
KEY WORDS: .....	xv
INTRODUCCIÓN.....	xvi
CAPITULO I.....	1
I.    PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	1
1.    Situación problemática.....	1
2.    Formulación del problema .....	1
a. Problema general .....	1
b. Problemas específicos.....	1
3.    Justificación de la investigación .....	2
4.    Objetivos de la investigación .....	3
a. Objetivo general.....	3
b. Objetivos específicos .....	3
CAPITULO II.....	1
II.    MARCO TEÓRICO.....	1
1.    Bases teóricas.....	1
2.    Marco conceptual.....	2
2.1. Adsorción .....	2
2.1.1. Tipos de adsorción .....	2
2.1.2. Adsorción como proceso de sorción.....	4
2.1.3. Aplicaciones de la adsorción .....	4

2.1.4.	Pasos del Proceso de Adsorción .....	5
2.2.	Tipos de Adsorbentes .....	5
2.3.	Equipos de adsorción .....	7
2.4.	Isotermas de Adsorción.....	9
2.4.1.	Isoterma de Freundlich .....	10
2.4.2.	Isoterma de Langmuir.....	11
2.4.3.	Isoterma de adsorción Lineal.....	12
2.5.	Cinética de adsorción .....	12
2.5.1.	Modelo de pseudo primer orden .....	12
2.5.2.	Modelo de pseudo segundo orden .....	13
2.6.	Carbón .....	13
2.7.	Carbón Activo .....	14
2.7.1.	Propiedades del carbón Activo .....	15
2.7.2.	Características físico-químicas .....	16
2.7.3.	Especificaciones de calidad del carbón activo.....	16
2.8.	Eucalipto .....	22
2.9.	Agua de consumo humano .....	23
2.10.	Cloro <sub>2</sub>	
2.10.1.	Cloro residual.....	26
2.10.2.	Química del cloro.....	27
2.10.3.	Propiedades físicas.....	29
2.10.4.	Propiedades químicas .....	30
2.10.5.	Efectos del cloro sobre el medio ambiente .....	31
2.10.6.	Efectos del cloro sobre la salud .....	32
2.11.	Diseño experimental factorial .....	35
2.11.1.	Diseño experimental factorial 3 <sup>3</sup> .....	35
2.12.	Normas ASTM .....	37
3.	Antecedentes de la investigación .....	38

3.1. Internacionales .....	38
3.2. Nacionales .....	39
3.3. Locales .....	40
CAPITULO III .....	41
III.    HIPOTESIS Y VARIABLES .....	41
1.    Hipótesis .....	41
a.    Hipótesis general .....	41
d.    Hipótesis específica.....	41
2.    Identificación de variables e indicadores .....	42
2.1. Variables independientes .....	42
2.2. Variables dependientes.....	42
CAPITULO IV .....	43
IV.    MATERIALES Y MÉTODOS .....	43
1.    Ámbito de estudio .....	43
2.    Lugar de ejecución .....	43
3.    Tipo y nivel de investigación .....	43
3.1. Tipo de Investigación .....	43
3.2. Nivel de Investigación.....	43
3.2.1. Nivel explicativo .....	43
4.    Unidad de análisis .....	43
5.    Técnicas de selección de muestra .....	43
6.    Muestra .....	44
7.    Materiales, reactivos y equipos .....	44
8.1. Materiales .....	44
8.2. Reactivos .....	44
8.3. Instrumentos de medición .....	45
8.4. Equipos.....	45
8.    Diseño experimental .....	45

9.1. Caracterización de la muestra (madera de eucalipto).....	45
9.1.1. Determinación de humedad .....	45
9.1.2. Determinación de materia volátil.....	46
9.1.3. Determinación de cenizas .....	46
9.1.4. Determinación de carbón fijo .....	46
9.2. Preparación del carbón activado .....	48
9.2.1. Selección de la materia prima.....	48
9.2.2. Aserrado.....	48
9.2.3. Tamizado .....	48
9.2.4. Carbonización .....	49
9.2.5. Impregnación y activación.....	49
9.2.6. Molienda .....	49
9.2.7. Lavado y secado.....	49
9.3. Caracterización del carbón activado .....	51
9.3.1. Porcentaje de humedad .....	51
9.3.2. Porcentaje de ceniza.....	51
9.3.3. Densidad aparente .....	51
9.3.4. Densidad real .....	51
9.3.5. Porcentaje de porosidad .....	52
9.3.6. pH.....	52
9. Técnicas de recolección de información.....	53
9.1. Obtención de carbón activado.....	53
9.2. Impregnación del carbón activado con la sustancia activante .....	53
10. Diseño experimental .....	53
10.1. Ensayo de adsorción de cloro.....	55
10.1.1. Determinación de los parámetros del agua potable con cloro residual más influyentes en la adsorción .....	55
10.1.2. Ensayo de cinética de adsorción .....	56

10.2. Determinación de la isoterma de adsorción .....	57
11. Técnicas de análisis e interpretación de la información .....	58
12. Técnicas para demostrar la verdad o falsedad de las hipótesis planteadas ....	58
CAPITULO V .....	59
V.    RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	59
1. Determinación de la concentración de cloro residual del agua potable de la red de Santa Ana del Cusco .....	59
2. Caracterización de la muestra (Madera de eucalipto).....	59
3. Caracterización del carbón activado obtenido .....	60
4. Ensayos de adsorción con el carbón activado generado a partir de la madera de Eucalipto .....	61
4.1. Primera réplica de ensayo de adsorción .....	62
4.2. Segunda réplica de ensayo de adsorción .....	64
5. Cinética de Adsorción.....	71
5.1. Dosis de partida inicial del adsorbente.....	71
6. Isotermas de adsorción a partir de los datos experimentales .....	86
CONCLUSIONES.....	98
RECOMENDACIONES .....	99
BIBLIOGRAFÍA .....	100
APENDICE .....	104
ANEXOS .....	114

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Propiedades del Carbón Activo .....	15
Tabla 2: Composición química del carbón activado .....	16
Tabla 3: Tamaño de los poros.....	16
Tabla 4: Características del Eucalipto ( <i>Globulus labill</i> ) .....	23
Tabla 5: Dosificación del agua en el planeta.....	24
Tabla 6: Características básicas de calidad que deben ser mantenidas en las corrientes de agua superficiales cuando sean destinadas a la producción de agua potable. ....	25
Tabla 7. Propiedades físicas del cloro .....	29
Tabla 8. Matriz de diseño experimental .....	36
Tabla 9. Parámetros del carbón activado granular y sus normas de análisis.....	37
Tabla 10. Cuadro de resumen en el proceso de lavado y secado.....	50
Tabla 11: Número de réplicas de cada muestra por diferente condición.....	54
Tabla 12. Matriz para la elaboración de los modelos de la cinética de adsorción.....	56
Tabla 13: Matriz para la elaboración de las isotermas de adsorción .....	57
Tabla 14. Resultados de la concentración de cloro residual en el agua potable.....	59
Tabla 15. Resultados de la caracterización de la muestra de aserrín de madera de eucalipto) .....	59
Tabla 16. Resultados de la caracterización del carbón activado .....	60
Tabla 17. Resultados de la primera réplica de adsorción de cloro con carbón activado a partir de la madera de eucalipto.....	62
Tabla 18. Resultados de la segunda réplica de adsorción de cloro con carbón activado a partir de la madera de eucalipto.....	64
Tabla 19. Resultados de la cinética de adsorción de cloro con la muestra más eficiente de carbón activado.....	71
Tabla 20. Resultados de la cinética de adsorción de pseudo primer orden .....	73
Tabla 21. Análisis de varianza.....	73
Tabla 22. Coeficientes .....	74
Tabla 23. Resumen del modelo de regresión de pseudo primer orden.....	75
Tabla 24. Resultados de la cinética de adsorción de pseudo segundo orden .....	79
Tabla 25. Análisis de varianza.....	80
Tabla 26. Coeficientes de regresión lineal.....	80
Tabla 27. Resumen del modelo de regresión de pseudo segundo orden .....	82

Tabla 28. Resultados de la matriz isoterma de adsorción.....	86
Tabla 29. Resultados de la matriz Isoterma de Freundlich.....	87
Tabla 30. Coeficientes con respecto a la regresión de $\ln(C_f)$ y $\ln(q_t)$ .....	87
Tabla 31. Resultados de la constante de Freundlich “W” .....	88
Tabla 32. Análisis de varianza para los datos de W (Freundlich) .....	88
Tabla 33. Resumen del modelo de regresión de la isoterma de Freundlich .....	89
Tabla 34. Resultados de la matriz Isoterma de Langmuir .....	91
Tabla 35. Coeficientes con respecto a la regresión de $\ln(C_f)$ y $\ln(q_t)$ .....	91
Tabla 36. Resultados de la constante de Langmuir “W” .....	92
Tabla 37. Análisis de varianza para los datos de W (Langmuir).....	92
Tabla 38. Resumen del modelo de regresión de la isoterma de Langmuir.....	93
Tabla 39. Resultados de la matriz para la isoterma de adsorción Lineal.....	95
Tabla 40. Resultados de la constante de isoterma de adsorción lineal “W” .....	95
Tabla 41. Análisis de varianza para los datos de W (Isoterma de adsorción Lineal) .....	96
Tabla 42. Resumen del modelo de regresión de la isoterma de Langmuir.....	96

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Arcillas con propiedades de adsorción de sustancias.....	3
Figura 2. Diferentes equipos de adsorción .....	8
Figura 3. Tipos generales de isothermas de adsorción de solutos .....	10
Figura 4. Combinación de la estructura del carbón activo .....	14
Figura 5. Clasificación del carbón activo respecto al tamaño de grano .....	15
Figura 6. Distribución del ácido hipocloroso y ácido clorhídrico en función al pH fracción de cloro libre.....	28
Figura 7. Información para el almacenamiento del cloro.....	30
Figura 8. Diagrama de flujo de la preparación del carbón activado.....	47
Figura 9. Gráfica del valor individual de la concentración final de cada muestra .....	66
Figura 10. Datos obtenidos de análisis de varianza usando el programa MINITAB ....	67
Figura 11. Gráfica de interacción por la concentración final de cloro en el agua con medias ajustadas con respecto a las variables .....	69
Figura 12. Gráfico de los efectos principales por las variables en la concentración final de cloro con medias ajustadas. ....	70
Figura 13. Curva cinética del proceso de adsorción del cloro con la muestra más eficiente de carbón activado.....	72
Figura 14. Correlación de los datos experimentales con el modelo de pseudo primer orden.....	78
Figura 15. Correlación de los datos experimentales con el modelo de pseudo segundo orden.....	85
Figura 16. Isotherma de Freundlich.....	90
Figura 17. Isotherma de Langmuir .....	94
Figura 18. Isotherma de adsorción Lineal .....	97
Figura 19. Reactor en donde se carbonizará el aserrín de madera de eucalipto.....	104
Figura 20. Horno en donde se llevará a carbonizar el aserrín de eucalipto a 3 diferentes temperaturas.....	104
Figura 21. Verificación de la temperatura de carbonización en el horno.....	105
Figura 22. Muestras de carbón de madera de eucalipto a diferente temperatura .....	105
Figura 23. Molienda manual del carbón de madera de eucalipto.....	106
Figura 24. Muestra de Carbón de madera de eucalipto molido.....	106
Figura 25. Ácido fosfórico al 85% utilizado para la activación .....	107

Figura 26. Activación de las muestras de carbón de madera de eucalipto .....	107
Figura 27. Agua destilada empleada para lavar el carbón activado y sacar la acides hasta llegar a un pH neutro .....	108
Figura 28. Lavado de cada muestra de carbon activado a partir de la madera de eucalipto. ....	108
Figura 29. Muestras de carbón activado en pH neutro después del lavado.....	109
Figura 30. Secado de las muestras de carbon activado luego del lavado para llevarlos a un pH neutro .....	109
Figura 31. Total, de muestras obtenidas a diferentes temperaturas de carbonización, concentración de sustancia activante y tiempo de activación.....	110
Figura 32. Pesado de cada muestra de carbón activado de madera de eucalipto luego del secado en el horno .....	110
Figura 33. Medición de cloro residual de la muestra para cada una de la muestra y realizar el proceso de adsorción.....	111
Figura 34. Medición de cloro residual usando el método de colorimetría para obtener los datos de cloro residual en el agua potable .....	111
Figura 35. Proceso de adsorción del cloro residual utilizando el carbón activado a partir de la madera de eucalipto .....	112
Figura 36. Uso de cada muestra de carbón activado para cada muestra de agua con cloro residual .....	112
Figura 37. Muestras después del uso de carbón activado comparadas a partir de la colorimetría después del añadido del DPD .....	113

## **RESUMEN**

En el presente trabajo, se llevó a cabo un estudio sobre el proceso de adsorción del cloro residual en el agua potable. Para este propósito, se empleó carbón activado obtenido a partir de la madera de eucalipto. El objetivo principal de esta investigación consistió en evaluar la capacidad de adsorción del carbón activado de eucalipto para eliminar el cloro residual presente en el suministro de agua potable.

A través de un análisis detallado y una recopilación exhaustiva de datos, se exploró y encontró la concentración de cloro residual presente en la red de agua potable, se determinó la capacidad de adsorción del carbón activado obtenido a partir de diferentes condiciones de temperatura de carbonización de la madera de eucalipto, concentración de la sustancia activante, el tiempo de impregnación entre la sustancia activante (ácido fosfórico –  $H_3PO_4$ ) y el carbón de madera de eucalipto. De acuerdo con los datos que se obtuvieron se evaluó el carbón más eficiente en el proceso de adsorción obtenido a diferentes condiciones y se logró modelar las isotermas de adsorción física de cloro de la muestra de carbón activado elegida para encontrar cuál de ellas se ajusta mejor a los datos experimentales.

Los resultados obtenidos revelan que el carbón activado generado a partir de la madera de eucalipto puede adsorber el 0.6 mg/l de cloro residual presente en el agua, siendo la muestra más eficiente la cual presenta una impregnación de 0.5 g/ml de ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ), obteniéndose a partir de 700°C de carbonización, con a un tiempo de impregnación de 90 minutos y de acuerdo con los ensayos de adsorción de esta muestra se pudo ajustar de mejor manera la isoterma de Freundlich.

**PALABRAS CLAVE:** Adsorción, Isotermas de Adsorción, Cloro Residual, Agua Potable, Activante.

## **ABSTRACT**

In the present work, a study was carried out on the adsorption process of residual chlorine in drinking water. For this purpose, activated carbon obtained from eucalyptus wood was used. The main objective of this research was to evaluate the adsorption capacity of eucalyptus activated carbon to eliminate residual chlorine present in the drinking water supply.

Through a detailed analysis and exhaustive data collection, the concentration of residual chlorine present in the drinking water network was explored and found, the adsorption capacity of activated carbon obtained from different carbonization temperature conditions of eucalyptus wood, concentration of the activating substance, the impregnation time between the activating substance (phosphoric acid –  $H_3PO_4$ ) and the eucalyptus wood charcoal. According to the data obtained, the most efficient carbon in the adsorption process obtained at different conditions was evaluated and it was possible to model the physical chlorine adsorption isotherms of the chosen activated carbon sample to find which of them best fits the the experimental data.

The results obtained reveal that the activated carbon generated from eucalyptus wood can adsorb 0.6 mg/l of residual chlorine present in the water, the most efficient sample being the one that presents an impregnation of 0.5 g/ml of phosphoric acid ( $H_3PO_4$ ), obtained from 700°C carbonization, with an impregnation time of 90 minutes and according to the adsorption tests of this sample, the Freundlich isotherm could be better adjusted.

**KEY WORDS:** Adsorption, Adsorption Isotherms, Residual Chlorine, Drinking Water, Activator.

## INTRODUCCIÓN

Actualmente el cloro llega a ser el agente desinfectante más utilizado en el agua de abastecimiento para el consumo humano. Lo que comúnmente se denomina cloro se mide como la presencia de cloro residual (concentración de cloro sin reaccionar) en el agua. Se utiliza para la eliminación de la contaminación bacteriológica y actúa destruyendo la materia orgánica por oxidación. La presencia permanente de cloro libre controla de manera indirecta que no haya contaminación bacteriológica en el agua. En la ciudad de Cusco de acuerdo al Art. 66° (Control de desinfectante) del Reglamento de la Calidad de Agua para Consumo Humano establecido por el Ministerio de Salud del Perú el contenido mínimo de cloro con lo que trabaja EPS SEDACUSCO es de 0.6 ppm (partes por millón), pero si estos parámetros logran sobrepasar los límites de lo establecido se tendría un exceso de cloro que llega a ser un problema para la salud (problemas en las vías respiratorias) y la industria (efectos corrosivos altos), el cual utiliza agua como materia prima o secundaria, por ello lo más recomendable sería adsorber ese cloro residual.

Existen varias técnicas para la obtención de agua con calidad apta para el uso en varios procesos, es por ello por lo que en la actualidad se llevó la implementación de estas técnicas para la eliminación de sustancias contaminantes no polares en el agua, y ante esta problemática surgió una etapa de purificación de filtración por medio de la adsorción superficial utilizando carbón activo fino y granular.

El proceso de adsorción es óptimo, ya que separa sustancias que son solubles en el agua como en el caso de los cloruros presentes. La adsorción de cloruros sobre carbones activados depende de las características físicas del sólido como área superficial y la porosidad de la superficie química.

El carbón activado puede obtenerse de diferentes materias primas ricas en carbono, básicamente provenientes de fuentes renovables (inagotables o se renuevan naturalmente) como los materiales lignocelulosicos y desechos agrícolas. En este caso se busca materiales económicos existentes en nuestra región para reducir costos, como el eucalipto. Para la activación del material se usan dos métodos: activación química y activación térmica.

El presente estudio tiene por objetivo adsorber el cloro residual del agua a partir del carbón activado de la madera de eucalipto que se obtendrá por el método de activación química.

# CAPITULO I

## I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1. Situación problemática

Se sabe que el cloro es un elemento muy reactivo combinándose de forma directa con muchos otros elementos y es utilizado como desinfectante del agua potable ya sea inyectando en forma gaseosa o por medio de hipoclorito de sodio-calcio como soluto en el agua. Al estar en contacto el hipoclorito de sodio con el agua se forma el inestable ácido hipocloroso (HClO) y el ácido clorhídrico (HCl). Cuando se descompone el ácido hipocloroso, se generan radicales libres de oxígeno, los cuales constituyen un potencial de efectos corrosivos más altos los cuales constituyen un problema en la industria. “Para sistemas de distribución de agua, se sugiere mantener una concentración de cloro residual libre de entre 0.2 a 0.5 mg/L para asegurar que se mantenga una desinfección adecuada a lo largo del sistema de distribución” (World Health Organization, 2022).

En cuanto a la salud humana el cloro en el ácido clorhídrico y ácido hipocloroso son problemas en las vías respiratorias debido a su reacción con agua provoca flemas que en algunos casos pueden contener sangre, sensación de sofoco, mareo, ansiedad, náusea y vómito, esto acompañado de dolor o punzadas en el pecho. Se puede presentar edema pulmonar o neumonía dependiendo el individuo, y si es que se ingesta el ácido clorhídrico se desprende el cloro que a nivel estomacal produce lesiones corrosivas estomacales severas (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia, 2003).

### 2. Formulación del problema

#### a. Problema general

¿Se podrá realizar el proceso de adsorción de cloro residual del agua potable con carbón activado a partir de la madera de eucalipto?

#### b. Problemas específicos

- ¿Cuál es la concentración de cloro residual presente en la red de agua potable del Cusco?

- ¿Cuáles son los parámetros físicos (tiempo y temperatura) y parámetros químicos (concentración de ácido fosfórico) más eficaces para la obtención de carbón activado a partir de la madera de eucalipto?
- ¿Cuál de las muestras afectadas por las diferentes variables utilizadas en la obtención de carbón activo tiene mejor eficiencia de adsorción?
- ¿Cuáles es la isoterma de adsorción física que más se ajusta a los datos experimentales en la adsorción de cloro?

### **3. Justificación de la investigación**

El objetivo del proyecto es producir carbón activado a partir de madera de eucalipto con el propósito de eliminar el exceso de cloro tras la desinfección del agua, garantizando la seguridad para el consumo humano al evitar concentraciones perjudiciales. Además de salvaguardar la salud pública, este proceso mejora el sabor y olor del agua, protege el medio ambiente al reducir la descarga de cloro residual y preserva las infraestructuras de plomería al minimizar la corrosión. La obtención del carbón activado se realizará mediante el método de activación química, utilizando ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ) como agente activante, aplicado a temperaturas entre 450 y 900°C. Posteriormente, se ajustarán variables como el tiempo de impregnación, las concentraciones de carbón y ácido, según las temperaturas indicadas.

La activación química debe ser viable para la eliminación del cloro presente en el agua potable de la ciudad de Cusco, ya que los niveles residuales de cloro, según las mediciones realizadas con DPD (Dietil Paranfenileno Diamina), son notablemente elevados. Por esta razón, se está implementando un método que haya demostrado ser efectivo. En este caso, se utiliza carbón activado producido a partir de materia prima disponible en nuestra región, específicamente, a partir de la madera de eucalipto. El proceso de activación implica la modificación de variables y la posterior separación del material mediante el método de adsorción. El objetivo es identificar qué producto resultante de estas variaciones ofrece una mayor eficiencia en el proceso de adsorción que será utilizado.

#### **4. Objetivos de la investigación**

##### **a. Objetivo general**

Adsorber el cloro residual del agua potable de la ciudad del Cusco con carbón activado obtenido a partir de la madera de eucalipto.

##### **b. Objetivos específicos**

- Corroborar la concentración de cloro residual en la red de suministro de agua potable, en la ciudad de Cusco.
- Obtener carbón activado a partir de la madera de Eucalipto a diferentes condiciones de temperatura, concentración del activante y el tiempo de impregnación
- Evaluar el carbón activo más eficiente en el proceso de adsorción obtenido por las diferentes condiciones.
- Obtener la isoterma de adsorción física que más se ajusta a los datos experimentales de la adsorción de cloro.

## CAPITULO II

### II. MARCO TEÓRICO

#### 1. Bases teóricas

##### **Según Chi Tien (2019) en su libro “Introduction to adsorption”**

Brinda la información acerca de la adsorción, como operación realizada entre el adsorbato y el adsorbente; también nos da a conocer el rendimiento que produce, que beneficios se obtiene y en que equilibrio se encuentran las sustancias debido a esta operación. Esta fuente también nos ayuda a conocer el principio básico de la adsorción y como se realiza el intercambio de estas sustancias.

También brinda información de cuáles son los procedimientos adecuados para la adsorción, en qué forma se pueden realizar, menciona todas las funciones que puede realizar con respecto del adsorbente al adsorbato y muestra todos los materiales capaces de realizar la adsorción (Tien, 2019).

##### **Según el programa Máster en Ingeniería del agua de la Universidad de Sevilla (2011) en el “Manual del Carbón Activado”**

Trata de las propiedades, características, importancia que tiene el carbón activado; también se logra analizar y escoger el método más conveniente para la activación de la materia prima con las propiedades necesarias. Se puede conocer paso a paso la activación, las sustancias adecuadas como también el medio adecuado para poder activar el carbón obtenido de nuestra materia elegida.

Teniendo ya el carbón activo el manual brinda la información sobre la descripción, capacidad y factores que pueden influir en la adsorción con nuestro adsorbente que se obtuvo. También con los resultados podremos describir el proceso adsorción que realizamos (E.U. Politécnica, 2011).

##### **El Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia (2003) según las “Guías para manejo seguro y gestión ambiental de 25 sustancias químicas”**

Brinda toda la información acerca de la sustancia que actuara como adsorbato de nuestra operación de adsorción que es el cloro; como las propiedades, características y las reacciones en las que puede estar involucrado como sustancia.

También da a conocer las consecuencias y problemas que nos puede presentar al utilizarlo para cualquier tipo de proceso, la cual más resalta los problemas a la salud de las personas si es que se llega a ingerir en gran cantidad cuando esta disuelto en el agua ya que dentro del organismo de un ser vivo se produce reacciones que pueden perjudicar. También nos informan los problemas que puede ocurrir en la industria cuando se utiliza cualquier sustancia (en especial el agua) con cloro disuelta en ella (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia, 2003).

**Según Bermúdez, Touza y Sanz (2004) en el “Manual de la madera de eucalipto blanco”**

Aborda aspectos como la porosidad de la madera, la estructura celular, o incluso propiedades químicas específicas que influye en la capacidad de adsorción del carbón activado. Una comprensión más profunda de las características de la madera de eucalipto blanco contribuye a optimizar el proceso de producción de carbón activado para la adsorción eficiente de cloro residual en aplicaciones de tratamiento de agua (Bermúdez et al., 2004).

## **2. Marco conceptual**

### **2.1. Adsorción**

La adsorción es la operación donde se logra aprovechar la capacidad de ciertos sólidos en la cual se puede concentrar sustancias específicas de soluciones (gaseosas o líquidas) en sus superficies. Es por ello que al poner los fluidos en contacto con tales sólidos se logra el objetivo deseado que es la separación o purificación del fluido. El grado de adsorción de una situación dada se alcanza una vez que se establece el equilibrio entre el adsorbente y su solución de contacto. En plena práctica, el rendimiento de la adsorción es fuertemente influenciada por la transferencia de masa de las especies entre la solución, el de superficies adsorbentes y la velocidad de reacción de adsorción, en otras palabras, la adsorción es, por lo tanto, un proceso de equilibrio-reacción (Tien, 2019).

#### **2.1.1. Tipos de adsorción**

Existen dos tipos del proceso de adsorción y son las siguientes:

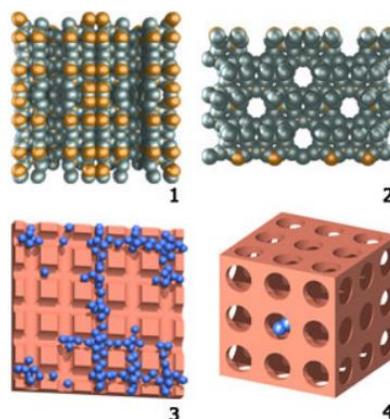
### a) Adsorción física

Fisisorción es otro nombre para lo que sucede cuando un adsorbato y la superficie de un adsorbente como se muestra en la figura N°1 de la estructura de las arcillas en la cual interactúan sólo a través de fuerzas de Van der Waals. Las moléculas que están siendo adsorbidas no están unidas adecuadamente a la superficie y sus capacidades de adsorción son sólo modestamente no tan altas apenas una cantidad de kJ, aproximadamente equivalente al calor absorbido. El aumento de la temperatura reduce significativamente la adsorción, los adsorbentes como la zeolita, el gel en rodajas, el carbón activo y la mina de aluminio tienen una estructura muy porosa con una relación superficie-volumen del orden de las decenas por lo que, en consecuencia, son capaces de absorber sustancias refrescantes. Debido a que las fuerzas de Van der Waals pueden extenderse de una capa de moléculas a otra, el tamaño de la capa que se adsorbe durante la adsorción física puede variar de una molécula a muchas moléculas.

El proceso es intermitente porque el adsorbente se regenera a medida que se satura, debido a esto, una máquina de adsorción debe tener al menos dos cámaras o lechos de adsorción para que la operación pueda continuar (Pino, 2011).

### Figura 1

*Arcillas con propiedades de adsorción de sustancias*



FUENTE: (Pino, 2011)

## **b) Adsorción química**

También conocida como quimisorción, ocurre cuando las moléculas que han sido adsorbentes reaccionan químicamente con la superficie, formando y rompiendo enlaces. La adsorción química se limita a una única monocapa en la superficie.

Se distingue por un fuerte enlace químico entre el adsorbente y el adsorbato. Debido a esto, la adsorción química es más difícil de revertir y requiere más energía que la adsorción física (Pino, 2011).

### **2.1.2. Adsorción como proceso de sorción**

En este proceso se sabe que la concentración preferencial de especies en superficies de adsorción de sólidos también opera en otros dos procesos; a saber, cromatografía e intercambio iónico. Pero se debe de conocer que la adsorción está diseñada para separar mezclas líquidas a través de una alimentación intermitente de solución a separar, seguida del paso de una solución de elución (Tien, 2019).

#### **2.1.2.1. Proceso de separación seleccionado para la adsorción**

**Adsorción en lecho móvil.** A diferencia de la adsorción en lecho fijo, la adsorción en lecho móvil es llevado a cabo con fases sólidas adsorbente que será nuestro carbón activado y fluidas en movimiento adsorbato cloro y el agua potable de red. Los movimientos de ambas fases pueden ser paralelas, contracorriente o perpendiculares (flujo cruzado); aunque en la práctica se utiliza el patrón de contracorriente (Tien, 2019).

### **2.1.3. Aplicaciones de la adsorción**

(Tien, 2019), La aplicación de la adsorción en donde se encuentra al adsorbato en fase líquida y el adsorbente en fase sólida es la siguiente:

- Decoloración, secado o desgomado de productos derivados del petróleo
- Eliminación de especies orgánicas disueltas de los suministros de agua.
- Eliminación de olores, sabores y colores de los suministros de agua.
- Tratamiento avanzado de aguas residuales (domésticas e industriales)

- Decoloración de jarabe de azúcar crudo y aceites vegetales
- Recuperación y concentración de proteínas, productos farmacéuticos y bio-compuestos de suspensiones diluidas.
- Separación a granel de parafina e isoparafinas.

#### 2.1.4. Pasos del Proceso de Adsorción

Según (E.U. Politécnica, 2011) son:

- Macrotransporte.** – Es aquel paso en el cual el material orgánico presenta un movimiento a través del sistema de macroporos del carbón activo.
- Microtransporte.** - Es aquel paso en el cual el material orgánico presenta un movimiento a través del sistema de microporos del carbón activo.
- Adsorción.** – Es aquella adhesión física del material orgánico a la superficie del carbón activo en los microporos y mesoporos.

## 2.2. Tipos de Adsorbentes

Los materiales adsorbidos son materiales orgánicos o sintéticos con estructuras amorfas y microcristalinas. Se utilizan a gran escala el carbón activo, aluminio activo, zeolita, gel de rodaja, tierra de batán, otras arcillas, etc. Se han desarrollado numerosos adhesivos para una amplia variedad de separaciones. Normalmente, los materiales adsorbidos son granos pequeños y alargados con tamaños que oscilan entre 0,1 y 12 mm. Las partículas adsorbentes tienen estructuras extremadamente porosas con numerosos poros extremadamente pequeños cuyo volumen puede alcanzar hasta el 50% del volumen total de la partícula (Pino, 2011).

La adsorción a menudo se manifiesta como una sola capa en la superficie de los poros, aunque ocasionalmente aparecen muchas capas. La adsorción física, también conocida como adsorción de Van der Waals, a menudo ocurre entre las moléculas de adsorbato y la superficie sólida interna porosa y es fácilmente reversible.

Existen numerosos materiales adsorbidos comerciales, algunos de los cuales se enumeran aquí. Todos tienen una porosidad sustancial en sus áreas superficiales, que oscilan entre 100 y más de 2000 m<sup>2</sup>/g (Pino, 2011).

**a) Carbón activado**

Es un material microcristalino que resulta de la descomposición térmica de madera, fibras vegetales, carburos, etc. Tiene superficies superficiales que oscilan entre 300 y 1200 m<sup>2</sup> por gramo, con un diámetro medio de porosidad de 10 a 60 Å. La mayoría de sustancias orgánicas absorber dióxido de carbono activo (Pino, 2011).

**b) Gel en rodajas.**

Este adsorbente se crea tratando una solución de arena de soda con ácido y luego secándola. Tiene una superficie de 600 a 800 m<sup>2</sup>/g y un diámetro poroso promedio de 20 a 50 Å. Se utiliza principalmente para fracturar hidrocarburos y deshidratar gases líquidos (Pino, 2011).

**c) Almina activada.**

Para preparar esta sustancia, se cuece a fuego lento óxido de aluminio activado para extraer agua. Siempre se utiliza para almacenar gases y líquidos. Las áreas superficiales fluctúan entre 200 y 500 m<sup>2</sup>/g, con un diámetro típico de roca porosa que oscila entre 20 y 140 Å. (Pino, 2011)

**d) Zeolitas tipo tamiz molecular.**

Estas zeolitas son cristales de aluminio-silicato con poros de uniformidad precisa que forman una red cristalina abierta. Como resultado, el tamaño constante del poro difiere de otros tipos de adsorbentes que tienen una variedad de tamaños de poro. Las diferentes zeolitas tienen tamaños de partículas que varían desde aproximadamente 3 a 10 Å. El uso de zeolitas incluye secado, separación de hidrocarburos de mezclas y muchas más aplicaciones. (Pino, 2011)

**e) Resinas o polímeros sintéticos.**

Hay dos tipos principales de monómeros que se producen mediante polimerización. Los elaborados a partir de compuestos aromáticos como divinilbenceno y estireno se utilizan para adsorber compuestos orgánicos de soluciones acuosas no polares. Los hechos de ésteres acrílicos se utilizan en soluciones acuosas para soluciones más polares.

El adsorbente más popular utilizado en las máquinas de adsorción es el gel en rodajas, que también se utiliza en cantidades más pequeñas en carbón activado, ilmenita y zeolitas (Pino, 2011).

### **2.3. Equipos de adsorción**

La separación por adsorción se efectúa poniendo en contacto las soluciones a tratar con adsorbentes seleccionados. Según (Tien, 2019) existen numerosas formas de lograr el contacto fluido/sólido, como se muestra en la Figura N°2. A continuación se ofrece una breve descripción de cada equipo:

#### **a. Adsorción en recipientes agitados**

La adsorción discontinua en un recipiente agitado representa quizás la forma más sencilla de provocar el contacto fluido/adsorbente. Se añade una cantidad fija de adsorbente de un estado conocido a un volumen de solución de una concentración de soluto conocida en un recipiente cerrado. La agitación se realiza mediante agitadores giratorios para asegurar que las partículas adsorbentes estén completamente suspendidas y que la concentración de adsorbato se mantenga uniforme en toda la solución (Tien, 2019).

#### **b. Adsorción en tanques de flujo continuo**

Este tipo de operación se utiliza a menudo en el tratamiento de aguas residuales. Los adsorbentes en forma de polvo, como el carbón activado, se añaden directamente a un paso particular de un proceso de tratamiento (biológico o fisicoquímico) con el fin de eliminar una especie particular de contaminante (Tien, 2019).

#### **c. Adsorción en lecho fijo**

La adsorción en lecho fijo consiste en hacer pasar una solución a través de una columna llena de adsorbentes y se aplica comúnmente para eliminar trazas de contaminantes de una solución líquida o vapores tóxicos y volátiles de corrientes de gas (McCabe et al., 2005).

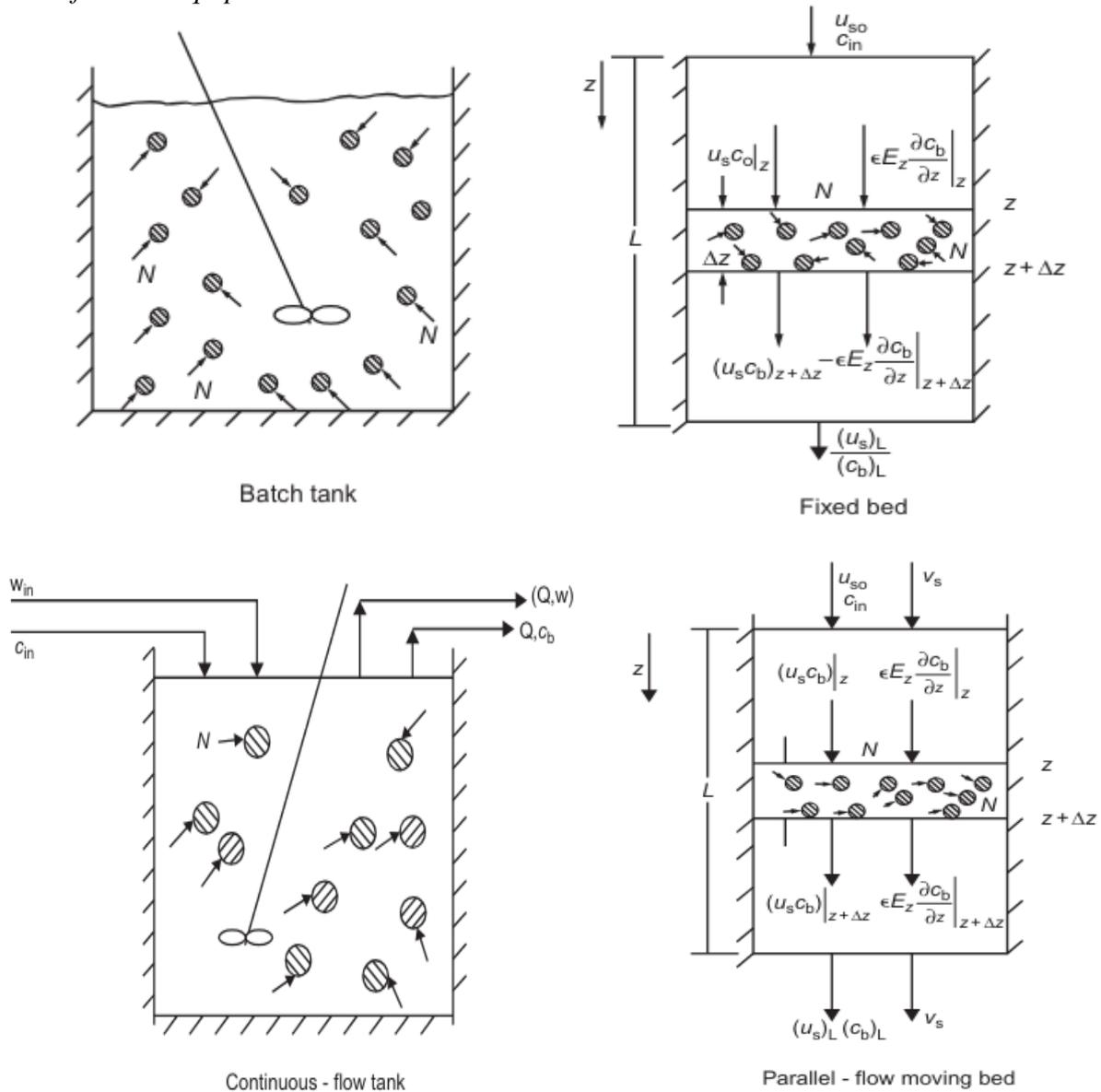
La adsorción en lecho fijo, por naturaleza, es un proceso discontinuo. Comenzando con un estado fresco o recientemente regenerado, los adsorbentes en operaciones de lecho fijo se saturan cada vez más con adsorberse hasta el punto en que la reactivación (desorción) se vuelve necesaria y cesa el funcionamiento (McCabe et al., 2005).

#### d. Adsorción en lecho móvil

A diferencia de la adsorción en lecho fijo, la adsorción en lecho móvil se lleva a cabo con las fases sólida (adsorbente) y fluida en movimiento. los movimientos de ambas fases pueden ser paralelas, a contracorriente o perpendiculares (flujo cruzado); aunque en la práctica se utiliza el patrón contracorriente (Tien, 2019).

**Figura 2**

*Diferentes equipos de adsorción*



FUENTE: (Tien, 2019)

## 2.4. Isotermas de Adsorción

La isoterma de adsorción es la relación de equilibrio entre la concentración en la fase fluida y la concentración en las partículas adsorbentes a una temperatura determinada. Para los gases, la concentración suele darse en porcentaje molar o como presión parcial. Para los líquidos, la concentración suele expresarse en unidades de masa, como parte por millón. La concentración de adsorbato en el sólido se da como masa adsorbida por unidad de masa del adsorbente original (McCabe et al., 2005).

Algunas formas isotérmicas típicas se muestran en la figura N°3, la isoterma lineal pasa por el origen y la cantidad adsorbida es proporcional a la concentración en el fluido. Las isotermas que son convexas hacia arriba se llaman favorables, porque una carga sólida relativamente alta puede obtenerse a baja concentración en el fluido (McCabe et al., 2005).

La isoterma de Langmuir está dada por la relación  $W = W_{\max} (Kc/(1+Kc))$ , donde "W" es la carga de adsorbato, "c" es la concentración en el fluido y "K" es la constante de adsorción. Esta isoterma es del tipo favorable. Cuando "K" es grande y  $Kc \geq 1$ , la isoterma es fuertemente favorable, y cuando  $Kc < 1$ , la isoterma es casi lineal. La isoterma de Langmuir se deriva asumiendo una superficie uniforme, no es una suposición válida, pero la relación funciona bastante bien para gases que están débilmente adsorbidos. Para isotermas fuertemente favorables, la ecuación empírica de Freundlich  $W=K_f C_e^{1/2}$ , donde "b" y "m" son constantes y  $m < 1$ , suele ser una mejor opción, particularmente para la adsorción de líquidos (McCabe et al., 2005).

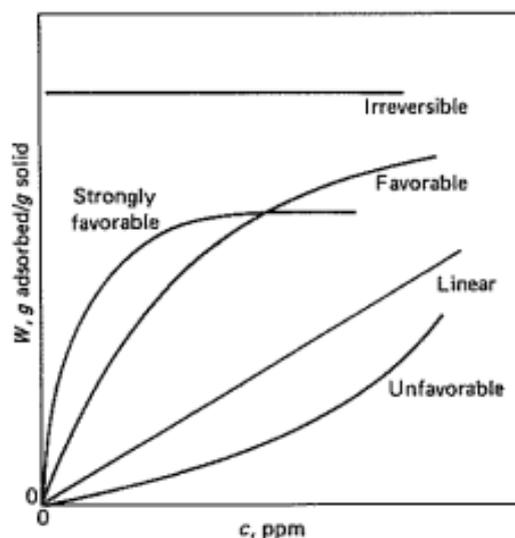
El caso límite de una isoterma favorable es la adsorción irreversible, donde la cantidad adsorbida es independiente de la concentración hasta valores muy bajos. Todos los sistemas muestran una disminución en la cantidad adsorbida con un aumento de la temperatura y, por supuesto, el adsorbato se puede eliminar elevando la temperatura incluso en los casos etiquetados como "irreversibles" requiere una temperatura mucho más alta cuando la adsorción es fuertemente favorable o irreversible que cuando las isotermas son lineales. Una isoterma que es cóncava hacia arriba se llama desfavorable porque se obtienen cargas sólidas relativamente bajas y porque conduce a transferencias de masa bastante largas.

Las isothermas de esta forma son raras, pero vale la pena estudiarlas para ayudar a comprender el proceso de regeneración. Si la isoterma de adsorción es favorable, la transferencia de masa desde la fase sólida a la fase fluida tiene características similares a las de la adsorción con una isoterma desfavorable. Para mostrar la variedad de formas isotérmicas para un solo adsorbato, en la Figura N°2 se dan datos del agua adsorbida del aire en tres desecantes (McCabe et al., 2005).

Las curvas de la Figura N°3 se basan en la humedad relativa, lo que hace que las isothermas para un rango de temperaturas caen en una sola curva. Tenga en cuenta que, a excepción de los tamices moleculares, la cantidad absorbida a una presión parcial dada disminuye fuertemente con el aumento de temperatura.

**Figura 3**

*Tipos generales de isothermas de adsorción de solutos*



*FUENTE:* (McCabe et al., 2005)

#### **2.4.1. Isoterma de Freundlich**

Es una de las isothermas más usuales para describir las características de adsorción del carbón activado y con más uso en el tratamiento de aguas residuales. Se describe una adsorción no ideal, reversible, heterogénea y este modelo es aplicable para una adsorción en multicapa sin que exista

distribución uniforme de entalpía o afinidad de adsorción sobre una superficie heterogénea (Paredes, 2011).

$$W = K_f C_e^{1/n} \dots\dots\dots 2.1$$

Empleando esta ecuación se puede reescribir de la siguiente forma:

$$\text{Log}(W) = \log K_f + 1/n \log C_e \dots\dots\dots 2.2$$

Donde:

- W: es la capacidad de adsorción en el equilibrio (mg/L)
- C<sub>e</sub>: es la concentración de soluto presente en la solución en el equilibrio (mg/L)
- K<sub>f</sub>: Es una constante que llega a ser parámetro de la capacidad de adsorción del material y 1/n(adimensional) representa una medida de la intensidad de la adsorción  $mg^{-1/n} \cdot L^{-1/n}$ .

#### 2.4.2. Isoterma de Langmuir

Isoterma la cual asume que la adsorción ocurre un número ilimitado de veces, está definido por sitios localizados similares y equivalentes que forman una monocapa, en otras palabras, describe una adsorción homogénea, en donde las moléculas poseen una entalpía y energía de activación constante, sin que exista alguna transmigración del adsorbato en el plano de la superficie del adsorbente. Según Paredes (2011), la isoterma de Langmuir se le presenta de la siguiente forma:

$$W = aC_e / (1 + bC_e) \dots\dots\dots 2.3$$

Empleando esta ecuación se puede reescribir de la siguiente forma:

$$C_e / (W) = 1/ab + 1/a C_e \dots\dots\dots 2.4$$

Donde:

- W: es la capacidad de adsorción o cantidad de adsorbato retenido en el adsorbente en el equilibrio (mg/g)
- C<sub>e</sub>: es la concentración del adsorbato presente en la solución en el equilibrio (mg/L)
- a: Es la capacidad máxima de adsorción (mg/g)
- b: representa la constante de Langmuir relacionada con el calor de adsorción (L/mg)

### 2.4.3. Isoterma de adsorción Lineal

La isoterma de adsorción lineal se refiere a una simplificación o aproximación lineal en la adsorción de gases en sólidos, pero no corresponde a una ecuación establecida. La isoterma lineal viene representada por la ecuación

$$W = KC_f \dots\dots\dots 2.5$$

Donde:

- W: Es la cantidad de gas adsorbido en el sólido.
- $C_f$ : Es la concentración en equilibrio del ion metálico en la fase líquida (mg/L).
- K: Es la constante de adsorción, coeficiente de distribución o de partición.

## 2.5. Cinética de adsorción

Según Paredes (2011) el estudio de la cinética de adsorción tiene una importancia por las siguientes razones:

- 1) Conocer el tiempo de interacción entre el adsorbato-adsorbente.
- 2) Determinar la etapa fundamental e importante de la adsorción.

Para poder analizar la cinética de adsorción se aplican los siguientes modelos.

### 2.5.1. Modelo de pseudo primer orden

Este modelo es muy usado para la adsorción en fase líquida. Se basa en la diferencia que puede existir entre las concentraciones del adsorbato en el equilibrio y a un tiempo de contacto (Paredes, 2011).

La ecuación diferencial es la siguiente:

$$\frac{dq_t}{dt} = k_{ad}(q_e - q_t) \dots\dots\dots 2.6$$

La forma linealizada se presenta a continuación:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - K_1 t \dots\dots\dots 2.7$$

Donde:

- $q_e$  : es la cantidad de soluto adsorbido en equilibrio (mg/g)

- $q_t$  : es la cantidad de soluto adsorbido en el tiempo  $t$  (mg/g)
- $k_1$ : es la constante de velocidad (1/min)
- $t$ : es el tiempo transcurrido en el proceso de adsorción (min)

### 2.5.2. Modelo de pseudo segundo orden

Este modelo es desarrollado para procesos de adsorción en sistemas sólido-líquido. Es presentado por la siguiente ecuación: (Paredes, 2011)

$$\frac{dq_t}{dt} = K_2(q_e - q_t)^2 \dots\dots\dots 2.8$$

La forma linealizada de esta ecuación es expresada de la siguiente manera:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \dots\dots\dots 2.9$$

Donde:

- $q_e$  : es la cantidad de soluto adsorbido en equilibrio (mg/g)
- $q_t$  : es la cantidad de soluto adsorbido en el tiempo  $t$  (mg/g)
- $k_2$ : es la constante de velocidad (g/mg.min)
- $t$ : es el tiempo transcurrido en el proceso de adsorción (min)

## 2.6. Carbón

El carbón, es un mineral con origen orgánico y constituido por carbono. Es el resultado de la formación de la condensación gradual del material constituido por plantas que parcialmente fue descompuesta al pasar millones de años.

El carbón genéricamente se le dice cuando diferentes compuestos tienen en su composición al elemento carbono (C). Cada átomo que está situado en la parte exterior de la estructura cristalina llega a disponer fuerzas de atracción libre, lo cual permite que haya una atracción de compuestos existentes en su alrededor (E.U. Politécnica, 2011).

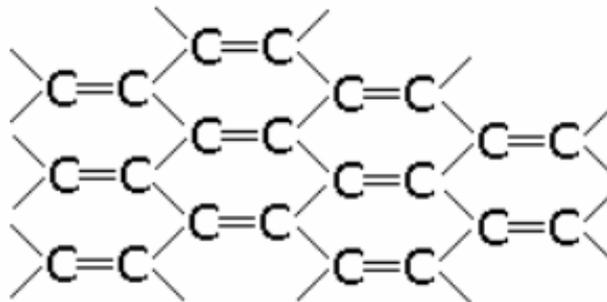
## 2.7. Carbón Activo

El carbón activo es aquel producto que posee estructura cristalina reticular debido a su estructura que posee como se ve en la Figura N°4, y muy similar a su forma alotrópica que es el grafito; es extremadamente poroso y desarrolla áreas superficiales del orden de 500 a 1500 m<sup>2</sup>/g de carbón. El carbón activado puede producirse a partir de la carbonización de materiales como cáscaras de coco, carbón, lignito, madera y sustancias similares, seguido de activación con aire o vapor. Se utiliza ampliamente para la recuperación de vapor orgánico, soluciones líquidas para decoloración y tratamiento y purificación de suministros de agua y aguas residuales.

La diferencia fundamental de los carbones radica en la estructura, o arreglo de sus átomos. En el caso del carbón activo, se encuentran combinados en forma de placas graníticas como se ve en la siguiente figura (E.U. Politécnica, 2011).

**Figura 4**

*Combinación de la estructura del carbón activo*



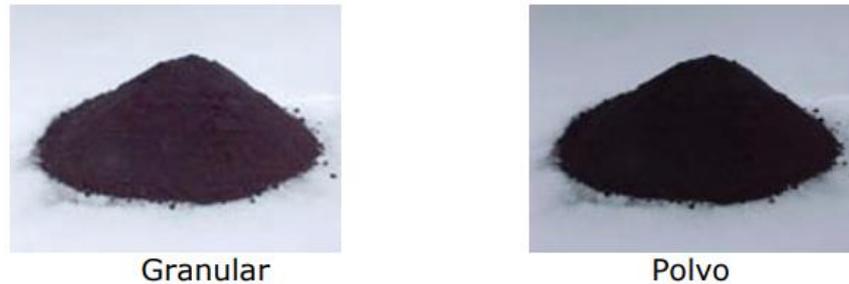
*FUENTE:* (E.U. Politécnica, 2011)

El carbón activado en su mayoría es preparado en la industria ya sea granular o en polvo como se muestra en la Figura N°5, sirve para que tenga una elevada superficie interna y adsorber una gran cantidad de compuestos, tanto en fase gaseosa como en disolución. La capacidad adsorbente va de acuerdo a la estructura porosa y la interacción con adsorbatos polares y no polares, dada su estructura química por centros activos, dislocaciones y discontinuidades, donde estos carbones presentan electrones desapareados y valencias insaturadas en el cual se logra tener mayor energía potencial. Podemos clasificar dependiendo al

tamaño de grano del carbón activo en granular y polvo como se ve en la siguiente imagen (E.U. Politécnica, 2011).

**Figura 5**

*Clasificación del carbón activo respecto al tamaño de grano*



*FUENTE:* (E.U. Politécnica, 2011)

### 2.7.1. Propiedades del carbón Activo

El carbón activo es utilizado para remover color, olor, sabor e infinidad de productos y por ello es utilizado en varios procesos hasta en los más complejos como son en los sistemas industriales, plantas de tratamiento de aguas residuales o en sistemas de elaboración de antibióticos. Las características en las cuales son basadas las aplicaciones del carbón activado son: elevada capacidad para la eliminación de sustancias y baja selectividad de retención por ello el carbón activado de presentar los siguiente: (Tien, 2019)

**Tabla 1**

*Propiedades del Carbón Activo*

<b>Compuesto</b>	<b>Tamaño de Malla</b>	<b>Densidad</b>	<b>Porosidad</b>	<b>A. de S. Específica</b>
<b>Carbón</b>	-60+30	500–900	0.4 – 0.7	200 – 2000
<b>Activado</b>	Malla Tyler	kg/m <sup>3</sup>		m <sup>2</sup> /g

*FUENTE:* (Tien, 2019)

## 2.7.2. Características físico-químicas

### 2.7.2.1. Composición química

**Tabla 2**

*Composición química del carbón activado*

<b>Materia</b>	<b>Composición (%)</b>
Carbono	75-80%
Cenizas	5-10%
Oxígeno	10%
Hidrógeno	0.5%

*FUENTE:* (E.U. Politécnica, 2011)

### 2.7.2.2. Estructura física

**Tabla 3**

*Tamaño de los poros*

Macroporos	Mesoporos	Microporos
$r > 25\text{nm}$	$25 > r > 1\text{nm}$	$r < 1\text{nm}$

*FUENTE:* (Pino, 2011)

## 2.7.3. Especificaciones de calidad del carbón activo

### 2.7.3.1. Radio medio de poro

Va en relación de acuerdo al tipo de materia prima que se utiliza para generar el carbón activo y también de acuerdo a las condiciones del proceso esta va cambiando en su característica. El método analítico para obtener este valor requiere de un costo muy alto y es por ello que los productores de carbón activo no lo evalúan con mucha frecuencia esta característica, pero en el caso de que se dé la evaluación del radio medio del poro es reportado en valores de nm (Barazorda & Lima, 2019).

### 2.7.3.2. Volumen total del poro

Esta variable es expresada en las siguientes unidades  $\text{cm}^3/\text{g}$  y llega a ser una función tanto del tipo de materia prima como del grado de activación. Es decir, esta característica depende relevantemente del radio medio de poro como también del área superficial del carbón. El método analítico que se utiliza para determinarlo es idéntico al que se usa en el caso del radio medio de poro y esta característica tampoco se evalúa con frecuencia por no tener costos excesivos. Este parámetro es un indicador de la capacidad de un carbón activado (Barazorda & Lima, 2019).

La determinación del volumen de poro está dada por la siguiente ecuación:

$$V_p = \left( \frac{p_1}{p_2} \right) \dots \dots \dots 2.10$$

Donde:

- $V_p$ : Volumen total de poro
- $p_1$ : Peso del adsorbente empapado de agua (g)
- $p_2$ : Peso del adsorbente seco (g)

### 2.7.3.3. Densidad aparente

Es una propiedad que destaca en polvos, gránulos y otros sólidos que tiene un uso para la referencia de cualquier masa de material corpuscular o particulado. En relación con el carbón activado viene a ser el peso  $\text{g}/\text{cm}^3$  de carbón totalmente seco en aire., es decir, incluye el volumen de todos los poros y el de los espacios entre las partículas de carbón. Con esta variable se puede determinar lo que es el volumen de la materia necesaria para contener una determinada cantidad de carbón activado granular. Este valor obtenido ayuda a determinar en gran parte el flujo de agua necesario el cual ayuda al retrolavado del carbón (Barazorda & Lima, 2019).

La densidad aparente se halla por la siguiente ecuación:

$$\rho_a = \left(\frac{m}{v}\right) \dots\dots\dots 2.11$$

Donde:

- $\rho_a$ : Densidad aparente
- $m$ : Masa del adsorbente (g)
- $v$ : Volumen de la muestra (cm<sup>3</sup>)

#### 2.7.3.4. Densidad real

Es aquella propiedad la cual esta medida solo pertenece a los sólidos, a pesar de que posee vacíos internos., cuando esta propiedad llega a ser determinada se considera constante para un determinado material. La propiedad del volumen puede determinarse por inmersión de la masa conocida de un respectivo material dentro de un recipiente con volumen conocido de un líquido humectante. El líquido que se encuentra en el recipiente tiene que permitir la penetración completa en el material y poder desplazar los gases atrapados., este tipo de operación es necesaria para aumentar la penetración con el vacío o la agitación (Barazorda & Lima, 2019).

La densidad real se representa por la siguiente ecuación:

$$\rho_r = \left(\frac{p1}{p1+p2-p3}\right) \dots\dots\dots 2.12$$

Donde:

- $\rho_r$ : Densidad real
- $p1$ : Peso del recipiente de uso (g)
- $p2$ : Peso de la muestra del carbón activado (g)
- $p3$ : Peso final de carbón activado y el líquido humectante (g)

### 2.7.3.5. Porosidad

La propiedad de la porosidad es conocida como una cantidad adimensional, esta es expresada en porcentaje y su definición se da como fracción del volumen de la muestra en que el poro o espacio vacío ocupa (Barazorda & Lima, 2019).

La propiedad de la propiedad se representa por la siguiente ecuación:

$$\% \textit{porosidad} = \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_r}\right) \times 100 \dots\dots\dots 2.13$$

Donde:

- $\rho_a$ : Densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>)
- $\rho_r$ : Densidad real (g/cm<sup>3</sup>)

### 2.7.3.6. pH

La materia soluble en el agua llega a tener un carácter ácido o básico. Como ejemplo se tiene el caso de un carbón que es activado con ácido fosfórico, este producto que llega a producirse en el proceso de dicha fabricación tiene fosfatos que en el momento de disolverse con el agua se convierten en ácidos y este efecto hace que disminuye el pH (Barazorda & Lima, 2019).

En el momento de que el pH del extracto acuoso llegue a ser igual al del agua que va a tratarse, no ocurrirá ninguna alteración en la última muestra. Cuando el pH del extracto llegue a ser diferente, solamente se modificará el pH de los primeros litros que haya sido tratados; sin embargo, en ciertas aplicaciones es inaceptable esta variación.

Para este tipo de casos, en algunos fabricantes de carbón activado ofrecen carbones con valores de pH los cuales son similares al del líquido que va a tratarse. Pero en efecto, el usuario tiene la acción de agregar un ácido o un álcali y así poder inundar el carbón activado granular en agua para poder obtener el pH requerido, también puede realizar un lavado del carbón hasta lograr eliminar

los solubles que modifican el pH; si se utiliza el ultimo método va ser necesario utilizar grandes volúmenes de agua (Barazorda & Lima, 2019).

#### **2.7.3.7. Humedad**

La humedad está relacionada con el agua ya que es uno de los componentes del carbón activado, el cual se evapora e influye en los procesos para aprovechar el carbón. La determinación del porcentaje en peso es obtenida mediante un análisis rápido y conciso, debido a su rapidez y sencillez (Barazorda & Lima, 2019).

La propiedad de la humedad es determinada por el porcentaje como se ve en la siguiente ecuación (ASTM-2867, 2014):

$$\% \textit{Humedad} = \left( \frac{M1-M2}{M1} \right) \times 100 \dots\dots\dots 2.14$$

Donde:

- M1: Peso inicial de la muestra (g)
- M2: Peso final después del proceso de secado (g)

#### **2.7.3.8. Materia volátil**

La materia volátil en el carbón activado son los desprendimientos en estado gaseoso de la materia orgánica cuando está en el proceso de calentamiento. Cada vez que el carbón empieza a calentarse se genera el desprendimiento de los productos gaseosos y líquidos. Los elementos constituyentes principalmente son el agua, hidrogeno, dióxido de carbono, amoniaco, metano, benceno, monóxido de carbono, sulfuros de hidrogeno, tolueno, naftaleno y otros vapores alquitranes (Barazorda & Lima, 2019).

La forma de medición de la materia volátil será en porcentaje y estará determinada por la siguiente ecuación (ASTM-5832, 2014):

$$\% \text{ Volátiles} = \left( \frac{M2-M3}{M1} \right) \times 100 \dots\dots\dots 2.15$$

Donde:

- *M1*: Peso inicial de la muestra (g)
- *M2*: Peso de la muestra seca (g)
- *M3*: Peso después del tratamiento térmico (g)

### 2.7.3.9. Contenido de cenizas totales

Es el residuo mineral después de calcinar el carbón a las temperaturas ensayadas. Se define normalmente en % del peso tomando en cuenta la muestra calcinada con respecto a la muestra que se examina. La cantidad como la composición de estas cenizas influye en la adsorción y propiedades del carbón activado. Una forma de reducir la presencia de cenizas en el carbón activado es mediante el sometimiento de un lavado con ácido (Barazorda & Lima, 2019).

Las desventajas que produce estas cenizas en el caso de tratamiento de aguas consisten en que mayor porcentaje de cenizas haya, existirá menor cantidad de carbón efectivo para el proceso de adsorción (Barazorda & Lima, 2019).

El porcentaje de cenizas se hallará mediante el uso de la siguiente ecuación (ASTM-2866, 2014):

$$\% \text{ Cenizas} = \left( \frac{M4}{M2} \right) \times 100 \dots\dots\dots 2.16$$

Donde:

- *M2*: Peso de la muestra seca (g)
- *M4*: Peso final después del tratamiento térmico (g)

### 2.7.3.10. Carbón fijo

Esta propiedad del carbón fijo es la parte no volátil y se encuentra en estado sólido. Este se encuentra como residuo de carbón dentro

del crisol luego de determinar la materia volátil. Si se resta la ceniza a este residuo se podrá obtener lo que es el carbono fijo, la forma de obtención es por diferencia conociendo la humedad, las cenizas y las materias volátiles (Barazorda & Lima, 2019).

El porcentaje para determinar el carbón fijo se muestra en la siguiente ecuación (ASTM-6385, 2022):

$$\% \text{ Carbón fijo} = 100\% - H(\%) - mv(\%) - c(\%) \dots 2.17$$

Donde:

- *H*: Humedad (%)
- *mv*: Materia volátil (%)
- *c*: Cenizas (%)

## 2.8. Eucalipto

El eucalipto es un árbol esencialmente austro-malayo, presenta una dispersión natural en latitudes las cuales se extienden desde 7 grados Norte (7°N) a 43 grados 39 minutos Sur (43°39'S). Esta planta presenta dos características (brotes indefinidos y yemas desnudas), las cuales permiten al brote del eucalipto que tenga un crecimiento continuo ya sea en altura o largo, así producir nuevas ramas, y todo esto es posible si el eucalipto está en condiciones favorables a su crecimiento (FAO, 1981).

La planta de eucalipto fue introducida en 1860 en el Perú, las plantaciones que se hicieron de esta planta fueron con la finalidad de producir madera industrial que abastezca como materia necesaria a todas las minas del Perú, también para la construcción rural, leña, postes, etc. La especie principal y la que en su mayoría se encuentra en el Perú, es el *E. globulus Labill*, ya que este brindaba buenos resultados en toda actividad de la época (Bermúdez et al., 2004).

**Tabla 4***Características del Eucalipto (Globulus labill)*

<b>Rápido crecimiento</b>	El eucalipto es conocido por su rápido crecimiento, lo que lo hace una fuente sostenible de materia prima.
<b>Tipo de corteza</b>	Áspera gris y persistente en la base; lisa en la parte superior
<b>Densidad</b>	La densidad de la madera de eucalipto suele estar en el rango de 600 a 900 kg/m <sup>3</sup>
<b>Celulosa</b>	El contenido de celulosa puede oscilar entre el 40% y el 50%
<b>Madera</b>	Pardo amarillenta clara, textura abierta, generalmente grano entrelazado y anillos de crecimiento bastante evidentes
<b>Baja ceniza</b>	La madera de eucalipto puede tener un contenido de ceniza que oscila entre el 0.2% y el 1.5%.
<b>Bajo contenido de lignina</b>	La lignina es menos carbonizada que la celulosa y la hemicelulosa durante el proceso de carbonización.

*FUENTE:* (FAO, 1981)

## 2.9. Agua de consumo humano

El agua para consumo humano, ya sea abastecida por una persona natural o jurídica operando bajo diversas modalidades empresariales, juntas administradoras, organizaciones vecinales, comunales u otras entidades que suministren agua para el consumo humano, tiene una serie de obligaciones según el Artículo 50 del reglamento de la calidad del agua para consumo humano del Ministerio de Salud del Perú (Dirección General de Salud Ambiental del Ministerio de Salud, 2011).

- Garantizar el suministro de agua para consumo humano cumpliendo con los requisitos establecidos en el reglamento en términos físicos, químicos, microbiológicos y parasitológicos.
- Controlar activamente la calidad del agua suministrada, conforme a las normativas del reglamento.

- Registrar su entidad en los registros administrados por la Autoridad de Salud según lo establecido en el reglamento.
- Proporcionar a la Autoridad de Salud y al órgano de control toda la información relevante sobre el control de calidad del agua mediante declaraciones juradas.
- Colaborar en las acciones dirigidas a proteger y recuperar las fuentes hídricas establecidas por la autoridad.
- Informar de manera oportuna a la Autoridad de Salud, al órgano de control y a los consumidores sobre cualquier alteración, modificación o contingencia en el servicio de suministro de agua, indicando las medidas preventivas y correctivas necesarias.
- Obtener los registros, aprobaciones y autorizaciones sanitarias especificadas en el reglamento.
- Brindar facilidades a los representantes autorizados del órgano de supervisión y de salud para llevar a cabo acciones de vigilancia y supervisión.
- Cumplir con las demás disposiciones del presente reglamento y con las normas técnicas emitidas por la autoridad de salud a nivel nacional.

**Tabla 5**

*LMP de parámetros microbiológicos y parasitológicos para el agua de consumo humano.*

<b>Parámetros</b>	<b>Unidad de medida</b>	<b>Límite máximo permisible</b>
Bacterias coliformes totales	UFC/100 mL a 35°C	0
E. coli	UFC/100 mL a 44,5°C	0
Bacterias coliformes termo tolerantes	UFC/100 mL a 44,5°C	0
Bacterias heterotróficas	UFC/mL a 35°C	500
Huevos y larvas de helmintos, y ooquistes de protozoarios patógenos.	Nº org/L	0
Virus	UFC / mL	0
Organismos de vida libre, como algas, protozoarios, copépodos, rotíferos, nemátodos en todos sus estadios evolutivos	Nº org/L	0

*FUENTE:* (Dirección General de Salud Ambiental del Ministerio de Salud, 2011)

**Tabla 6***LMP de parámetros de calidad organoléptica para el agua de consumo humano.*

<b>Parámetros</b>	<b>Unidad de medida</b>	<b>Límite máximo permisible</b>
Olor	-	Aceptable
Sabor	-	Aceptable
Color	UCV escala Pt/Co	15
Turbiedad	UNT	5
pH	Valor de pH	6.5 a 8.5
Conductividad (25°C)	µmho/cm	1500
Sólidos totales disueltos	Mg/L	1000
Cloruros	mg Cl/L	250
Sulfatos	mg SO <sub>4</sub> /L	250
Dureza total	mg CaCO <sub>3</sub> /L	500
Amoníaco	mg N/L	1.5
Hierro	mg Fe/L	0.3
Manganeso	mg Mn/L	0.4
Aluminio	mg Al/L	0.2
Cobre	mg Cu/L	2.0
Zinc	mg Zn/L	3.0
Sólido	mg Na/L	200

*FUENTE:* (Dirección General de Salud Ambiental del Ministerio de Salud, 2011)

Las Tablas 5 y 6 proporcionan límites máximos permisibles (LMP) para diferentes parámetros microbiológicos, parasitológicos y organolépticos en el agua de consumo humano, según la información de la Dirección General de Salud Ambiental del Ministerio de Salud en 2011.

### **2.10. Cloro**

Elemento químico representado con el símbolo Cl, su número atómico es 17 y su peso atómico es 35.453. Este elemento casi siempre se presenta como una molécula con dos átomos de cloro enlazados como Cl<sub>2</sub> y su peso molecular es

70.906. En estado líquido se puede encontrar como una solución de hipoclorito (CLOROSUR, 2004).

A temperatura y presión ambiente se puede encontrar al cloro en estado gaseoso de color amarillo verdoso el cual es más pesado que el aire y posee un olor muy fuerte, penetrante e irritante. En su forma líquida el cloro se presenta como una sustancia translúcida de color ámbar y en su forma sólida solo existe en forma de cristales rómbicos de color amarillo pálido (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia, 2003).

### **2.10.1. Cloro residual**

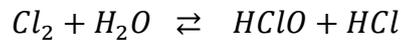
El cloro residual se refiere a la cantidad de cloro que permanece en el agua después de que se ha llevado a cabo el proceso de desinfección con cloro. Es un indicador importante para garantizar que el agua esté protegida contra la contaminación microbiológica incluso después de pasar por el tratamiento inicial.

Cuando se añade cloro al agua para la desinfección, este puede reaccionar con materia orgánica, microorganismos y otros contaminantes presentes. El cloro residual es la cantidad de cloro que queda después de estas reacciones y es esencial para mantener la seguridad microbiológica del agua durante su distribución hasta el punto de consumo.

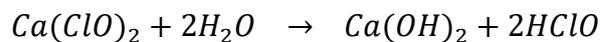
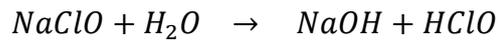
El cloro residual se mide en miligramos por litro (mg/L) o partes por millón (ppm). Es importante que haya una cantidad residual suficiente para asegurar la desinfección continua y la protección contra la proliferación de microorganismos patógenos en el agua potable (Dirección General de Salud Ambiental del Ministerio de Salud, 2011).

### 2.10.2. Química del cloro

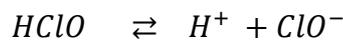
Cuando el cloro se disuelve en agua, rápidamente se hidroliza rápidamente para que se genere ácido hipocloroso (HClO) y ácido clorhídrico (HCl) (Injection Technical Control, 2006).



Para el caso de los hipocloritos, se genera la disociación de ambas sales de acuerdo a las ecuaciones (Injection Technical Control, 2006):



Por ello en cualquiera de los casos: cloro, hipoclorito sódico e hipoclorito cálcico, se acaba formando ácido hipocloroso, que es realmente la especie desinfectante, pero este llega a disociarse como se aprecia en el siguiente equilibrio (Injection Technical Control, 2006):



El equilibrio está regido por la siguiente constante:

$$K_a = \frac{[H^+][ClO^-]}{[HClO]} \dots\dots\dots 2.18$$

Cuyo valor tiene un aproximado el cual es  $3.2 \times 10^{-8}$  a temperatura ambiente.

Realizando el menos logaritmo de la expresión.

$$-\log K_a = -\log[H^+] - \log \frac{[ClO^-]}{[HClO]} \dots\dots\dots 2.19$$

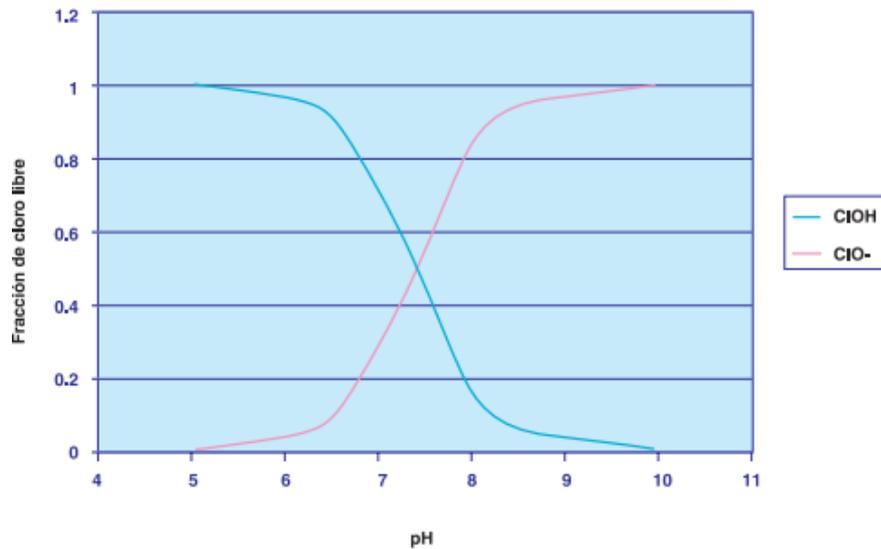
Al tener en cuenta que el  $-\log K_a$  se conoce como  $pK_a$ , la expresión resulta ser:

$$pK_a = pH - \log \frac{[ClO^-]}{[HClO]} \dots\dots\dots 2.20$$

Se podrá observar la distribución de cada una de las especies en función del pH en la siguiente gráfica (Injection Technical Control, 2006).

## Figura 6

Distribución del ácido hipocloroso y ácido clorhídrico en función al pH fracción de cloro libre



FUENTE: (Injection Technical Control, 2006)

En la Figura N°6 se aprecia que entre pH 6 y pH 9 ambas especies coexisten, pero para el pH que es inferior a 6 y superior a 9 se considera la existencia de una sola especie. En el valor de pH que resulta igual al  $pK_a$  del ácido hipocloroso ( $pK_a \approx 7.5$ ), se observa concentraciones de HClO y  $ClO^-$  que son iguales (Injection Technical Control, 2006).

Siendo el ácido hipocloroso un desinfectante que resulta ser más eficaz que el ion hipoclorito, podría estar relacionado con la inexistencia de carga en la molécula de ácido hipocloroso. Siendo una molécula neutra, logra fácilmente penetrar la pared bacteriana logrando la actividad bactericida. Por ello se puede concluir con vista a la ilustración 4 en la cual muestra que tiene diferente actividad el hipoclorito como agente bactericida cuando presenta valores de pH distintos (Injection Technical Control, 2006).

### 2.10.3. Propiedades físicas

Conocer las propiedades físicas del cloro es fundamental en diversas aplicaciones, especialmente en ámbitos industriales, de salud y medio ambiente. Las propiedades físicas del cloro son mencionadas en la Tabla N°7.

**Tabla 7**

*Propiedades físicas del cloro*

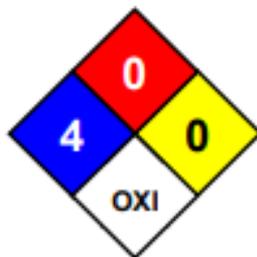
<b>PROPIEDAD</b>	<b>VALOR</b>
Estado Físico	Gas/líquido
Color	Amarillo verdoso/ámbar
Olor (olor umbral 0.31ppm en aire)	Picante, irritante, sofocante
Temperatura de ebullición	-34.05°C a 1atm
Temperatura de fusión	-101.00°C a 1atm
Calor de vaporización	68.8cal/g (-34.05°C, 1atm)
Calor de fusión	22.8 cal/g
Capacidad calorífica	0.473 KJ/Kg °C
Densidad de vapor (aire=1)	2.482 (0°C, 1atm)
Densidad relativa (agua=1)	1.468 (0°C)
Densidad del gas seco	3.209 g/cc (0°C,1atm)
Densidad del líquido	1.468 g/cc (0°C, 1atm)
Relación gas / líquido	463.8 litros (0°C, 1atm)
Coefficiente de expansión	21.9%
Solubilidad en agua	7.1 g/l (20°C, 1atm)
Presión de vapor	6,62 atm (25°C)
% de volatilidad (por volumen)	100%
Temperatura de descomposición	No aplica

*FUENTE:* (Mexichem, 2010)

En la Figura N°7 se puede mencionar la información para el almacenamiento del cloro ya que es crucial para garantizar la seguridad en su manipulación y evitar riesgos asociados con su almacenamiento.

## Figura 7

Información para el almacenamiento del cloro



FUENTE: (Mexichem, 2010)

### 2.10.4. Propiedades químicas

El cloro es un elemento muy reactivo y llega a combinarse de forma directa con otros elementos. Es muy poco soluble en agua, pero al entrar en contacto con humedad se forma el inestable ácido hipocloroso (HClO) y el ácido clorhídrico (HCl). (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia, 2003)

En las reacciones inorgánicas que se puede presentar, el cloro en exceso con sales de amonio llega a formar tricloruro de nitrógeno (NCl<sub>3</sub>), el cual es una sustancia muy explosiva. Cuando existe la combinación con el hidrogeno con presencia de luz o calor llega a generarse una reacción explosiva para producir cloruro de hidrogeno. Cuando existe presencia de catalizadores, el cloro reacciona con óxidos de azufre y de nitrógeno para formar cloruro de sulfurilo (SO<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>) y de nitrosilo (NOCl). El cloro en presencia de humedad ataca y a muchos metales generando cloruros, cuando el cloro se encuentra en su forma seca corroe los metales hasta arriba de los 100°C (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia, 2003).

El cloro también puede reaccionar con hidrocarburos en reacciones de sustitución o adición ya que este puede reemplazar al hidrogeno y produce además un hidrocarburo clorado (cloruro de hidrogeno). Para el grupo de hidrocarburos insaturados se produce el rompimiento de los dobles enlaces, esta reacción llega a ser tan violenta el cual degrada el hidrocarburo hasta dióxido de carbono. En sustancias aromáticas puede

ocurrir estos comportamientos de acuerdo a las condiciones en las que se presenten (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia, 2003).

#### **2.10.5. Efectos del cloro sobre el medio ambiente**

El cloro es un elemento químico ampliamente utilizado en industrias y aplicaciones que van desde el tratamiento de agua hasta la fabricación de productos químicos. Sin embargo, su uso también conlleva importantes riesgos ambientales que pueden afectar a los ecosistemas acuáticos, la atmósfera y la salud humana (Stringer et al., 2001).

##### **a. Contaminación del agua**

El cloro se utiliza a menudo en el tratamiento del agua para eliminar microorganismos y garantizar la seguridad humana. Sin embargo, la liberación excesiva de cloro y sus subproductos puede contaminar los cuerpos de agua, dañar la vida acuática y comprometer la calidad del agua potable y recreativa (Stringer et al., 2001).

##### **b. Destrucción de la capa de ozono**

Algunos compuestos de cloro, como los clorofluorocarbonos (CFC), han sido implicados en la destrucción de la capa de ozono atmosférico. Esta destrucción de la capa de ozono puede aumentar la exposición a los rayos ultravioleta del sol, provocando consecuencias nocivas para la salud humana y el equilibrio ecológico (Stringer et al., 2001).

##### **c. Contaminación del suelo**

La liberación de cloro y sus subproductos al suelo, principalmente procedente de actividades industriales, puede provocar la acumulación de sustancias químicas tóxicas. Esto puede afectar la calidad del suelo, afectar la salud de las plantas y los organismos del suelo y potencialmente contaminar las aguas subterráneas (Stringer et al., 2001).

#### **d. Efectos sobre la vida silvestre**

La exposición a altas concentraciones de cloro puede ser tóxica para la vida silvestre, especialmente en los ecosistemas acuáticos. Los peces, las plantas acuáticas y otros organismos pueden verse gravemente perjudicados por la acumulación de cloro y sus subproductos en el agua, lo que puede afectar negativamente a la biodiversidad y la salud de los ecosistemas (Stringer et al., 2001).

#### **2.10.6. Efectos del cloro sobre la salud**

Es poco común que las personas estén expuestas al cloro en su forma gaseosa, pero en su forma líquida, existe alta probabilidad que las personas estén expuestas a productos constituidos por átomos de cloro como el hipoclorito de sodio que es usado como un desinfectante para el tratamiento del agua potable, como también es usado como limpiador y blanqueador doméstico. La exposición al cloro suele ocurrir en ambientes de trabajo de ámbito industrial donde se procesa el cloro, como también en el medio ambiente ya sea por causa de derrames o liberación a la atmósfera, flujos de corriente de agua o en la superficie.

Las formas de ingreso del cloro al cuerpo humano se dan a través de la respiración de esta sustancia o cuando se consume comida o agua contaminada. Esta sustancia no es absorbida por el cuerpo humano así que es de fácil eliminación y no llega a acumularse dentro de nuestro organismo. En exposiciones agudas al cloro genera taquicardia, hipertensión seguida de hipotensión y en algunos casos colapso cardiovascular (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia, 2003).

##### **a. Inhalación**

La exposición a cloro gaseoso en niveles muy altos ocurre en su mayoría en ambientes industriales cuando el cloro se transforma en sus diferentes productos terminados o donde se produce cloro para su debida comercialización. El cloro gaseoso es una sustancia mucho más pesada que el aire y a causa de esta propiedad causa asfixia si la persona

se encuentra en ambientes cerrados sin ventilación, por otra parte, esta condición agrava sus efectos corrosivos e irritantes pues hace más difícil retirar esta sustancia por las vías respiratorias una vez se haya inhalado (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia, 2003).

El cloro cuando se presenta en sus condiciones fisiológicas reacciona con el agua y se produce ácido hipocloroso, ácido clorhídrico y radicales oxígenos, todos ellos con actividad biológica. Cuando existe una exposición eventual con el cloro en el orden de 1 a 3 ppm genera irritación leve de las membranas mucosas del tracto respiratorio se irritan levemente. A niveles entre 5 y 10 ppm se genera un dolor en la garganta acompañada de tos, además de los efectos anteriores. En una concentración alrededor de los 15 ppm rápidamente se genera lo que es la afección respiratoria que incluye una acumulación de fluido en los pulmones aparte de obstruir las vías respiratoria en algunas personas (Ramírez, 2005).

Los niños si permanecen o están expuestos a iguales niveles de cloro presentaran mayor riesgo debido a su mayor frecuencia y área pulmonar en relación con el peso corporal (Ramírez, 2005).

#### **b. Contacto con piel/ojos**

Se producirá contacto con la piel o los ojos, cuando el cloro se presente en su forma gaseosa o si el cloro esta como líquido refrigerado, en estos casos las cantidades para alcanzar lesiones de grados nocivos para la salud solo se encuentran en entornos industriales y en casos de fugas y derrames de este material. Las consecuencias cuando una persona está expuesta al cloro gaseoso o liquido refrigerado son: para una concentración de 1 a 5 ppm se genera ardor en los ojos, parpadeo espasmódico o cierre involuntario de los ojos, en una concentración de 10 ppm la irritación ocular se hace intolerante produciendo irritación en la piel, y si el cloro está a más de 10 ppm en la piel se genera quemaduras y ampollas que se intensifican con el aumento de la

concentración de cloro (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia, 2003).

### **c. Ingestión**

Existe ingestión cuando el cloro se presenta en estado líquido después de hacer reacción con el agua, los problemas que genera cuando lo ingesta son: las lesiones corrosivas y estomacales severas en el tracto digestivo (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia, 2003).

### **d. Efectos Crónicos**

Ocurre para largo plazo, puesto que en exposiciones crónicas o prolongadas esta sustancia llega a tener efecto sobre los pulmones, generando la aparición de bronquitis crónica, se produce erosión dental sobre los dientes y en la piel produciendo irritación crónica.

Cuando existe exposiciones prolongadas a bajas concentraciones (1.5 ppm) pueden acarrear fatiga del olfato y tolerancia a los efectos irritantes de la sustancia. A nivel respiratorio se presentan irritaciones en las mucosas nasales y se genera modificaciones en el funcionamiento pulmonar como es la disminución de la capacidad respiratoria (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia, 2003).

### **e. Efectos sistémicos**

- **Efectos cardiovasculares.** Si las exposiciones son agudas se puede generar taquicardia seguida de hipertensión y posterior hipotensión. También existe una posibilidad que se presente un colapso cardiovascular por falta de oxígeno hacia el sistema (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia, 2003).
- **Efectos Hematológicos.** Se puede generar ácidos a consecuencia de la insuficiencia de oxigenación de los tejidos. También se puede generar una complicación en los niveles de iones Cloruro en la sangre, y esto puede causar desequilibrios ácido base (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia, 2003).

## **2.11. Diseño experimental factorial**

Como herramienta de investigación científica y la experimentación, los diseños experimentales factoriales sirven para estudiar el efecto de dos o más variables independientes en una o más variables dependientes, y así poder analizar cómo es la interacción entre sí de estas mismas. Se puede decir también que los diseños factoriales como herramientas esenciales en la investigación y la experimentación comprende las múltiples variables independientes y como estas influyen en las variables dependientes, y son de gran utilidad cuando se sospecha que existe interacciones entre las variables (Montgomery, 2004).

### **2.11.1. Diseño experimental factorial $3^3$**

El diseño experimental factorial ( $3^3$ ) se utiliza en este proyecto con la finalidad de estudiar las interacciones entre tres factores (A, B y C), cada uno con tres niveles. Este diseño más complejo que un diseño ( $2^k$ ) permite un análisis detallado de los efectos de los factores y sus interacciones en la variable de respuesta. Además, se emplea un enfoque de réplicas en puntos centrales para proteger contra la curvatura de los efectos de segundo orden y permitir la estimación independiente del error generado en estos experimentos.

La elección del diseño factorial  $3^3$  en la elaboración de carbón activado, específicamente para la adsorción de cloro, ofrece una herramienta robusta y detallada para analizar la complejidad de múltiples variables simultáneamente. Además de optimización del proceso, también contribuye al conocimiento de las interacciones entre las variables involucradas, mejorando así la eficiencia y la calidad del producto final.

Donde:

- A, B, C son los factores.
- Los niveles de cada factor son -1, 0 y +1.
- Se consideran las combinaciones a, b, ab, c, ac, bc y abc.
- Las observaciones (n) representan el número de repeticiones para cada combinación de tratamientos.

La Tabla N°8 nos proporciona las combinaciones experimentales y sus observaciones asociadas, proporcionando un marco para realizar

análisis estadísticos detallados de los efectos de los factores y sus interacciones en la variable de respuesta.

**Tabla 8**

*Plan experimental.*

No.	A	B	C	Combinación	Observaciones (n)
1	-1	-1	-1	abc	n1
2	-1	-1	0	ab	n2
3	-1	-1	+1	abc	n3
4	-1	0	-1	ac	n4
5	-1	0	0	a	n5
6	-1	0	+1	ac	n6
7	-1	+1	-1	abc	n7
8	-1	+1	0	ab	n8
9	-1	+1	+1	abc	n9
10	0	-1	-1	bc	n10
11	0	-1	0	b	n11
12	0	-1	+1	bc	n12
13	0	0	-1	c	n13
14	0	0	0	-	n14
15	0	0	+1	c	n15
16	0	+1	-1	bc	n16
17	0	+1	0	b	n17
18	0	+1	+1	bc	n18
19	+1	-1	-1	abc	n19
20	+1	-1	0	ab	n20
21	+1	-1	+1	abc	n21
22	+1	0	-1	ac	n22
23	+1	0	0	a	n23
24	+1	0	+1	ac	n24
25	+1	+1	-1	abc	n25
26	+1	+1	0	ab	n26
27	+1	+1	+1	abc	n27

## 2.12. Normas ASTM

Las normas ASTM (Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales) es una organización de estándares internacionales que se encarga en el desarrollo y publicación de acuerdos voluntarios en las normas técnicas para una amplia gama de materiales, productos, sistemas y servicios. Este proceso de creación de normas de ASTM es de manera abierta y transparente, en la cual todos los individuos que son parte de los gobiernos son participantes para llegar una decisión global consensuada. Hasta el año del 2022 la ASTM había publicado más de 12 000 normas, se sabe que es de gran importancia el desarrollo y actualización de las normas para reflejar los avances tecnológicos y las mejores prácticas en diversas industrias (American Society for Testing and Materials, 2022).

Las normas ASTM son usadas en investigaciones y proyectos de desarrollo, en sistemas de calidad, comprobación y aceptación de productos para toda transacción comercial que se realiza a nivel mundial. Estas normas llegan a ser uno de los componentes integrales de las estrategias en el comercio competitivo de hoy en día. (Barazorda & Lima, 2019)

**Tabla 9**

*Parámetros del carbón activado granular y sus normas de análisis*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Rango de valores típicos</b>	<b>Norma que se aplica</b>
Humedad	%	2 a 15	ASTM D-2867
Ceniza	%	3 a 15	ASTM D-2866
Densidad aparente	g/cm <sup>3</sup>	0.26 a 0.65	ASTM D-2854
pH del extracto acuoso	pH	2 a 11	ASTM D-3838
Rango del tamaño de partícula	Malla Estándar América (U.S. Std Stieve)	4x8 a 20x50	ANSI/AWWA B604-90
Volumen total de poro	nm <sup>3</sup>	0.2 a 1.0	ASTM C-699

Fuente: (Barazorda & Lima, 2019)

### **3. Antecedentes de la investigación**

#### **3.1. Internacionales**

Cervantes (2014), brinda la información sobre el carbón activado apto debe ser preparado a una temperatura de 650°C en un tiempo de 180 min, con una relación de impregnación de 1:1 g (activante-precursor) el cual en esas condiciones el adsorbente tendrá mejor rendimiento con respecto a la adsorción. También nos da a conocer que la capacidad máxima de adsorción del contaminante logra ser mayor cuando se trabaja a un pH de 9. En su investigación da el alcance que el equilibrio de adsorción se alcanza dentro después de 4 horas a una concentración inicial de contaminante de 300 mg/L a las temperaturas que se trabajó, el cual nos servirá para realizar las isotermas de adsorción.

Recobert (2015), brinda la información sobre un mayor porcentaje de activación se genera una reducción progresiva en las dimensiones de las piezas de carbón activo. Como consecuencia de que existe gasificación controlada localizada en el centro de las piezas de carbón activo, se genera una elevada porosidad en estos materiales, con elevadas superficies BET, superiores a los 200 m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup>, y con tamaño muy homogéneo y pequeño, la cual es de carácter microporoso. Y en tanto a la activación cuanto mayor es la temperatura la activación se obtiene en un menor tiempo, en otras palabras, ambas son inversamente proporcionales para la preparación.

Herrera (2017), menciona que al realizar un tiempo de activación de su carbón mineral de 30 a 90 min con la sustancia activante y la temperatura de carbonización se encontraba entre 650°C y 850°C. El autor toma más énfasis en el tiempo de adsorción en un determinado pH como influencia sobre este, el cual como resultado óptimo y alto porcentaje de adsorción se presentó en la muestra en donde se realizó la adsorción en un medio con 9 de pH a un tiempo mayor de los 30 minutos con una masa de 0.200 g de material adsorbente. Se obtuvo un rango lineal correspondiente a 0.069 – 10 mg/L de trimetilamina y se presentó un valor de 98.6% de recuperación del material adsorbente.

Ramírez et al., (2018), menciona un proceso de activación a diferentes condiciones como: pH, tamaño de partícula adsorbente, tiempo de contacto entre el adsorbente y el adsorbato, concentración de adsorbato (50 ppm) y concentración del adsorbente (150 mg). Obteniendo que para un pH de 2.1, diámetro promedio de la partícula del adsorbente de 0.6 mm y 8 horas de operación logro porcentajes de recuperación del  $59.2 \pm 1.9$  de los colorantes son cascaras de piña del Urabá y del  $51.7 \pm 2.1$  son colorantes de la cascara de piña del Chocó., y la recuperación del carbón activo fue de  $34.1 \pm 2.1$  en porcentaje.

### 3.2. Nacionales

Fernández (2009), menciona sobre la obtención de carbón activado que tuvo fue por medio de una activación química en la cual utilizó como agente activante al cloruro de Zinc ( $ZnCl_2$ ), durante un tiempo de 18 horas, de ahí sometió a una temperatura de  $450^\circ C$  durante 30 minutos en la etapa de carbonización-activación. Las isotermas que se obtuvo fueron comparadas con la de Freundlich la cual resulto confiable su proceso de adsorción. Un dato en tener en cuenta fue que las propiedades físico-químicas de los carbones activados obtenidos deben de encontrarse dentro de los rangos permitidos para las normas ITINTEC.

Paredes (2011), brinda información sobre los carbones activados que obtuvo por activación química de la cascara de castaña presentaban una micro y mesoporosidad con áreas superficiales entre  $1176 - 1434 \text{ m}^2/\text{g}$ . El incremento de razón de la impregnación y la temperatura de activación en los carbones preparados ayuda a aumentar el grado de porosidad lo cual ayuda en una mayor eficacia en la adsorción de cualquier contaminante, las variables que tienen más influencia son la razón de impregnación y la temperatura de activación. Se debe de entender que para compuestos heterogéneos el modelo de la isoterma de Freundlich es la adecuada y para compuestos homogéneos la más utilizada es la de Langmuir.

Valencia (2012), brinda información sobre la obtención del carbón activo a partir de las semillas de aguaje y aceituna utilizando el método de activación química con agente activante ácido fosfórico  $H_3PO_4$ . Teniendo como variables tres

grados de impregnación y diferente activación térmica. Logro tener un óptimo carbón activo a 0.75 grado de impregnación a una temperatura de 600°C en la cual este carbón activado presento una alta meso porosidad (140 y 125 m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup>) y acidez superficial (2.43 y 2.37 mmol H<sup>+</sup>.g<sup>-1</sup>) lo cual favoreció a la adsorción del cadmio. La isoterma de adsorción presento un ajuste predominante al modelo de Langmuir.

### 3.3. Locales

Rodriguez (2014), menciona sobre la información que obtuvo acerca del carbón activo a partir de la madera shihuahuaco en la cual lo preparo mediante activación física con vapor de agua a 800°C y teniendo como variable diferentes tiempos. El área superficial se determinó con el método BET, para el primer tiempo de 15 minutos obtuvo 408.56 m<sup>2</sup>/g, para el segundo tiempo de 30 minutos se obtuvo 422.41 m<sup>2</sup>/g y para el último tiempo de 45 minutos obtuvo 430.24 m<sup>2</sup>/g. El cual teniendo estos parámetros el carbón más eficiente fue el que se preparó a un tiempo de 45 minutos, y decoloro el 14.13% ya que tiene un alto contenido de microporos, muy bajo contenido de mesoporos y macroporos.

Condori (2019), brinda información sobre la activación al carbón de la cascara de castaña por el método químico utilizando el agente activante que es ácido fosfórico, y la temperatura de carbonización para la activación lo realizo a 400°C con un tiempo aproximado a 1 hora. Para determinar los parámetros utilizo un diseño factorial 2<sup>3</sup> más tres réplicas del punto central, realizando 11 pruebas para el análisis de las variables independientes: pH (10.5, 11 y 11.5), dosis de carbón activado (0.5, 3.25 y 6 g/L) y la granulometría (malla 8x20, 6x12 y 4x8) sobre la variable dependiente que es la capacidad de adsorción. Los datos que obtuvo se ajustaron al modelo de la isoterma de Freundlich y la adsorción máxima de acuerdo a la muestra eficiente de 64.76% fue de 0.74 mgAu/g de carbón activado.

## CAPITULO III

### III. HIPOTESIS Y VARIABLES

#### 1. Hipótesis

##### a. Hipótesis general

Se puede realizar el proceso de adsorción de cloro residual del agua potable de la red de Santa Ana del Cusco con carbón activado a partir de la madera de eucalipto.

##### b. Hipótesis nula ( $H_0$ )

La pendiente de la línea de regresión es igual a cero, lo que indica que no hay una relación significativa entre la concentración inicial de cloro residual y la cantidad de cloro residual adsorbido por el carbón activado.

$$H_0: \beta_1 = 0$$

##### c. Hipótesis alternativa ( $H_1$ )

La pendiente de la línea de regresión no es igual a cero, lo que sugiere que hay una relación significativa entre la concentración inicial de cloro residual y la cantidad de cloro residual adsorbido por el carbón activado.

$$H_1: \beta_1 \neq 0$$

##### d. Hipótesis específica

- La red de distribución de agua potable de Santa Ana en Cusco tiene una concentración de cloro residual mayor a las establecidas por los parámetros de la OMS.
- El carbón activado obtenido a partir de la madera de eucalipto por diferentes condiciones presentara diferentes propiedades de adsorción
- El carbón con más eficiencia en el proceso de adsorción será el de la muestra en la cual se utilizó mayor sustancia activante.
- La isoterma que se logra ajustar a los datos obtenidos en la adsorción física de cloro es será la del modelo de Freundlich.

## **2. Identificación de variables e indicadores**

### **2.1. Variables independientes**

- Temperatura de carbonización (°C)
- Concentración de sustancia activante (g/mL)
- Tiempo de impregnación (minutos)

### **2.2. Variables dependientes**

- Adsorción de cloro por el carbón activado (mg Cl/L)

## CAPITULO IV

### IV. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 1. **Ámbito de estudio**

El ámbito de estudio será la red de agua potable tratada que se distribuye a la ciudad de Cusco de la planta de tratamiento de Santa Ana.

#### 2. **Lugar de ejecución**

La investigación se realizó en los ambientes de:

- Laboratorio de Cuero y Peletería de la Facultad de Ingeniería de Procesos – Escuela Profesional de Ingeniería Química donde se realizó el proceso químico de carbonización de la madera de eucalipto.
- Laboratorio de Recursos Orgánicos de Ingeniería de Procesos – Escuela Profesional de Ingeniería Química donde se realizó la obtención de las diferentes muestras de carbón activado.

#### 3. **Tipo y nivel de investigación**

##### 3.1. **Tipo de Investigación**

Investigación de tipo experimental.

##### 3.2. **Nivel de Investigación**

El nivel de investigación es explicativo.

##### 3.2.1. **Nivel explicativo**

Explicar la propiedad adsorbente que obtiene el carbón después de la activación para la debida adsorción de cloro.

#### 4. **Unidad de análisis**

Partículas de carbón activado.

#### 5. **Técnicas de selección de muestra**

La investigación no presenta técnicas de selección de muestra, puesto que las muestras realizadas serán de acuerdo con ensayos experimentales determinados.

## 6. Muestra

- La madera de Eucalipto, esta madera es moderadamente densa (0.6 g/cm), se obtuvo en el distrito de San Sebastián, provincia del Cusco, región del Cusco por la ventaja de ser una materia prima oriunda de la región para poder obtener nuestro carbón activado.
- Agua de la red del distrito del Cusco tomada en cuenta ya que es tratada con una gran concentración de cloro (0.6 ppm), hallada con el indicador DPD (dietil-p-fenilen diamina) el cual presenta riesgos para el consumo humano y la industria.

## 7. Materiales, reactivos y equipos

### 8.1. Materiales

- Recipientes de plástico
- Vasos de precipitados
- Bagueta
- Embudo
- Papel filtro watman #42
- Probeta de 1000mL
- Pipeta
- Tubos de ensayo
- Gradilla
- Guantes
- Crisol
- Matraz
- Tamices (#malla 6, 8)

### 8.2. Reactivos

- Helio
- Agua destilada
- Ácido Fosfórico -  $H_3PO_4$  (85%)
- DPD (dietil-p-fenilen diamina)

### **8.3. Instrumentos de medición**

- Cronometro, Marca CASIO
- Papel indicador de pH, Universal Test Paper 0-14
- Balanza digital, Marca METTLER TOLEDO – SevenGo.
- Balanza de un solo platillo, Marca ALAASA
- Termocupla, Marca CIE-305P

### **8.4. Equipos**

- Horno eléctrico, Marca SINAPTEC
- Deshidratador, Marca MEMMERT
- Estufa, Marca KINTEL - modelo KV45F
- Reactor tubular de hierro negro

## **8. Diseño experimental**

Esta investigación se llevó a cabo con la caracterización de la muestra (madera de eucalipto), procediendo después con la preparación del carbón activado para finalmente realizar las pruebas de adsorción para precisar la capacidad de adsorción de cloro con carbón activado a partir de la madera de eucalipto.

### **9.1. Caracterización de la muestra (madera de eucalipto)**

Los siguientes procedimientos fueron utilizados para poder determinar los porcentajes de: humedad, materia volátil y ceniza.

#### **9.1.1. Determinación de humedad**

- Se obtiene muestras de aserrín de madera de eucalipto y se preselecciona en tamaños más reducidos utilizando un tamiz de malla #8.
- Se utilizó crisoles secos y cada uno de 100 g de aserrín.
- Los crisoles son colocados en la estufa a una temperatura de 100°C por 1 hora.
- Estando secas las muestras, se les coloca en un desecador hasta lograr enfriarlos y pesarlos.

- Por último, calcular el porcentaje de la humedad en la cual emplearemos la Ecuación 2.14.

### **9.1.2. Determinación de materia volátil**

- Se toma una muestra de uno de los ensayos anteriores y se colocó en el horno a 700°C durante unos 20 min.
- Se saca la muestra, para enfriarlo en el desecador y así poder pesarlo.
- Luego se procede a calcular el porcentaje de material volátil con ayuda de la Ecuación 2.15.

### **9.1.3. Determinación de cenizas**

- Se selecciona otro crisol con muestra para ser llevado al horno a una temperatura de 700°C durante aproximadamente 1 hora.
- Luego la muestra se logra secar y enfriar en el desecador para luego pesarlo.
- Por último, se hace el paso de calcular el porcentaje de cenizas con ayuda de la Ecuación 2.16.

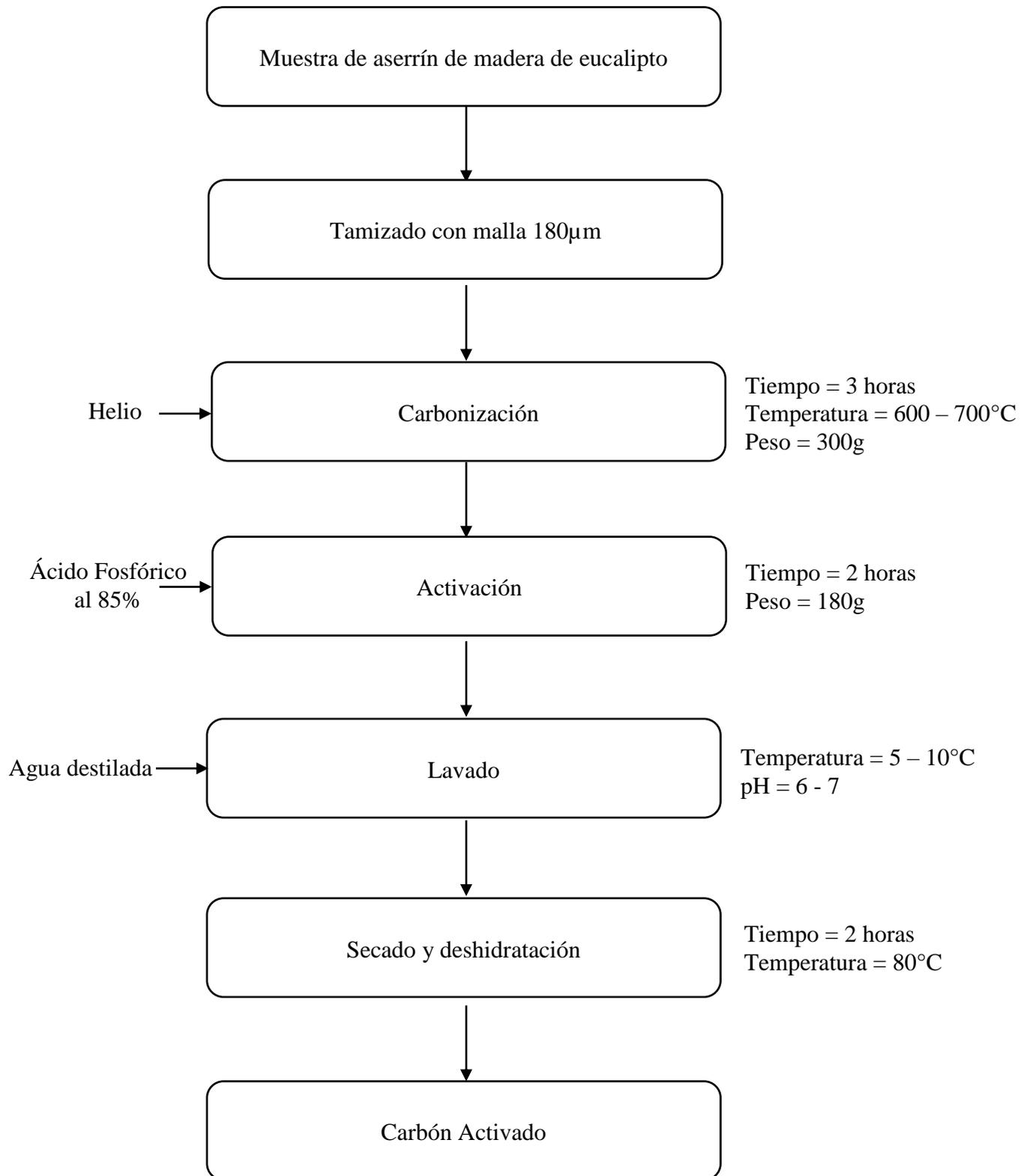
### **9.1.4. Determinación de carbón fijo**

- La forma de calcular el carbón fijo se determinó utilizando la Ecuación 2.17.

Se muestra el siguiente diagrama de flujo en el cual se logra observar la preparación del carbón activado.

**Figura 8**

*Diagrama de flujo de la preparación del carbón activado*



## **9.2. Preparación del carbón activado**

Para la activación del carbón de la madera de eucalipto la mejor manera es procediendo al acondicionamiento de acuerdo con los siguientes procedimientos: triturar la muestra obteniendo aserrín de madera de eucalipto, seguidamente pesar para tres diferentes temperaturas la cantidad de 100 g para su debida carbonización a diferente temperatura (Paredes, 2011). Después de la obtención del aserrín de madera de eucalipto se realiza las siguientes etapas:

### **9.2.1. Selección de la materia prima**

En el proceso de preparación del carbón activado, se lleva a cabo una selección de la materia prima, optando por utilizar madera de eucalipto como fuente de carbono. Esta elección se basó en una evaluación de diversas opciones, y se decidió recolectar la madera de eucalipto en el sector de la provincia de Cusco, específicamente en el distrito de San Sebastian. La decisión de utilizar madera de eucalipto se respaldó en su abundancia en la región, lo que garantizaba un suministro constante y sostenible de materia prima.

### **9.2.2. Aserrado**

La operación de aserrado cumple un papel esencial al cortar la madera de eucalipto, generando aserrín con partículas de tamaño reducido. Esto resulta fundamental para facilitar la impregnación del activante y mejorar la superficie de adsorción, ya que las partículas más pequeñas ofrecen una mayor eficacia en el proceso de activación (Asimbaya et al., 2015).

### **9.2.3. Tamizado**

La operación de tamizado como método físico a pesar de ser usado para separar mezclas se utilizó en este caso para seleccionar y separar un rango de tamaño específico, el cual era necesario para facilitar la carbonización y así tener un área mucho más grande para la adsorción (Asimbaya et al., 2015).

#### **9.2.4. Carbonización**

Es un proceso químico en el cual el aserrín de madera de eucalipto con el tamaño de partícula ya clasificado se carboniza a tres temperaturas diferentes 600, 650 y 700°C en el cual se utilizó un reactor pequeño de metal de 30 cm de diámetro y 60 cm de largo, elaborado personalmente para contener el material y carbonizar; el reactor con el material se coloca dentro de un horno con la capacidad de llegar a temperaturas muy elevadas (el horno mufla industrial tiene un control de temperatura de manera eléctrica alcanzando la temperatura deseada), el cual respecto a cada temperatura de experimentación el material a carbonizar se mantiene alrededor de 3 horas para cada muestra de 100 g a diferente temperatura. (Paredes, 2011)

#### **9.2.5. Impregnación y activación**

La impregnación y activación se realizó con una solución de ácido fosfórico al 85% ( $H_3PO_4$ ) para cada muestra a diferentes condiciones de temperatura, concentración de la solución activante y el tiempo de impregnación con el carbón de aserrín de eucalipto (Paredes, 2011), la impregnación se realizó utilizando 3 niveles diferente de 0.2, 0.35 y 0.5 g por mililitro de agua destilada.

#### **9.2.6. Molienda**

Durante la etapa de molienda, se persigue la reducción adicional del tamaño de las partículas. Además, se enfoca en liberar las partículas que podrían haber quedado adheridas a otras debido al proceso de impregnación (Asimbaya et al., 2015).

#### **9.2.7. Lavado y secado**

En la operación de lavado se utiliza 250 mL de agua destilada por cada muestra, en total alrededor de 7 L para toda la muestra de carbón ya impregnado con el ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ), a una temperatura ambiente de 14°C con agitación constante para llegar al objetivo de tener un pH neutro en la solución de lavado, en total se realizó 4 lavados por cada muestra de 3.5 g de carbón impregnado pasando por papel filtro en cada

lavado (Paredes, 2011). En la operación de secado se realiza con las muestras de carbón activado húmedas después del lavado, estas muestras identificadas y seleccionadas por las diferentes condiciones que se preparó son colocadas de forma ordenada en la estufa a una temperatura de 55°C por 2 horas (Paredes, 2011).

Finalmente, se obtiene las muestras de carbón activado preparados a diferentes condiciones en las cuales: la temperatura de carbonización (600, 650 y 700°C), la concentración de sustancia activante (0.2, 0.35 y 0.5 g/mL) y el tiempo de impregnación varía (30, 60 y 90 minutos).

**Tabla 10**

*Cuadro de resumen en el proceso de lavado y secado*

<b>Operación</b>	<b>Lavado</b>	<b>Secado</b>
<b>Cantidad de agua</b>	250 mL por muestra, 7 L para muestra completa	20% de agua en relación al peso de la muestra
<b>Temperatura</b>	14°C (temperatura ambiente)	55°C
<b>Agitación</b>	Agitación constante	Sin agitación
<b>Número de lavados</b>	4 lavados por cada muestra de 3.5 g de carbón	0 lavados
<b>Resultado del lavado</b>	pH neutro en la solución de lavado	Las muestras quedan húmedas
<b>Muestras de carbón</b>	Muestras de carbón impregnado con H3PO4	Muestras de carbón activado húmedas
<b>Tiempo de secado</b>	5 min por lavado a 18°C	2 horas a 55°C
<b>Condiciones variadas</b>	Temperatura de carbonización (600, 650, 700°C); Concentración de sustancia activante (0.2, 0.35, 0.5 g/mL); Tiempo de impregnación (30, 60, 90 minutos)	No se mencionan en la operación de secado
<b>Resultado final</b>	Muestras con pH neutro	Muestras de carbón activado secas listas para su análisis posterior

### **9.3. Caracterización del carbón activado**

#### **9.3.1. Porcentaje de humedad**

La humedad contenida se determinó según a la norma ASTM (ASTM-2867, 2014)

- En un recipiente de plástico se pesó 3.5g de muestra de carbón activado.
- Se llevó a la mufla a una temperatura de 50°C.
- Luego se procedió a secar por 5 horas y se realizó el pesado.

Luego se calculó el porcentaje que pueda presentar de humedad con la Ecuación 2.14.

#### **9.3.2. Porcentaje de ceniza**

La ceniza contenida se determinó según a la norma ASTM (ASTM-2866, 2014)

- Se colocó la muestra de carbón activado en el horno a una temperatura de 600°C durante 3 horas.
- Luego se procedió a realizar el pesado.

Luego se calculó el porcentaje de ceniza que pueda presentar con la Ecuación 2.16.

#### **9.3.3. Densidad aparente**

La densidad aparente se utilizó empleando el siguiente procedimiento (Barazorda & Lima, 2019):

- La muestra resultante se colocó en una probeta hasta enraizar 10mL (volumen que ocupa la muestra), seguidamente se pesó la cantidad de muestra en una balanza analítica.
- El valor de la densidad aparente se halló utilizando la Ecuación 2.11.

#### **9.3.4. Densidad real**

La densidad real fue determinada utilizando el siguiente procedimiento (Barazorda & Lima, 2019)

- Se hizo el uso de una fiola de 250 mL el cual fue pesado en una balanza analítica.
- Se realizó el pesado de 5g de muestra de carbón activado utilizando la balanza analítica.
- La muestra obtenida lo colocamos dentro de la fiola de 250 mL, luego se agregó agua destilada hasta llegar a la mitad de su volumen (alrededor de 100 mL), se agito y luego se dejó reposar durante todo un día.
- Luego se realizó el pesado de la muestra.

El valor de la densidad real se obtuvo utilizando la Ecuación 2.12.

### **9.3.5. Porcentaje de porosidad**

El porcentaje de porosidad se da como fracción del volumen de la muestra en que el poro o espacio vacío ocupa y para hallar el porcentaje de porosidad se utiliza los datos obtenidos de la densidad aparente y la densidad real, y el cálculo se halló utilizando la Ecuación 2.13.

### **9.3.6. pH**

La determinación de pH del carbón activado se realizó según la bibliografía obtenida por: (Barazorda & Lima, 2019).

- Se peso 3.5 g de carbón activado en un vaso precipitado y se le añadió 100mL de agua destilada, luego se reposo durante unos 10 minutos para finalmente separar la solución generada del carbón activado con el agua destilada utilizando papel filtro.
- Finalmente, la solución separada fue medida el pH por el papel indicador.

## **9. Técnicas de recolección de información**

### **9.1. Obtención de carbón activado**

#### **En la carbonización de la madera**

- Se realizó la carbonización en 3 diferentes temperaturas (600°C, 650°C y 700°C) y la medición se realizará con un termostato el cual es parte del horno.

### **9.2. Impregnación del carbón activado con la sustancia activante**

#### **En la concentración de la sustancia activante con el carbón obtenido**

- Se distribuirá 3 mediciones (por medición en tubos de ensayo) para la concentración de la sustancia activante (0.2, 0.35 y 0.5 g por mililitro de agua destilada) para proceder con la etapa de impregnación y activación del carbón activo.

#### **En la impregnación de la sustancia activante con el carbono**

- Se debe tomar 3 diferentes tiempos de contacto (30 min, 1 hora y 1h30min) entre la sustancia activante y el carbono el cual se medirá con un simple cronometro.

#### **Proceso de adsorción de cloro con el carbón activado**

- Cantidad de cloro adsorbido identificado por colorimetría en ayuda de la sustancia (DPD)

#### **Determinación de isotermas**

- Ajustes a los modelos de Langmuir y Freundlich

## **10. Diseño experimental**

En el proceso de fabricación de carbón activado, se implementa un diseño factorial  $3^3$  que incorpora tres variables, cada una con tres niveles distintos, junto con la inclusión de dos réplicas para una comparación más exhaustiva de los resultados. Al enfocarnos en la adsorción de cloro mediante el carbón activado derivado de la madera de eucalipto, se toman en cuenta las siguientes variables clave:

- Temperatura de carbonización (°C)
- Concentración de sustancia activante (mL/mg)
- Tiempo de impregnación (Minutos)

Y cada una de las variables con tres diferentes niveles y sus dos replicas respectivamente como se presenta ver en la Tabla N°11.

**Tabla 11**

*Número de réplicas de cada muestra por diferente condición*

<b>TEMPERATURA DE CARBONIZACIÓN (°C)</b>	<b>CONCENTRACIÓN DE H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (g/mL)</b>	<b>TIEMPO (minutos)</b>	<b>N° DE REPLICAS</b>
600	0.2	30	2
		60	2
		90	2
	0.35	30	2
		60	2
		90	2
	0.5	30	2
		60	2
		90	2
650	0.2	30	2
		60	2
		90	2
	0.35	30	2
		60	2
		90	2
	0.5	30	2
		60	2
		90	2
700	0.2	30	2
		60	2
		90	2
	0.35	30	2
		60	2
		90	2
	0.5	30	2
		60	2
		90	2

Según la Tabla N°8 de la matriz de diseño experimental se puede resumir en la Tabla N°11 factores y sus respectivos niveles en los cuales se realizó los ensayos de adsorción, teniendo:

- A, B, C son los factores de: Temperatura, concentración de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, tiempo

- Los valores -1, 0, +1: Representan los niveles bajos, medios y altos de cada factor, respectivamente.

### **10.1. Ensayo de adsorción de cloro**

Antes de realizar el uso del carbón activado preparado se procedió hacer los siguiente:

- Se lavó con agua destilada cada muestra de carbón activado preparado a diferentes condiciones.
- Se utilizó papel tornasol para medir el pH de la solución generada después del lavado con agua destilada, el cual nos indicó un pH neutro alrededor de (7 y 8).
- Una vez terminado el proceso de lavado, la medición de pH y la determinación de cloro residual presente el agua de red potable se empezó a realizar cada ensayo de adsorción de cloro residual del agua potable.

#### **10.1.1. Determinación de los parámetros del agua potable con cloro residual más influyentes en la adsorción**

Se determinaron los parámetros existentes en el agua potable con cloro residual que más influyen en la adsorción de cloro como: temperatura de carbonización, concentración de sustancia activante y tiempo de impregnación de nuestro carbón activado con nuestra sustancia activante.

##### **a. Determinación de la concentración de cloro de la red de agua potable**

Para determinar la concentración de cloro se tomó 30 mL de solución de agua potable con cloro residual en vasos de precipitados de 50 mL, se analizó la cantidad de cloro residual presente en el agua potable con un indicador llamado DPD (N, N Dietil paradenilendiamina) el cual por el método de colorimetría determina la cantidad de cloro residual presente en las muestras de agua de red potable de la ciudad del Cusco. Las muestras se recolectaron y analizaron en el Laboratorio de

Recursos Orgánicos de la Facultad de Ingeniería de Procesos, perteneciente a la Escuela Profesional de Ingeniería Química.

### 10.1.2. Ensayo de cinética de adsorción

Para determinar la cinética de adsorción se realiza los siguientes pasos:

- Se tomó la muestra de carbón activado con mejor adsorción de cloro residual.
- El carbón activado se puso en contacto con 50 mL de la solución de agua potable con cloro residual hasta alcanzar el equilibrio de adsorción.
- Seguidamente se tomaron los datos de adsorción cada 2 minutos hasta llegar al tiempo de equilibrio de la adsorción de cloro residual con el carbón activado de la madera de eucalipto.
- Luego de encontrar el equilibrio de adsorción se evaluó la cinética de adsorción de los modelos de pseudo primer y segundo orden.

**Tabla 12**

*Matriz para la elaboración de los modelos de la cinética de adsorción*

Tiempo (min)	C <sub>f</sub> (mgCl/L)	q <sub>t</sub> (mg/g)	% Adsorción
0			
2			
4			
6			
8			
10			
12			
14			

La capacidad de adsorción se determinó utilizando la siguiente ecuación mostrada (Barazorda & Lima, 2019).

$$q_t = \frac{(C_f - C_i)V}{p} \dots\dots\dots 4.1$$

Donde:

- $q_t$ : Capacidad de adsorción (mg/g)
- $V$ : Volumen fijo de solución de agua con cloro residual (L)
- $C_i$ : Concentración de cloro inicial de la solución (mg/L)
- $C_f$ : Concentración de cloro final de la solución (mg/L)
- $p$ : Peso del carbón activado (g)

Para determinar los modelos matemáticos de cada cinética de adsorción se ajustaron los datos obtenidos experimentalmente a los modelos descritos en la Ecuación N°2.7 y N°2.9.

## 10.2. Determinación de la isoterma de adsorción

Para determinar la isoterma de adsorción de Langmuir, Freundlich y Lineal se siguió el siguiente procedimiento (Barazorda & Lima, 2019):

- Se selecciono el carbón más eficiente generado de acuerdo con su temperatura de carbonización, tiempo de impregnación y cantidad de sustancia activante.
- Se realizo el pesado de 8 muestras (2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 y 16g)
- Se puso cada muestra pesada de carbón activado respectivamente en contacto con una muestra de 200 mL de agua con cloro residual.
- El tiempo de adsorción para cada ensayo (adsorbente más solución de agua con cloro residual) fue de 14 minutos.

**Tabla 13**

*Matriz para la elaboración de las isotermas de adsorción*

Muestra	Carga (g)	$C_f$ (mgCl/L)	$q_t$ (mg/g)	% Adsorción
1	2			
2	4			
3	6			
4	8			
5	10			
6	12			
7	14			
8	16			

El valor de “ $q_t$ ” se determinó utilizando la Ecuación 4.1. Los resultados obtenidos en la experimentación de cada una de las isothermas se correlacionaron con los modelos matemáticos de las isothermas de Freundlich, Langmuir y Lineal.

### **11. Técnicas de análisis e interpretación de la información**

- Análisis de varianza (ANOVA de tres factores) de los datos obtenidos, para analizar el efecto de tres factores categóricos (variables independientes) en una variable continua (variable dependiente), también para conocer las interacciones entre los factores, lo que significa que el efecto de un factor puede depender del nivel de otro factor.
- Análisis experimental (evaluar datos recopilados en estudios científicos y experimentos)

### **12. Técnicas para demostrar la verdad o falsedad de las hipótesis planteadas**

- Análisis de varianza (ANOVA) para un análisis de regresión de los datos obtenidos, para evaluar la relación entre una variable dependiente continua y una o más variables predictoras continuas.
- Se analiza la cantidad de cloro residual presente en el agua potable con el indicador llamado DPD (N, N Dietil paradenilendiamina)

## CAPITULO V

### V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 1. Determinación de la concentración de cloro residual del agua potable de la red de Santa Ana del Cusco

La cantidad de cloro residual presente en el agua potable que proviene de la red de agua de Santa Ana del Cusco fue medida por colorimetría utilizando el indicador llamado DPD (N, N dietil-p-fenilendiamina) el cual mediante 4 ensayos cada uno con 20 mL de agua se midió el cloro usando el indicador DPD de 5 g para cada uno de ellos obteniendo los siguientes resultados:

**Tabla 14**

*Resultados de la concentración de cloro residual en el agua potable*

<b>Muestra</b>	<b>Concentración de Cloro (mg/L)</b>
<b>1</b>	0.59
<b>2</b>	0.61
<b>3</b>	0.62
<b>4</b>	0.58

#### 2. Caracterización de la muestra (Madera de eucalipto)

**Tabla 15**

*Resultados de la caracterización de la muestra de aserrín de madera de eucalipto)*

<b>Muestra</b>	<b>% Humedad</b>	<b>% Materia volátil</b>	<b>% Cenizas</b>	<b>% Carbón fijo</b>
<b>1</b>	15.42	62.42	0.051	22.109
<b>2</b>	13.90	68.31	0.046	17.744
<b>3</b>	18.32	66.35	0.048	15.282
<b>PROMEDIO</b>	<b>15.88</b>	<b>65.693</b>	<b>0.0483</b>	<b>18.378</b>
<b>Cáscara de castaña</b>	9.92	84.21	0.84	5.03

La Tabla N°15 muestra que la madera de eucalipto procedente de la Región y departamento del Cusco, por experimentación de las 3 muestras presenta un promedio 18.378% de carbón fijo y es el más alto en comparación de los materiales precursores estudiados por (Barazorda & Lima, 2019), la cual indica que el carbón activado a partir del aserrín de madera de eucalipto es un buen material precursor aceptable para la obtención de carbón activado.

El promedio de contenido de ceniza determinada y presente en la tabla es de 0.0483% mucho más bajo a los datos obtenidos por (Barazorda & Lima, 2019), el cual no da a aceptar la preparación de carbón activado.

El promedio de materia volátil presente en las muestras para la carbonización es una cantidad menor a los datos obtenidos por (Barazorda & Lima, 2019), y se interpreta que el aserrín de madera de eucalipto tiene mayor área superficial en su transformación en carbón activado.

El promedio humedad que se determinó en el proceso de carbonización es de 15.88% el cual indica un porcentaje mucho mayor a lo obtenido por (Barazorda & Lima, 2019), el cual da a entender que la madera de eucalipto de las muestras es un buen precursor para la obtención de carbón activado, aunque tenga una cantidad mayor de humedad.

### 3. Caracterización del carbón activado obtenido

**Tabla 16**

*Resultados de la caracterización del carbón activado*

Muestra	% Humedad	% Cenizas	Densidad aparente (g/cc)	Densidad real (g/cc)	% Porosidad	pH
1 (600°C)	2.5	3.34	0.5417	1.252	56.7332	8
2 (650°C)	2.3	3.15	0.5312	1.261	57.8747	8
3 (700°C)	2.35	3.04	0.5131	1.278	59.8513	8
<b>PROMEDIO</b>	<b>2.3833</b>	<b>3.176</b>	<b>0.5286</b>	<b>1.2636</b>	<b>58.1530</b>	<b>8</b>
Cascara de castaña	3.71	23.4	0.43	1.12	61.6	9
Carbón activado comercial	5	2	0.54	-	80	9-10

Según (Barazorda & Lima, 2019); el porcentaje de humedad, cenizas, porosidad y pH son valores más altos a comparación del carbón activado obtenido a partir de la madera de eucalipto, lo que hace suponer a que no se tuvo un mayor control de estos parámetros, pero con relación a la densidad aparente o real se tienen unos valores bajos lo cual se asume que el material utilizado genera este tipo de resultados. Teniendo en cuenta la característica de humedad se deduce que el carbón activado a partir de la madera de eucalipto presenta menores espacios libres que el carbón activado de la cascara de castaña y el del carbón activado comercial.

Según (Ruiz, 2018); la humedad aumenta cuando se aumenta la razón de impregnación, el origen de las cenizas está relacionado con las reacciones que se dieron entre el precursor y el  $H_3PO_4$ , ya que se forman especies fosfato y polifosfato, que se incorporan a la matriz del carbón a través de enlaces C-O-P y no se eliminan con el proceso de lavado, también nos menciona que la activación química con  $H_3PO_4$ , presentan pH ácidos, pero esta característica puede ser modificada por el constante lavado con agua destilada.

El carbón activado a partir de la madera de eucalipto no logró presentar un alto grado de cenizas (debido a que en el proceso de carbonización se inyectó helio) con respecto al carbón activado a partir de la cascara de castaña, pero no difiere con respecto al carbón comercial, este valor nos indica que la gran mayoría de sustancias orgánicas se transformaron en carbón. La densidad aparente de carbón activado a partir de la madera de eucalipto presente en la Tabla N° 16 no difiere significativamente con la densidad presentada en la obtención de carbón activado a partir de la cascara de castaña y con el carbón comercial.

En el porcentaje de porosidad para el carbón obtenido de la madera de eucalipto resultó una cantidad más baja que los datos obtenidos por el carbón comercial y el carbón obtenido a partir de la cascara de castaña como se muestra en la Tabla N° 16.

#### **4. Ensayos de adsorción con el carbón activado generado a partir de la madera de Eucalipto**

En este proceso de investigación en el cual se involucra el uso del carbón activado el cual se obtuvo a partir de la madera de eucalipto como proceso de

adsorción, se procede con la realización de pruebas para poder evaluar la capacidad de este material para retener o eliminar lo que es el cloro residual del agua potable de la red de Santa Ana del Cusco. Las pruebas son diseñadas para evaluar la eficacia del carbón activado a partir de la madera de Eucalipto como agente de adsorción en diferentes condiciones.

#### 4.1. Primera réplica de ensayo de adsorción

**Tabla 17**

*Resultados de la primera réplica de adsorción de cloro con carbón activado a partir de la madera de eucalipto*

TEMPERATURA DE CARBONIZACIÓN (°C)	CONCENTRACIÓN DE H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> (g/mL)	TIEMPO (minutos)	C <sub>f</sub> (mgCl/L)
600	0.2	30	0.05
		60	0.05
		90	0.04
	0.35	30	0.05
		60	0.04
		90	0.04
	0.5	30	0.04
		60	0.03
		90	0.03
650	0.2	30	0.03
		60	0.03
		90	0.02
	0.35	30	0.01
		60	0.01
		90	0.02
	0.5	30	0.01
		60	0.01
		90	0.02
700	0.2	30	0.02
		60	0.02
		90	0.02
	0.35	30	0.02
		60	0.01
		90	0.01
	0.5	30	0.01
		60	0.00
		90	0.01

La Tabla N°17 muestra los resultados de la primera réplica de la adsorción de cloro con carbón activado a partir de la madera de eucalipto en diferentes condiciones de temperatura de carbonización, concentración de ácido fosfórico y tiempo. Los resultados se presentan en términos de la concentración final de cloro en solución ( $C_f$ ) en mg Cl/L.

En general, se observa que a medida que se aumenta la temperatura de carbonización y se disminuye la concentración de  $H_3PO_4$ , se obtiene una mayor capacidad de adsorción de cloro. También se observa que el tiempo de contacto no tiene un efecto significativo en la capacidad de adsorción.

A una temperatura de carbonización de 600 °C, se observa que la concentración de  $H_3PO_4$  de 0.2 g/mL y 0.35 g/mL resulta en una capacidad de adsorción similar, con un  $C_f$  final de alrededor de 0.05 mgCl/L a los 30 minutos de contacto. A una concentración de  $H_3PO_4$  de 0.5 g/mL, la capacidad de adsorción mejora y se logra un  $C_f$  final de alrededor de 0.04 mgCl/L.

A una temperatura de carbonización de 650 °C, se observa que la concentración de  $H_3PO_4$  de 0.2 g/mL da como resultado la capacidad de adsorción más baja, con un  $C_f$  final de alrededor de 0.03 mgCl/L. La concentración de  $H_3PO_4$  de 0.35 g/mL y 0.5 g/mL resulta en una capacidad de adsorción similar, con un  $C_f$  final de alrededor de 0.01-0.02 mgCl/L a los 30 minutos de contacto.

A una temperatura de carbonización de 700 °C, se observa que la concentración de  $H_3PO_4$  de 0.2 g/mL y 0.35 g/mL resulta en una capacidad de adsorción similar, con un  $C_f$  final de alrededor de 0.02 mgCl/L a los 30 minutos de contacto. A una concentración de  $H_3PO_4$  de 0.5 g/mL, la capacidad de adsorción mejora y se logra un  $C_f$  final de alrededor de 0.01 mg/Cl.L.

En general, estos resultados sugieren que la temperatura de carbonización y la concentración de  $H_3PO_4$  son factores importantes que afectan la capacidad de adsorción de cloro del carbón activado a partir de la madera de eucalipto.

#### 4.2. Segunda réplica de ensayo de adsorción

**Tabla 18**

*Resultados de la segunda réplica de adsorción de cloro con carbón activado a partir de la madera de eucalipto*

<b>TEMPERATURA DE CARBONIZACIÓN (°C)</b>	<b>CONCENTRACIÓN DE H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (g/mL)</b>	<b>TIEMPO (minutos)</b>	<b>C<sub>f</sub> (mgCl.L<sup>-1</sup>)</b>
600	0.2	30	0.05
		60	0.05
		90	0.04
	0.35	30	0.05
		60	0.04
		90	0.04
	0.5	30	0.04
		60	0.03
		90	0.03
650	0.2	30	0.03
		60	0.03
		90	0.03
	0.35	30	0.01
		60	0.01
		90	0.01
	0.5	30	0.01
		60	0.01
		90	0.00
700	0.2	30	0.02
		60	0.02
		90	0.01
	0.35	30	0.01
		60	0.01
		90	0.01
	0.5	30	0.01
		60	0.00
		90	0.00

En la Tabla N°18 se muestran los resultados de la segunda réplica de adsorción de cloro con carbón activado obtenido a partir de madera de eucalipto. La Tabla N°18 muestra la capacidad de adsorción del carbón activado bajo diferentes temperaturas de carbonización, concentraciones de

H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> y tiempos. Las unidades de medida de la capacidad de adsorción son mg Cl/L.

A una temperatura de carbonización de 600°C, una concentración de 0.2 g/mL de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> y un tiempo de 30 minutos, la capacidad de adsorción fue de 0.05 mg Cl/L. La capacidad de adsorción disminuyó a 0.04 mg Cl/L después de 60 minutos y 90 minutos de adsorción. Para una concentración de 0.35 g/mL de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> y 0.5 g/mL de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, se observó la tendencia de disminución de la capacidad de adsorción a lo largo del tiempo en los tres puntos temporales.

A una temperatura de carbonización de 650 °C, la capacidad de adsorción se mantuvo constante en 0.03 mgCl/L para los tres puntos de tiempo, tanto para concentraciones de 0.2 g/mL como de 0.35 g/mL de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>. A una concentración de 0.5 g/mL, la capacidad de adsorción disminuyó a 0.01 mgCl/L a los 60 minutos ya 0.0001 mgCl/L a los 90 minutos.

A una temperatura de carbonización de 700 °C, la capacidad de adsorción disminuyó con el tiempo para las tres concentraciones de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>. Para una concentración de 0.2 g/mL, la capacidad de adsorción disminuyó de 0.02 mgCl.L<sup>-1</sup> a los 30 minutos a 0.01 mgCl/L a los 90 minutos. Para concentraciones de 0.35 g/mL y 0.5 g/mL, la capacidad de adsorción disminuyó a 0.01 mgCl/L a los 30 minutos ya 0.0001 mgCl/L a los 60 y 90 minutos de adsorción.

Las tablas muestran los resultados de dos experimentos de replicación para la adsorción de cloro usando carbón activado hecho de madera de eucalipto. Los experimentos se realizaron a diferentes temperaturas de carbonización (600, 650 y 700 °C) y diferentes concentraciones de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (0.2, 0.35 y 0.5 g/mL) durante diferentes períodos de tiempo (30, 60 y 90 minutos).

En general, los resultados muestran que la concentración de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> y la temperatura de carbonización tienen un impacto en la adsorción de cloro, mientras que el período de tiempo no parece tener un efecto significativo. Específicamente, una mayor concentración de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> y una mayor temperatura de carbonización tienden a resultar en una mejor adsorción de cloro.

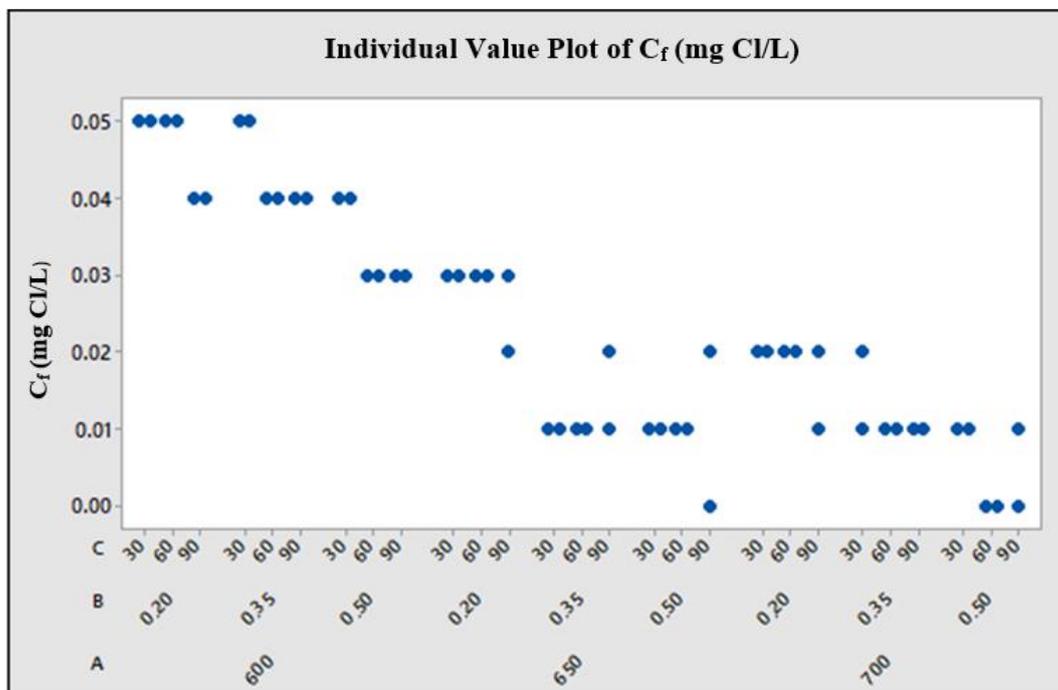
Por ejemplo, a una temperatura de carbonización de 600 °C y una concentración de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> de 0.2 g/mL, la capacidad de adsorción (C<sub>f</sub>) del cloro fue máxima a los 30 minutos (0.05 mgCl/L) y mínima a los 90 minutos (0.04 mg Cl/L). Sin embargo, a una concentración de 0.5 g/mL, la capacidad de adsorción fue máxima a los 60 minutos (0.03 mgCl/L) y mínima a los 90 minutos (0.03 mg Cl/L).

Similarmente, a una temperatura de carbonización de 650 °C y una concentración de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> de 0.2 g/mL, la capacidad de adsorción de cloro fue máxima a los 30 minutos (0.03 mg Cl/L) y mínima a los 90 minutos (0.02 mg Cl/L).

Sin embargo, a una concentración de 0.5 g/mL, la capacidad de adsorción fue máxima a los 30 minutos (0.01 mg Cl/L) y mínima a los 90 minutos (0.0001 mg Cl/L).

**Figura 9**

*Gráfica del valor individual de la concentración final de cada muestra*



En la Figura N°9 se ratifica lo expuesto del análisis que se realizó a partir de las Tablas N°17 y N°18, en este grafica muestra con mayor claridad que la temperatura de carbonización de 650°C y 700°C de la madera de eucalipto son

las que dan un resultado de mayor adsorción y que los niveles de concentración de la sustancia activante de 0.2, 0.35 y 0.5 g/mL el impacto que generan no es tan representativo. Y que el tiempo de impregnación de la sustancia activante con el carbón activado no es notorio., y por tal motivo se podría evaluar el costo de obtención para poder elegir una mejor opción de obtención de carbón activado a partir de la madera de eucalipto. En otras palabras, para lograr una absorción entre los rangos de 0,01 mgCl/L y 0,0001 mgCl/L , los resultados sugieren que una temperatura de carbonización de 650-700 °C y una concentración de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> de 0,35-0,5 g/mL pueden proporcionar las mejores condiciones para adsorber cloro usando carbón activado hecho de madera de eucalipto. Sin embargo, se necesita más experimentación para confirmar estos resultados y optimizar el proceso de adsorción.

**Figura 10**

*Datos obtenidos de análisis de varianza usando el programa MINITAB*

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	26	0.011915	0.000458	27.50	0.000
Linear	6	0.011233	0.001872	112.33	0.000
A	2	0.008937	0.004469	268.11	0.000
B	2	0.002048	0.001024	61.44	0.000
C	2	0.000248	0.000124	7.44	0.003
2-Way Interactions	12	0.000611	0.000051	3.06	0.008
A*B	4	0.000296	0.000074	4.44	0.007
A*C	4	0.000163	0.000041	2.44	0.071
B*C	4	0.000152	0.000038	2.28	0.087
3-Way Interactions	8	0.000070	0.000009	0.53	0.825
A*B*C	8	0.000070	0.000009	0.53	0.825
Error	27	0.000450	0.000017		
Total	53	0.012365			

La Figura N°10 presenta los resultados de un análisis de varianza (ANOVA) para un modelo estadístico que contiene 3 variables independientes, denominadas A, B y C. La variable dependiente no se menciona.

Comparando con (Barazorda y Lima, 2019), en los resultados hallados en el análisis de varianza muestra la prueba de significancia estadística de cada efecto, el cual se puede apreciar que el valor “p” para el pH y la dosis son

menores a 0.05, indicando que estos efectos son significativos en la adsorción de oro, mientras que la granulometría no lo es, ya que el valor “p” es mayor a 0.05, estos datos están dados con un nivel de significancia del 95%.

La tabla ANOVA de la Figura N° 10 muestra la descomposición de la varianza total de los datos en varios componentes, cada uno asociado con una fuente de variación diferente. Las fuentes de variación se denominan "factores" en la terminología de ANOVA y pueden ser variables categóricas o continuas.

La tabla incluye las siguientes columnas:

**a) Fuente:** Enumera las diferentes fuentes de variación en el modelo, que en este caso son los efectos principales de cada variable independiente (Lineal) y sus interacciones (Interacciones de 2 vías e Interacciones de 3 vías).

**b) DF:** Grados de libertad asociados a cada fuente de variación. Estos representan el número de piezas de información independientes disponibles para estimar los parámetros correspondientes.

**c) Adj SS:** Suma de cuadrados ajustada, que mide la cantidad de variabilidad en los datos explicada por cada fuente de variación mientras se tienen en cuenta los efectos de otros factores en el modelo.

**d) Adj MS:** Cuadrado medio ajustado, que se obtiene dividiendo la suma de cuadrados ajustada entre los grados de libertad. Esto representa la cantidad promedio de variabilidad explicada por cada fuente de variación.

**e) Valor *f*:** La relación entre el cuadrado medio ajustado para cada fuente de variación y el cuadrado medio residual, que mide la variabilidad que el modelo no explica. Esta es una medida de cuánto mayor es la variabilidad explicada por un factor en relación con la variabilidad que se esperaría por casualidad.

**f) Valor *p*:** La probabilidad de observar un valor F tan extremo o más extremo que el obtenido, asumiendo que la hipótesis nula (que el factor no explica una cantidad significativa de variabilidad en los datos) es verdadera. Un valor de

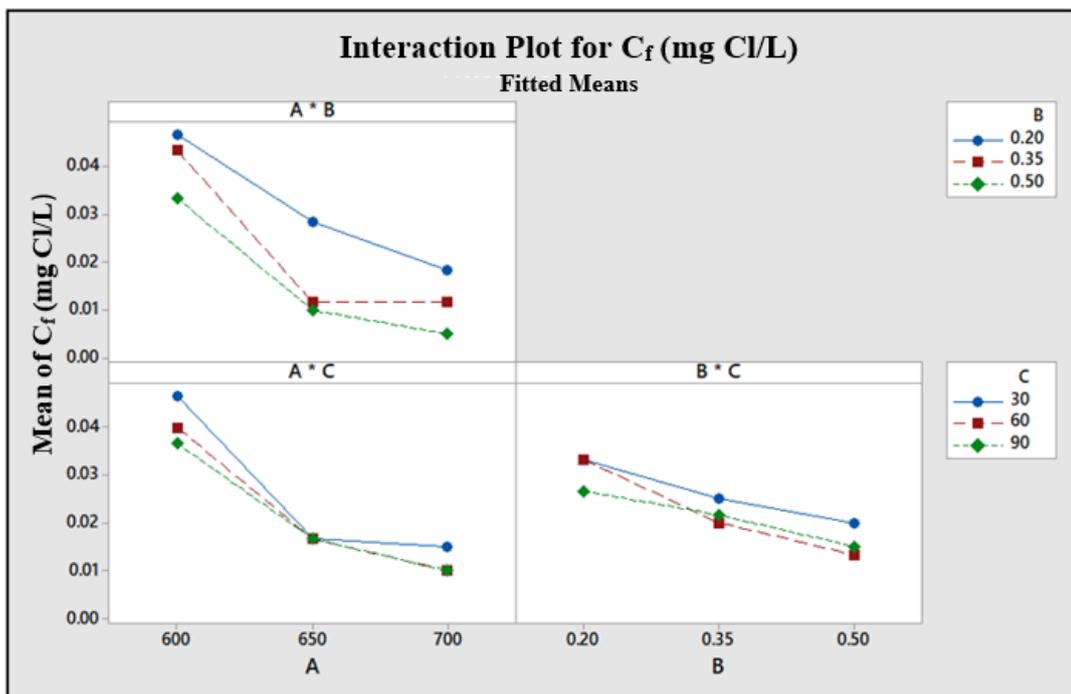
“p” pequeño (normalmente inferior a 0.05) indica una fuerte evidencia en contra de la hipótesis nula.

En esta tabla ANOVA particular, el componente modelo incluye todos los efectos e interacciones principales, mientras que el componente Error representa la variación residual que no puede ser explicada por el modelo. La fila Total representa la variabilidad general de los datos, que es la suma de la variabilidad explicada y no explicada.

Los resultados sugieren que el modelo en su conjunto es altamente significativo ( $p < 0.001$ ), indicando que al menos uno de los factores es un predictor significativo de la variable dependiente. Los efectos principales de A, B y C son todos significativos ( $p < 0.01$ ), así como sus interacciones bidireccionales ( $p < 0.05$ ). Sin embargo, la interacción de 3 vías y todas las interacciones de orden superior no son significativas ( $p > 0.05$ ), lo que sugiere que los efectos de las variables independientes no dependen entre sí de manera compleja.

**Figura 11**

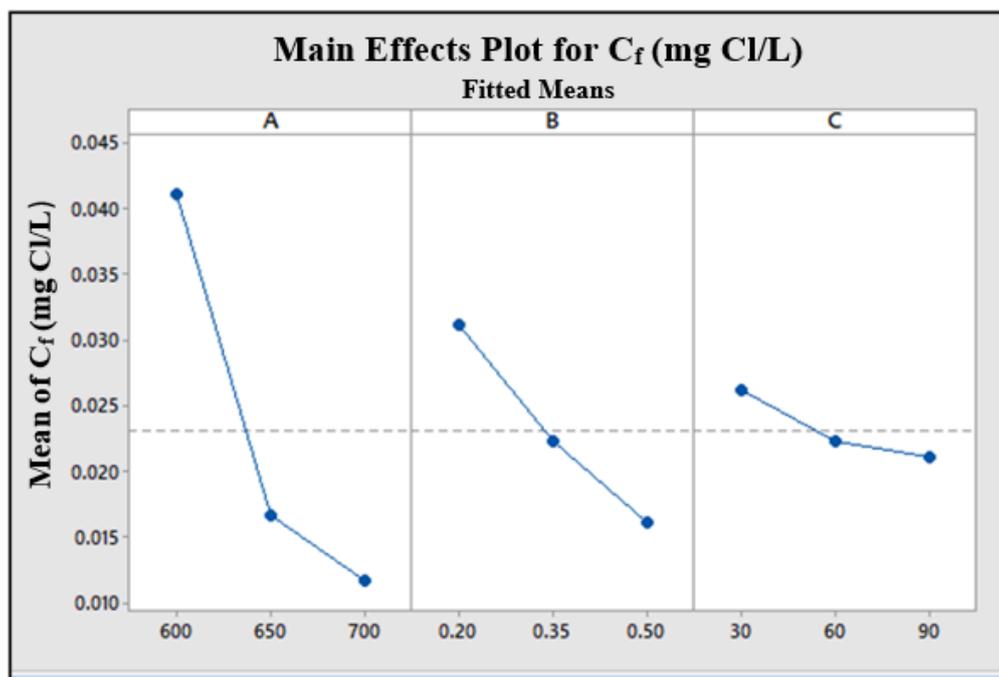
*Gráfica de interacción por la concentración final de cloro en el agua con medias ajustadas con respecto a las variables*



En la Figura N°11 muestra otra de lectura de los resultados con respecto a cada interacción entre las variables en el cual se puede identificar y asegurar que la temperatura es un gran factor para que el carbón activado logre tener un mejor resultado en la adsorción de cloro puesto que para una interacción entre temperatura de carbonización (A) y concentración de sustancia activante (B) el mejor resultado es a 700°C a una concentración de 0.5g/mL, para la segunda interacción de temperatura de carbonización (A) y tiempo de impregnación de la sustancia activante con el carbón activado (C) se logra apreciar que a una temperatura de 700°C y un tiempo de impregnación de 60 y 90 minutos te darán los mismos resultados de adsorción de cloro residual del agua potable., y en la última interacción de concentración de sustancia activante (B) y tiempo de impregnación de la sustancia activante con el carbón activado (C) los resultados no son tan significativos puesto que es aceptable según esa interacción utilizar una concentración de 0.5g/mL de sustancia activante con un tiempo de impregnación de 60 o 90 minutos.

**Figura 12**

*Gráfico de los efectos principales por las variables en la concentración final de cloro con medias ajustadas.*



En la Figura N°12 se puede apreciar que la media de adsorción a causa de la temperatura de carbonización es muy significativa en donde nos indica que la temperatura de 700°C es la más óptima, en la media de adsorción de cloro residual por parte de la variable de concentración de sustancia activante se puede observar que la concentración de 0.5 g/mL es la más recomendable, y en la última variable la cual es el tiempo de impregnación no tiene resultados muy significativos, pero aun así la variable de 90 minutos de impregnación del carbono con la sustancia activante es la más aceptable.

## 5. Cinética de Adsorción

### 5.1. Dosis de partida inicial del adsorbente

La concentración de carbón activado que se toma es la que fue elaborado a una temperatura de carbonización de 700°C, con una concentración de sustancia activante de 0.5 g/mL a un tiempo de impregnación de 90 minutos, el cual presentaba una dosis de carbón activado de 5.7285 g. En este estudio la cantidad de solución de agua potable con cloro residual fue de 50 mL. Para hallar la cinética de adsorción primero, se calcula la cantidad de soluto adsorbido  $q_t$  (mg/g) en diferentes tiempos (t).

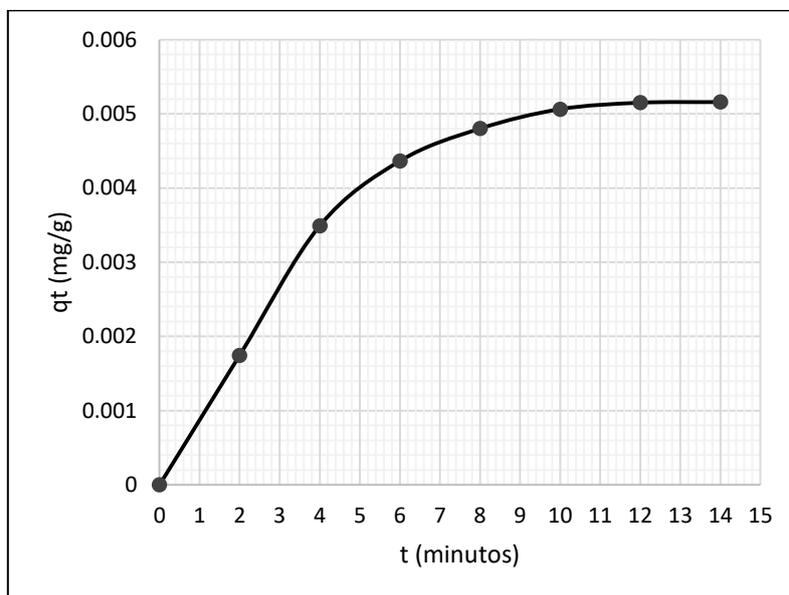
**Tabla 19**

*Resultados de la cinética de adsorción de cloro con la muestra más eficiente de carbón activado*

Tiempo (min)	$C_f$ (mg Cl/L)	$q_t$ (mg/g)	% Adsorción
0	0.6	0	0
2	0.4	0.00174566	33.33
4	0.2	0.00349132	66.67
6	0.1	0.00436414	83.33
8	0.05	0.00480056	91.67
10	0.02	0.00506241	96.67
12	0.01	0.00514969	98.33
14	0.009	0.00515842	98.50

**Figura 13**

*Curva cinética del proceso de adsorción del cloro con la muestra más eficiente de carbón activado.*



Según (Barazorda y Lima, 2019) en la adsorción con carbón activado a partir de la cascara de castaña que se alcanza el equilibrio de adsorción de oro en un tiempo de 3 horas con una capacidad de adsorción de 1.31 mg/g, siendo su eficiencia 62.37%. Después de las tres horas la adsorción empieza a decaer el proceso de adsorción produciéndose una desorción, esto se debe al enlace adsorbente (adsorbato débil), característica de una fisisorción.

Según (Valencia, 2012) en la adsorción del cadmio con carbón activado obtenido a partir de la semilla de aguaje con  $H_3PO_4$  a una temperatura de  $600^{\circ}C$  alcanza su equilibrio de adsorción en 10 minutos con una capacidad de adsorción de 7.28mg/g mientras el carbón obtenido a partir de la semilla de aceituna alcanza valores cercanos al equilibrio en 18 minutos con capacidad de 9.01mg/g.

En la Figura N°13 revela un proceso de adsorción eficiente del cloro, alcanzando valores cercanos al equilibrio en tan solo 14 minutos, con una destacada capacidad de adsorción de 0.00515842 mg/g. Se logra una eficacia del 98.5% en la eliminación de cloro. Tras este período de 14 minutos, la adsorción de cloro se mantiene alrededor del 98.5%.

### 5.1.1. Modelo de pseudo primer orden

**Tabla 20**

*Resultados de la cinética de adsorción de pseudo primer orden*

<b>Tiempo (min)</b>	<b>C<sub>f</sub> (mg Cl/L)</b>	<b>q<sub>t</sub> (mg/g)</b>	<b>ln(q<sub>e</sub>-q<sub>t</sub>)</b>
0	0.6	0	0.001283
2	0.4	0.000696651	0.000587
4	0.2	0.001392817	-0.000109
6	0.1	0.002088499	-0.000805
8	0.05	0.002783697	-0.001501
10	0.02	0.003478412	-0.002197
12	0.01	0.004172643	-0.002893
14	0.009	0.004866391	-0.003589

La Tabla N°20 presenta los resultados del proceso de adsorción siguiendo el modelo de pseudo primer orden, mostrando la relación entre el tiempo, la concentración final de adsorbato en la solución (C<sub>f</sub>), la cantidad de adsorbato adsorbido por el adsorbente en el tiempo específico (q<sub>t</sub>), y el logaritmo natural de la diferencia entre la cantidad de adsorbato en equilibrio (q<sub>e</sub>) y la cantidad adsorbida a tiempo t. A medida que el tiempo avanza, la concentración de cloruro en la solución disminuye de manera significativa, mientras que la cantidad adsorbida por el adsorbente aumenta. La tendencia de ln(q<sub>e</sub> - q<sub>t</sub>) es consistente con el comportamiento de la cinética de pseudo primer orden, donde este valor disminuye de manera progresiva con el tiempo, indicando una adsorción efectiva.

**Tabla 21***Análisis de varianza*

	<b>Grados de libertad</b>	<b>Adj SS</b>	<b>Adj MS</b>	<b>F-Valor</b>	<b>P-Valor</b>
<b>Regresión</b>	1	0.000020	0.000020	24.35	0.003
<b>Tiempo</b>	1	0.000020	0.000020	24.35	0.003
<b>Error</b>	6	0.000005	0.000001		
<b>Total</b>	7	0.000025			

La Tabla N°21 presenta los resultados del análisis de varianza (ANOVA), donde se muestra que la regresión es significativa con un valor "p" experimental de 0.003. Esto indica que existe una relación significativa entre la variable dependiente ( $q_t$ ) y la variable independiente (tiempo).

Para evaluar esta significancia, se calcula el valor F crítico con un nivel de significancia (alfa,  $\alpha$ ) de 0.05 (5%), utilizando  $df_1 = 1$  y  $df_2 = 6$ . El valor F crítico, que se obtiene de una tabla de distribución F, es aproximadamente 6.74. En este contexto, el valor F experimental de 24.35 es considerablemente mayor que el valor F crítico, lo que sugiere una relación o diferencia significativa en el análisis. En consecuencia, los efectos observados son altamente significativos en comparación con la variabilidad aleatoria, y podemos rechazar la hipótesis nula. Estos resultados respaldan la existencia de una relación significativa entre las variables y destacan la importancia de la variable independiente (tiempo) en la predicción de la variable dependiente ( $q_t$ ).

**Tabla 22***Coefficientes*

<b>Término</b>	<b>Coef</b>	<b>Se Coef</b>	<b>T-Value</b>	<b>P-Value</b>	<b>VIF</b>
<b>Constante</b>	0.001283	0.000589	2.18	0.072	
<b>Tiempo</b>	0.000348	0.000070	4.93	0.003	1.00

La Tabla N°22 muestra los coeficientes de regresión que se utilizan para modelar la relación entre una variable dependiente y una o más variables independientes:

- **Constante:** Este es el valor del intercepto cuando la variable Tiempo es cero. En este caso es 0.001283.
- **Tiempo:** Este es el coeficiente de regresión para la variable “tiempo”, la variable predictora (tiempo en este caso). El valor del coeficiente es 0.000348, lo que indica que se espera que la adsorción de cloro aumente en 0.000348 unidades con el tiempo.
- **Error estándar del coeficiente (Se Coef):** Este es el error estándar de los coeficientes e indica la precisión con la que se estimó cada coeficiente.
- **Valor t:** Este es el estadístico t e indica la significación estadística de cada coeficiente. En este caso, un valor de 4,93 para la variable tiempo indica significación estadística al nivel de 0.05.
- **Valor p:** Este es el valor de probabilidad asociado con la estadística t, donde la hipótesis nula (en cuyo caso el coeficiente es igual a cero) es verdadera. En este caso, un valor de 0.003 para la variable tiempo indica que se puede rechazar la hipótesis nula al nivel de 0.05.
- **VIF (Factor de inflación de varianza):** Es una medida de multicolinealidad que indica cuánto se infla la varianza de los coeficientes por las correlaciones entre las variables predictoras. En este caso, la variable tiempo tiene un valor VIF de 1, lo que indica que el modelo no es multicolineal.

**Tabla 23**

*Resumen del modelo de regresión de pseudo primer orden*

<b>S</b>	0.000913114
<b>R-Sq</b>	80.2%
<b>R-Sq(adj)</b>	76.9%
<b>R-sq(pred)</b>	56.29%

- **S = 0,000913114:** es la desviación estándar residual que representa la diferencia entre el valor observado y el valor predicho por el modelo. En

este caso, el valor es 0.000913114 unidades para la variable dependiente ( $q_t$ ), lo que indica una varianza residual relativamente pequeña.

- **R-Sq = 80,2%:** El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de la regresión, que representa el porcentaje de variación total en la variable dependiente ( $q_t$ ) explicada por la variable independiente (tiempo). En este caso, el valor de  $R^2$  es 0.802, lo que indica que el modelo explica el 80.2% de la variabilidad observada en la variable dependiente.
- **R-Sq(adj) = 76,9%:** es el coeficiente de determinación ajustado que tiene en cuenta el número de variables independientes del modelo y ajusta el valor de  $R^2$  para no sobrestimar la bondad del ajuste. En este caso, el valor de  $R^2$  ajustado es 0.769, lo que indica que el modelo continúa explicando gran parte de la variabilidad de la variable dependiente, incluso después de ajustar la cantidad de variables independientes en el modelo.
- **R-sq(pred) = 56.29%:** Este es el coeficiente de determinación pronosticado que indica cuánta variabilidad se espera que el modelo explique con datos nuevos. En este caso, solo el 56.29% de la variabilidad es explicada por el modelo sobre nuevos datos.

En la forma diferencial del modelo matemático para encontrar la velocidad de adsorción de pseudo primer orden que se ajusta a la adsorción de cloro residual con carbón activado de la madera de eucalipto está dado por la Ecuación 2.6 e integrándolo tenemos:

$$\frac{dq_t}{dt} = k_{ad}(q_e - q_t)$$

$$\int_{q_t}^0 \frac{dq_t}{(q_e - q_t)} = k_{ad} \int_t^0 dt$$

$$\ln\left(\frac{(q_e - q_t)}{q_e}\right) = -k_{ad} \cdot t$$

$$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - k_{ad} \cdot t \dots\dots\dots 5.1$$

La ecuación de regresión que se obtuvo para el modelo de pseudo primer orden es:

$$\ln(q_e - q_t) = 0.001283 - 0.000348 \cdot t \dots\dots\dots 5.2$$

Esta ecuación muestra cómo la variable dependiente  $q_t$  (presumiblemente la cantidad de cloro adsorbido en el carbón activado) se relaciona con el tiempo en relación con la variable independiente tiempo (presumiblemente adsorción). El factor de tiempo (0.000348) indica el cambio esperado en  $q_t$  para cada unidad de cambio en el tiempo, y la constante (0.001283) es el valor de  $q_t$  en el tiempo cero.

En la cual comparando con la Ecuación N°2.7 se obtiene las siguientes constantes de la velocidad de adsorción:

- $K_1$ : 0.000348  $\text{min}^{-1}$
- $q_e$  : 1.001283823 mg/g

La adsorción de pseudo primer orden de cloro residual sobre carbón activado a partir de la madera de eucalipto esta presentado por el siguiente modelo matemático:

$$\begin{aligned} \ln(q_e - q_t) &= \ln(q_e) - k_{ad} \cdot t \\ \frac{q_e - q_t}{q_t} &= e^{-k_{ad} \cdot t} \\ q_e - q_t &= q_e \cdot e^{-k_{ad} \cdot t} \\ q_t &= q_e \cdot (1 - e^{-k_{ad} \cdot t}) \dots\dots\dots 5.3 \end{aligned}$$

Con el coeficiente de determinación de pseudo primer orden:

$$R^2 = 0.802 \dots\dots\dots 5.4$$

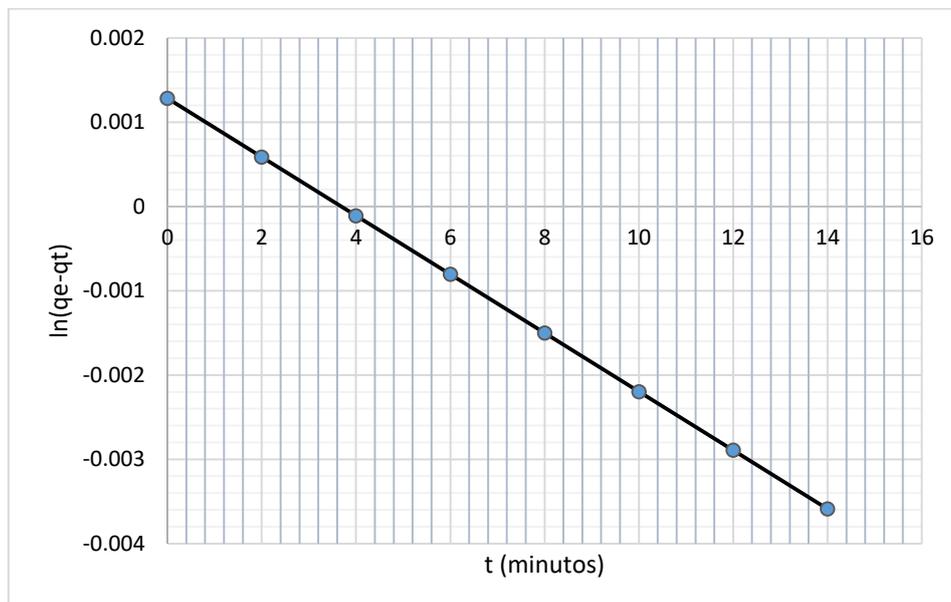
Según (Valencia, 2012), en los parámetros cinéticos de la adsorción aplicando el modelo de pseudo primer orden, tanto en una variación de temperatura e impregnación presentan los valores de los coeficientes de correlación ( $R^2$ ) igual a 0.923 y 0.958 los cuales son valores que se acercan a la unidad, indicando que existe una buena tendencia de la variable dependiente  $q_t$  (cantidad de soluto adsorbido) con respecto al proceso de adsorción de cadmio con carbón activado a partir de las semillas de agujé y aceituna.

Según (Barazorda y Lima, 2019), en los parámetros cinéticos de la adsorción aplicando el modelo de pseudo primer orden, tanto en la variación de temperatura e impregnación utilizando un diseño factorial  $2^3$  manejando diferentes variables independientes como es el pH, dosis de carbón activado y granulometría de este, presenta el valor más alto en el coeficiente de correlación ( $R^2$ ) igual a 0.942 el cual es un valor que se acerca a la unidad, indicando que existe una buena tendencia de la variable dependiente  $q_t$  (cantidad de soluto adsorbido) con respecto al proceso de adsorción de oro de una solución cianurada con carbón activado a partir de la cascara de castaña.

El resultado obtenido por la investigación es de  $R^2=0.802$  lo cual indica que es notablemente más bajo que los de Valencia (2012) y Barazorda y Lima (2019), a lo que se concluye que a pesar que se tenga un ajuste aceptable en la adsorción utilizando carbón activado a partir de la madera de Eucalipto, el proceso de adsorción no llega a tener la misma eficiencia que los resultados que muestran nuestras fuentes bibliográficas, y esto es posible a que se utilizó diferentes características y materia prima que se utilizó para la elaboración de carbón activo.

**Figura 14**

*Correlación de los datos experimentales con el modelo de pseudo primer orden*



En la Figura N°14 se puede explicar la gráfica de  $\ln(q_e - q_t)$  en función del tiempo observando la relación en el contexto de la ecuación de pseudo primer orden:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - k_{ad} \cdot t$$

Podemos concluir que el signo de la columna  $\ln(q_e - q_t)$  es negativo, la tendencia general es una disminución en  $q_e - q_t$  con el tiempo. Esto es esperado en un proceso de adsorción, ya que la concentración de soluto en la fase líquida  $q_t$  tiene a acercarse a la concentración máxima  $q_e$  con el tiempo.

### 5.1.2. Modelo de pseudo segundo orden

**Tabla 24**

*Resultados de la cinética de adsorción de pseudo segundo orden*

Tiempo (min)	C <sub>f</sub> (mgCl/L)	q <sub>t</sub> (mg/g)	t/q <sub>t</sub>
0	0.6	0	0
2	0.4	0.696651	1.14567222
4	0.2	1.392817	1.14569848
6	0.1	2.088499	1.37484132
8	0.05	2.783697	1.66647224
10	0.02	3.478412	1.97534376
12	0.01	4.172643	2.33023735
14	0.009	4.866391	2.71400933

La tabla N°24 presenta los resultados de un proceso de adsorción bajo el modelo de pseudo segundo orden, que describe la cinética de adsorción en función del tiempo. Las variables clave son el tiempo (min), la concentración final de cloruro (C<sub>f</sub>), la cantidad adsorbida por gramo de adsorbente (q<sub>t</sub>), y el cociente t/q<sub>t</sub>, que es característico de la ecuación de pseudo segundo orden.

**Tabla 25***Análisis de varianza*

	<b>Grados de libertad</b>	<b>Adj SS</b>	<b>Adj MS</b>	<b>F-Valor</b>	<b>P-Valor</b>
<b>Regresión</b>	1	160.55	160.552	67.26	0.000
<b>t/gt</b>	1	160.55	160.552	67.26	0.000
<b>Error</b>	6	14.32	2.387		
<b>Total</b>	7	174.87			

La Tabla N°25 de resultados es el resultado de un análisis de regresión que calcula grados de libertad, sumas de cuadrados ajustadas (Adj SS), cuadrados medios ajustados (Adj MS), valores “F” y valores “p”. Esta hipótesis nula es independiente y dependiente variable cuando no hay relación entre La hipótesis alternativa es que existe una relación entre las variables independientes y dependientes.

El valor F experimental con relación al F crítico de 6.74 indica si la relación entre las variables independiente y dependiente es significativa. En este caso, el valor de F experimental es 24.35, lo que indica una relación significativa entre las variables. El valor p es 0.003, lo que indica una probabilidad muy baja de que la relación entre las variables sea aleatoriamente significativa.

Por lo tanto, se puede concluir que existe una asociación significativa entre las variables independientes y dependientes en este análisis de regresión.

**Tabla 26***Coefficientes de regresión lineal*

<b>Termino</b>	<b>Coef</b>	<b>Se Coef</b>	<b>T-Value</b>	<b>P-Value</b>	<b>VIF</b>
<b>Constante</b>	-1.95	1.21	-1.61	0.158	
<b>qe</b>	0.005714	0.000697	8.20	0.000	1.00

La Tabla N°26 indica los coeficientes de una regresión lineal, que se utilizan para modelar la relación entre una variable dependiente y una o más variables independientes.

- **La constante tiene un valor de -1.95.** Este es el valor esperado de la variable dependiente cuando todas las variables independientes son cero. Sin embargo, dado que el valor de P-Value es mayor que 0.05, no se puede afirmar con certeza que este valor sea significativamente diferente de cero.
- **El coeficiente para "t/gt" es 0.005714.** Esto significa que, manteniendo todas las demás variables constantes, una unidad de cambio en "t/gt" se asocia con un cambio de 0.005714 unidades en la variable dependiente. El valor de P-Value es muy pequeño (menor que 0.001), lo que indica que este coeficiente es estadísticamente significativo a un nivel de confianza del 95% (o un nivel de significancia de 0.05).
- **El valor del error estándar del coeficiente (Se Coef),** indica el error estándar asociado con cada coeficiente. Es una medida de cuánto varía el coeficiente de una muestra a otra. Los coeficientes con un error estándar más bajo son más precisos y confiables.
- **El valor de T-Value,** se utiliza para evaluar la significancia estadística de cada coeficiente. Un valor de T-Value alto indica que el coeficiente es significativo y que la probabilidad de que sea significativo por casualidad es baja.
- **El valor de VIF,** se utiliza para evaluar la multicolinealidad entre las variables independientes. Un VIF alto indica que puede haber una correlación fuerte entre esa variable independiente y otras variables independientes en el modelo. Un VIF de 1 indica que no hay multicolinealidad. En este caso, el valor de VIF es 1 para "t/gt", lo que sugiere que no hay problemas significativos de multicolinealidad en el modelo.

En general, estos coeficientes sugieren que la variable "t/gt" tiene una relación significativa con la variable dependiente en este modelo. Sin embargo, sin conocer más detalles sobre el modelo y los datos utilizados, no

es posible hacer una interpretación más precisa o específica de estos coeficientes.

**Tabla 27**

*Resumen del modelo de regresión de pseudo segundo orden*

<b>S</b>	1.54502
<b>R-Sq</b>	91.81%
<b>R-Sq(adj)</b>	90.44%
<b>R-sq(pred)</b>	77.05%

La Tabla N°27 muestra cuatro estadísticos relacionados con el modelo de regresión. Las conclusiones que se pueden sacar de esto son:

- **El primer estadístico es S**, la desviación estándar residual. Esta estadística mide la variabilidad que no puede ser explicada por un modelo de regresión. Un valor más bajo de S indica que el modelo está prediciendo con mayor precisión los valores de la variable dependiente. En este caso, la desviación estándar residual es 1.54502.
- **El segundo estadístico es R-Squared (R-Squared)**, que representa la proporción de variabilidad en la variable dependiente explicada por el modelo de regresión. En este caso, R-cuadrado es 91.81%, lo que indica que el modelo explica gran parte de la variabilidad en la variable dependiente.
- **El tercer estadístico es el R-cuadrado ajustado (R-cuadrado (R-cuadrado(adj)))**. Esto es similar a R-cuadrado, pero con el número de variables en el modelo y el tamaño de la muestra ajustado. R-sq(adj) es 90.44 %, lo que indica que el modelo sigue explicando gran parte de la variabilidad de la variable dependiente incluso después de ajustar estos factores.
- **El cuarto estadístico es el R-cuadrado predicho (R-sq(pred))**. Mide la proporción de variabilidad en la variable dependiente que puede ser explicada por el modelo de regresión cuando se aplican nuevos datos. R-sq(pred) es 77.05 %, lo que indica que el modelo hace un buen trabajo al predecir los valores de la variable dependiente para nuevos datos.

En general, los resultados muestran que el modelo de regresión puede explicar la variabilidad de la variable dependiente y predecir bien los valores de la variable dependiente con nuevos datos.

En la forma diferencial del modelo matemático para encontrar la velocidad de adsorción de pseudo primer orden que se ajusta a la adsorción de cloro residual con carbón activado de la madera de eucalipto esta dado por:

$$\begin{aligned} \frac{dq_t}{dt} &= k_{ad} \times (q_e - q_t)^2 \\ \int_{q_t}^0 \frac{dq_t}{(q_e - q_t)^2} &= k_{ad} \int_t^0 dt \\ \frac{1}{q_e - (q_e - q_t)} - \frac{1}{q_e} &= -k_{ad} \cdot t \\ q_e - q_t + k_{ad} \cdot t \cdot q_t &= 0 \\ (1 + k_{ad} \cdot t) \cdot q_t &= q_e \\ \frac{t}{q_t} &= \frac{1}{k_{ad} \cdot q_e^2} + \frac{1}{q_e} \cdot t \dots\dots\dots 5.5 \end{aligned}$$

La ecuación lineal de velocidad de adsorción de pseudo segundo orden esta dado por:

$$\frac{t}{qt} = -15706 + \frac{t}{0.005714} \dots\dots\dots 5.6$$

La ecuación lineal de velocidad N°5.6 de adsorción de pseudo segundo orden nos muestra la cinética de adsorción de un soluto en una superficie sólida. Esta ecuación que se presenta indica que el tiempo de adsorción dividido por la cantidad de soluto adsorbido en ese momento es igual a una constante negativa (-1.95) más otra constante positiva (0.005714) multiplicada por el tiempo de adsorción.

Esta ecuación puede utilizarse para ajustar los datos experimentales de adsorción y determinar los valores de las constantes de velocidad. En particular, la constante positiva (0.005714) se puede utilizar para calcular la tasa de adsorción en un tiempo específico, mientras que la constante negativa (-1.95) puede ser utilizada para evaluar la cantidad de soluto adsorbido en equilibrio.

- $K$  (g/mg.min<sup>-1</sup>): -1.95
- $q_e$  (mg/g): 0.005714

La adsorción de pseudo segundo orden de cloro residual sobre carbón activado a partir de la madera de eucalipto esta presentado por el siguiente modelo matemático:

$$q_e = \frac{0.05714t}{1.95+t} \dots\dots\dots 5.6$$

Con el coeficiente de determinación de pseudo primer orden:

$$R^2 = 0.9181 \dots\dots\dots 5.7$$

Según (Valencia, 2012), en los parámetros cinéticos de la adsorción aplicando el modelo de pseudo segundo orden, tanto en una variación de temperatura e impregnación presentan los valores de los coeficientes de correlación ( $R^2$ ) igual a 0.99 y 0.99 los cuales se puede decir que son valores idénticos a la unidad, indicando que existe una buena tendencia de la variable dependiente  $q_t$  (cantidad de soluto adsorbido) con respecto al proceso de adsorción de cadmio con carbón activado a partir de las semillas de agujero y aceituna.

Según (Barazorda y Lima, 2019), en los parámetros cinéticos de la adsorción aplicando el modelo de pseudo segundo orden, tanto en una variación de temperatura e impregnación utilizando un diseño factorial  $2^3$  manejando diferentes variables independientes como es el pH, dosis de carbón activado y granulometría de este, presentan el valor más alto en el coeficiente de correlación ( $R^2$ ) igual a 0.963 el cual es un valor que se acerca a la unidad, indicando que existe una buena tendencia de la variable dependiente  $q_t$  (cantidad de soluto adsorbido) con respecto al proceso de adsorción de oro de una solución cianurada con carbón activado a partir de la cascara de castaña.

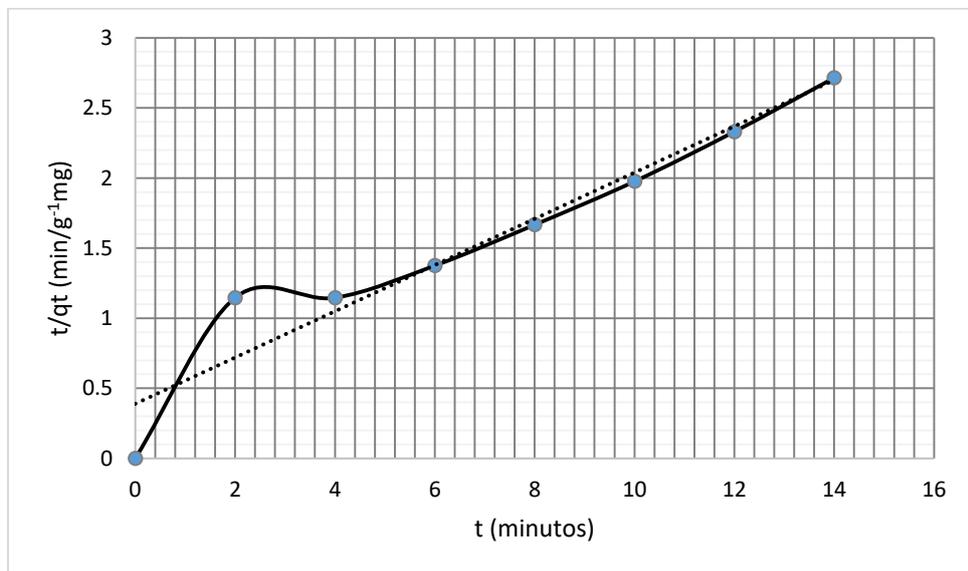
El resultado obtenido por la investigación es de  $R^2 = 0.9181$  es notablemente más bajo que los de Valencia (2012) y Barazorda y Lima (2019), a lo que se concluye que a pesar que se tenga un ajuste aceptable en la adsorción

utilizando carbón activado a partir de la madera de Eucalipto, el proceso de adsorción no llega a tener la misma eficiencia que los resultados que muestran nuestras fuentes bibliográficas, y esto es posible a que se utilizó diferentes características y materia prima que se utilizó para la elaboración de carbón activo. En otras palabras, la cinética del proceso de adsorción predice de mejor manera la tasa de adsorción.

Concluyendo se puede dar la siguiente afirmación en donde el modelo de pseudo segundo orden en comparación con el modelo de primer orden nos da una mejor descripción de la cinética del proceso de adsorción y predecir la tasa de adsorción en función del tiempo. En otras palabras, el mejor modelo de velocidad de adsorción, los mecanismos implicados y el ajuste de datos experimentales es la perteneciente al modelo de pseudo segundo orden debido a los datos obtenidos que son más cercanos a la unidad.

**Figura 15**

*Correlación de los datos experimentales con el modelo de pseudo segundo orden.*



En la Figura N°15 se puede observar una pendiente positiva en la cual indica que la concentración inversa ( $t/q_t$ ) disminuye con el tiempo. Esto es típico en procesos de adsorción, donde la concentración adsorbida tiende a aumentar con el tiempo, también se observa a medida que el tiempo

aumenta, la concentración inversa se acerca a una cierta constante, lo cual podría indicar que el proceso de adsorción se está estabilizando y la cantidad adsorbida se está aproximando a un valor máximo.

Se observa en la Figura N°16 que la pendiente es más pronunciada al principio y disminuye con el tiempo. Esto puede sugerir que la adsorción es más rápida inicialmente y se ralentiza medida que avanza el proceso. Este cambio de pendiente puede indicar un punto de inflexión en la cinética de adsorción, donde la velocidad de adsorción máxima se alcanza y luego disminuye.

## 6. Isotermas de adsorción a partir de los datos experimentales

En la Tabla N°28 se muestran los datos experimentales los cuales fueron obtenidos en los ensayos de adsorción en una muestra de 80 mL.

**Tabla 28**

*Resultados de la matriz isoterma de adsorción*

Muestra	Carga (g)	C <sub>f</sub> (mgCl/L)	q <sub>t</sub> (mg/g)	% Adsorción
1	2	0.3	0.15	50%
2	4	0.2	0.05	75%
3	6	0.2	0.033	83.5%
4	8	0.1	0.0125	87.5%
5	10	0.05	0.005	90%
6	12	0.02	0.0017	91.5%
7	14	0.0	0	99.9999%
8	16	0.0	0	99.9999%

La Tabla N°28 muestra que a mayor carga de carbón activado se logra aumentar el porcentaje de adsorción aumenta, en donde podemos observar que a una carga mayor o igual de 14 g se puede obtener una adsorción máxima de 99.99% en una muestra de 80 mL.

### 6.1. Isoterma Freundlich

Los resultados que se obtienen para la determinación de la isoterma de Freundlich se pueden observar en la Tabla N°29.

**Tabla 29**

*Resultados de la matriz Isoterma de Freundlich*

<b>Carga (g)</b>	<b>C<sub>f</sub> (mgCl/L)</b>	<b>q<sub>t</sub> (mg/g)</b>	<b>ln(C<sub>f</sub>)</b>	<b>ln(q<sub>t</sub>)</b>
2	0.3	0.15	-1.2	-1.89
4	0.2	0.05	-1.609	-2.99
6	0.16	0.0267	-1.832	-3.623
8	0.1	0.0125	-2.302	-4.382
10	0.05	0.005	-2.99	-5.298
12	0.02	0.0017	-3.912	-6.377
14	0.001	7.14x10 <sup>5</sup>	-6.907	-9.54

Realizando la regresión con respecto a ln(C<sub>f</sub>) y ln(q<sub>t</sub>) para hallar las constantes:

**Tabla 30**

*Coefficientes con respecto a la regresión de ln(C<sub>f</sub>) y ln(q<sub>t</sub>)*

<b>Término</b>	<b>Coef</b>	<b>Se Coef</b>	<b>T-Value</b>	<b>P-Value</b>	<b>VIF</b>
<b>Constante</b>	-1.102	0.338	-3.25	0.023	
<b>ln(C<sub>f</sub>)</b>	1.2716	0.0973	13.06	0.000	1.00

La ecuación de regresión viene dada por la siguiente ecuación:

$$y = -1.102 + 1.2716x \dots\dots\dots 5.9$$

Se puede observar en la Tabla N°31 con respecto a la ecuación de regresión, que para la isoterma de Freundlich que el valor de “n” (medida de la intensidad de la adsorción) se obtiene como el inverso del coeficiente asociado a ln(C<sub>f</sub>). Por tanto, “n” sería:

$$n = \frac{1}{1.2716} = 0.786$$

Por otro lado, la intersección en el eje y la constante de Freundlich “K”, se obtiene a partir de la constante de regresión. Po consiguiente el valor de “K” es:

$$K_f = e^{-1.102} = 0.332$$

La isoterma de Freundlich está dada por la Ecuación N°2.1 representado en el siguiente modelo matemático:

$$W = 0.332Cf^{0.781}$$

**Tabla 31**

*Resultados de la constante de Freundlich “W”*

Carga (g)	C <sub>f</sub> (mgCl/L)	q <sub>t</sub> (mg/g)	ln(C <sub>f</sub> )	ln(q <sub>t</sub> )	W Freundlich
2	0.3	0.15	-1.2	-1.89	0.1296
4	0.2	0.05	-1.609	-2.99	0.0944
6	0.16	0.0267	-1.832	-3.623	0.0793
8	0.1	0.0125	-2.302	-4.382	0.0549
10	0.05	0.005	-2.99	-5.298	0.03199
12	0.02	0.0017	-3.912	-6.377	0.01564
14	0.001	7.14x10 <sup>5</sup>	-6.907	-9.54	0.001507

**Tabla 32. Análisis de varianza para los datos de W (Freundlich)**

	Grados de libertad	SS	MS	F-Valor	P-Valor
<b>Regresion</b>	2	0.0169246	0.0084623	102.79	0.000
<b>Error</b>	4	0.0003293	0.0000823		
<b>Total</b>	6	0.0172539			

Con respecto al Análisis de Varianza que se observa en la Tabla N°32 se puede deducir los siguiente:

- **Grados de Libertad:** Nos indica que la regresión tiene 2 grados de libertad puesto que hay 2 variables independientes que se están estimando en el modelo

y el error presenta 4 grados de libertad el cual indica la estimación de la variabilidad no explicada en el modelo.

- **SS (Suma de cuadrados):** La suma de cuadrados de la regresión es 0.0169246 y la suma de cuadrados del error es 0.0003293.

En resumen, teniendo el valor F crítico, que se obtiene de una tabla de distribución F, es aproximadamente 6.74 y el valor F experimental de 102.79 es considerablemente mayor que el valor F crítico, lo que sugiere una relación o diferencia significativa en el análisis y el valor P es 0.000, lo que indica una relación altamente significativa entre la regresión y la variabilidad de respuesta. Esta regresión indica que existe una cantidad significativa de la variabilidad de datos. En otras palabras, existe una relación altamente significativa entre la regresión y la variable de respuesta, ya que el valor de F es alto y el valor P es muy bajo.

**Tabla 33**

*Resumen del modelo de regresión de la isoterma de Freundlich*

<b>S</b>	0.00907357
<b>R-Sq</b>	98.1%
<b>R-Sq(adj)</b>	97.1%

- **La primera estadística es S:** la desviación estándar residual tiene el valor de 0.00907357. Cuanto menor tenga el valor de S, mejor será el ajuste del modelo a los datos.
- **R-Sq (Coeficiente de determinación):** El coeficiente de determinación R-Sq es del 98.1% indica la proporción de la variabilidad total de los datos y cuanto mayor sea el valor se tendrá un buen ajuste del modelo de los datos.
- **R-Sq(adj) (Coeficiente de determinación ajustado):** El coeficiente de determinación es de 97.1%. Este valor ajusta el coeficiente de determinación R-Sq y cuan mayor sea el valor mejor será el ajuste del modelo sin incluir variables innecesarias.

Según (Pilamonta, 2013), los datos obtenidos en el mejoramiento de carbon activado en el tratamiento de agua potable con acido fosforico, variando en la

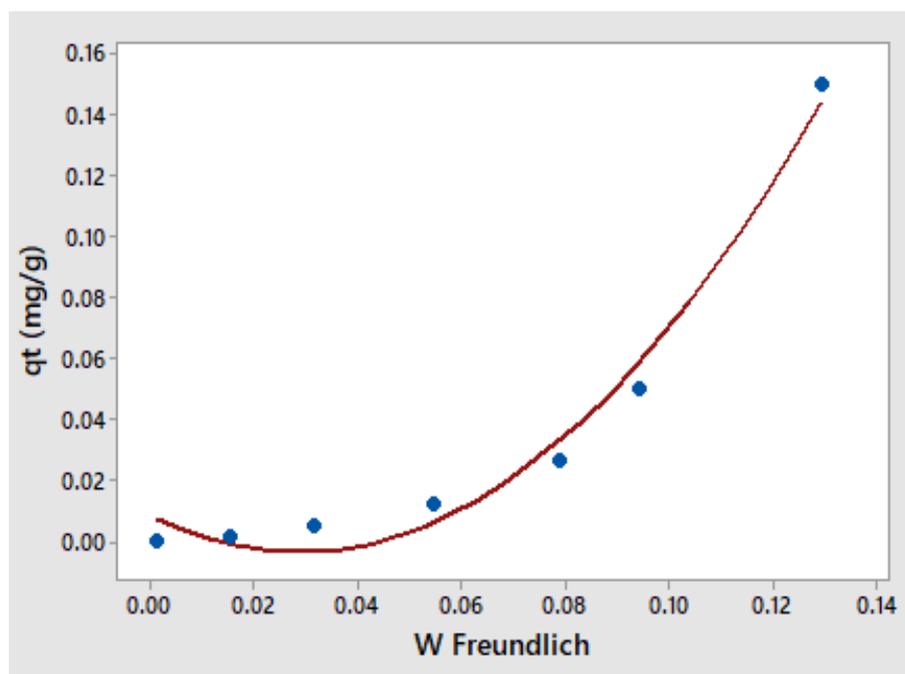
concentración de ácido, tiempo de impregnación y temperatura de carbonización, dieron como resultado en el modelado del grado de activación en la isoterma de Freundlich con valores de determinación  $R^2$  de 0.991 lo cual indica que hubo un buen ajuste de los datos obtenidos con dicho modelo isotérmico de adsorción.

Según (Barazorda y Lima, 2019), los resultados de equilibrio en la adsorción de Au utilizando carbon activado a partir de la cascara de castaña que fue carbonizada y activada con  $H_3PO_4$  muestran que se obtuvo buen ajuste con el modelo de Freundlich con valores del coeficiente de determinación  $R^2$  de 0.986, de acuerdo con ese modelo se obtuvo el parámetro de intensidad de adsorción de 3.88 y la afinidad del adsorbente por el adsorbato 0.023, los cuales indican enlaces muy débiles entre el carbón activado y los iones de Au y se da una adsorción en multicapas, por tanto este tipo de adsorción es físico.

En conclusión, los resultados nos indican que el modelo de regresión se logra ajustar a los datos, y puede explicar el 98.1% de la variabilidad observada en los valores de  $q_t$ . A parte, el modelo muestra un buen ajuste sin incluir variables innecesarias, como se logra ver en el alto valor de  $R-Sq(adj)$ .

**Figura 16**

*Isoterma de Freundlich*



## 6.2. Isoterma Langmuir

Los resultados que se obtienen para la determinación de la isoterma de Langmuir se pueden observar en la Tabla N°34.

**Tabla 34**

*Resultados de la matriz Isoterma de Langmuir*

Carga (g)	C <sub>f</sub> (mgCl/L)	q <sub>t</sub> (mg/g)	1/C <sub>f</sub>	1/q <sub>t</sub>
2	0.3	0.15	3.333	6.66
4	0.2	0.05	5	20
6	0.16	0.0267	6.25	37.45
8	0.1	0.0125	10	80
10	0.05	0.005	20	200
12	0.02	0.0017	50	588.23
14	0.001	7.14x10 <sup>5</sup>	1000	14005.6

Realizando la regresión con respecto a 1/C<sub>f</sub> y 1/q<sub>t</sub> para hallar las constantes:

**Tabla 35**

*Coefficientes con respecto a la regresión de ln(C<sub>f</sub>) y ln(q<sub>t</sub>)*

Termino	Coef	Se Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constante	-66.0	11.5	-5.73	0.002	
1/C <sub>f</sub>	14.0691	0.0304	462.81	0.000	1.00

La ecuación de regresión viene dada por la siguiente ecuación:

$$y = -66 + 14.0691x \dots\dots\dots 5.10$$

Se puede observar en la Tabla N°30 con respecto a la ecuación de regresión, que para la isoterma de Langmuir que el valor de k es de

$$K = 14.0691$$

Por otro lado, la constante de la capacidad máxima de adsorción es:

$$a = 0.99$$

La Isoterma de Langmuir dada por la Ecuación N°2.3 reemplazado por los valores se tiene el siguiente modelo matemático:

$$W = \frac{0.99 \times Cf}{1 + 14.0691 \times Cf}$$

**Tabla 36**

*Resultados de la constante de Langmuir “W”*

Carga (g)	C <sub>f</sub> (mgCl/L)	q <sub>t</sub> (mg/g)	1/C <sub>f</sub>	1/q <sub>t</sub>	W Langmuir
2	0.3	0.15	3.333	6.66	0.05688
4	0.2	0.05	5	20	0.05191
6	0.16	0.0267	6.25	37.45	0.04872
8	0.1	0.0125	10	80	0.04113
10	0.05	0.005	20	200	0.02905
12	0.02	0.0017	50	588.23	0.01545
14	0.001	7.14x10 <sup>5</sup>	1000	14005.6	0.00097

**Tabla 37**

*Análisis de varianza para los datos de W (Langmuir)*

	Grados de libertad	SS	MS	F-Valor	P-Valor
<b>Regresión</b>	2	0.0128935	0.0064467	5.91	0.064
<b>Error</b>	4	0.0043604	0.0010901		
<b>Total</b>	6	0.0172539			

Con respecto al Análisis de Varianza que se observa en la Tabla N°37 se puede deducir los siguiente:

- **Grados de Libertad:** indica que la regresión tiene 2 grados de libertad puesto que hay 2 variables independientes que se están estimando en el modelo y el error presenta 4 grados de libertad el cual nos indica la estimación de la variabilidad no explicada en el modelo.

- **SS (Suma de cuadrados):** La suma de cuadrados de la regresión es 0.0128935 y la suma de cuadrados del error es 0.0043604.

En resumen, el valor F crítico, que se obtiene de una Tabla de distribución F, es aproximadamente 6.74. En este contexto, el valor F experimental es de 5.91 es considerablemente mayor que el valor F crítico, lo que sugiere una relación o diferencia no significativa en el análisis y el valor P es 0.064, lo que indica que la regresión no es estadísticamente significativa al nivel de significancia de 0.05.

**Tabla 38**

*Resumen del modelo de regresión de la isoterma de Langmuir*

<b>S</b>	0.0330168
<b>R-Sq</b>	74.7%
<b>R-Sq(adj)</b>	62.1%

- **El primer estadístico es S:** la desviación estándar residual tiene el valor de 0.0330168. Cuanto menor tenga el valor de S, mejor será el ajuste del modelo a los datos.
- **R-Sq (Coeficiente de determinación):** El coeficiente de determinación R-Sq es del 74.7% indica la proporción de la variabilidad total de los datos y cuanto mayor sea el valor se tendrá un buen ajuste del modelo de los datos.
- **R-Sq(adj) (Coeficiente de determinación ajustado):** El coeficiente de determinación es de 62.1%. Este valor ajusta el coeficiente de determinación R-Sq y cuan mayor sea el valor mejor será el ajuste del modelo sin incluir variables innecesarias.

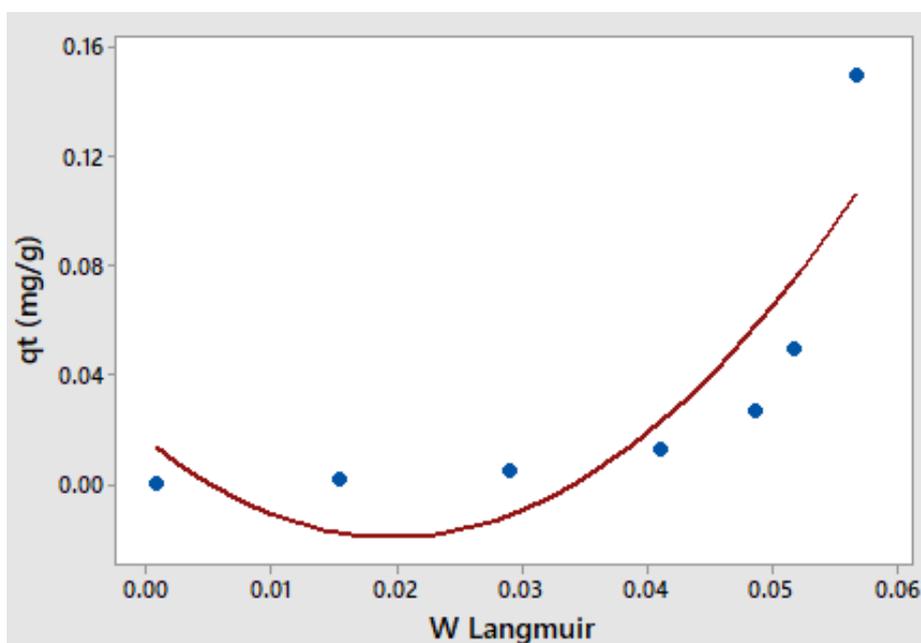
Según (Pilamonta, 2013), los datos obtenidos en el mejoramiento de carbón activado en el tratamiento de agua potable con ácido fosfórico, variando en la concentración de ácido, tiempo de impregnación y temperatura de carbonización, dieron como resultado en el modelado del grado de activación en la isoterma de Langmuir con valores de determinación R<sup>2</sup> de 0.996 lo cual indica que el ajuste que se tuvo para este caso dio mejores resultados en lo que es la adsorción en comparación con el ajuste de la Isoterma de Freundlich.

Según (Barazorda y Lima, 2019), los resultados de equilibrio en la adsorción de Au utilizando carbón activado a partir de la cascara de castaña que fue carbonizada y activada con  $H_3PO_4$  muestran que se obtuvo buen ajuste con el modelo de Langmuir con valores del coeficiente de determinación  $R^2$  de 0.935, de acuerdo con ese modelo el ajuste es menor al del modelo ajustado en la isoterma de Freundlich, lo cual nos da a entender que para este proceso las condiciones que se variaron fueron de manera aceptable en el ajuste.

En conclusión, según la investigación el ajuste realizado por nuestro proceso de adsorción los resultados indican que el modelo de regresión obtenido se logra ajustar a los datos, y nos puede explicar el 74.7% de la variabilidad observada en los valores de  $q_t$ . A parte, el modelo nos muestra que no existe un buen ajuste y es necesario incluir variables necesarias, para lograr tener un alto valor de  $R-Sq(adj)$ .

**Figura 17**

*Isoterma de Langmuir*



### 6.3. Isoterma de adsorción Lineal

Los resultados que se obtienen para la determinación de la isoterma de adsorción Lineal se pueden observar en la Tabla N°39.

**Tabla 39***Resultados de la matriz para la isoterma de adsorción Lineal*

<b>Carga (g)</b>	<b>C<sub>f</sub> (mgCl/L)</b>	<b>q<sub>t</sub> (mg/g)</b>
2	0.3	0.15
4	0.2	0.05
6	0.16	0.0267
8	0.1	0.0125
10	0.05	0.005
12	0.02	0.0017
14	0.001	7.14x10 <sup>5</sup>

Realizando la regresión con respecto a C<sub>f</sub> y q<sub>t</sub> se obtiene la ecuación de regresión que viene dada de la siguiente forma:

$$y = 0.0543 + 1.832x \dots \dots \dots 5.11$$

De la ecuación obtenida se podrá observar que la constante K tendrá el siguiente valor:

$$K = 0.0543$$

De donde la isoterma Lineal siguiendo la Ecuación N°2.5 estará representada por el siguiente modelo matemático:

$$W = 0.0543 \times C_f$$

**Tabla 40***Resultados de la constante de isoterma de adsorción lineal "W"*

<b>Carga (g)</b>	<b>C<sub>f</sub> (mgCl/L)</b>	<b>q<sub>t</sub> (mg/g)</b>	<b>W isoterma de adsorción lineal</b>
2	0.3	0.15	0.01629
4	0.2	0.05	0.01086
6	0.16	0.0267	0.00868
8	0.1	0.0125	0.00543
10	0.05	0.005	0.00271
12	0.02	0.0017	0.00108
14	0.001	7.14x10 <sup>5</sup>	0.00005

**Tabla 41***Análisis de varianza para los datos de W (Isoterma de adsorción Lineal)*

	<b>Grados de libertad</b>	<b>SS</b>	<b>MS</b>	<b>F-Valor</b>	<b>P-Valor</b>
<b>Regresion</b>	1	0.014301	0.014301	24.22	0.004
<b>Error</b>	5	0.002952	0.0005906		
<b>Total</b>	6	0.017253			

Con respecto al Análisis de Varianza que se observa en la Tabla N°41 se puede deducir los siguiente:

- **Grados de Libertad:** indica que la regresión tiene 1 grado de libertad lo que indica que hay una variable independiente en el modelo, el erro presenta 5 grados de libertad de lo cual se concluye que hay 5 observaciones en la muestra.
- **SS (Suma de cuadrados):** La suma de cuadrados de la regresión es 0.014301 y la suma de cuadrados del error es 0.002952.

En resumen, el valor F crítico, que se obtiene de una tabla de distribución F, es aproximadamente 6.74. En este contexto, el valor F experimental es de 24.22 es considerablemente mayor que el valor F crítico, lo que sugiere una relación o diferencia no significativa en el análisis y el valor P es 0.004, lo que indica es que la regresión no es estadísticamente significativa al nivel de significancia de 0.05.

**Tabla 42***Resumen del modelo de regresión de la isoterma de Langmuir*

<b>S</b>	0.0243015
<b>R-Sq</b>	82.9%
<b>R-Sq(adj)</b>	79.5%

- **La primera estadística es S:** la desviación estándar residual tiene el valor de 0.0243015. Cuanto menor tenga el valor de S, mejor será el ajuste del modelo a los datos.

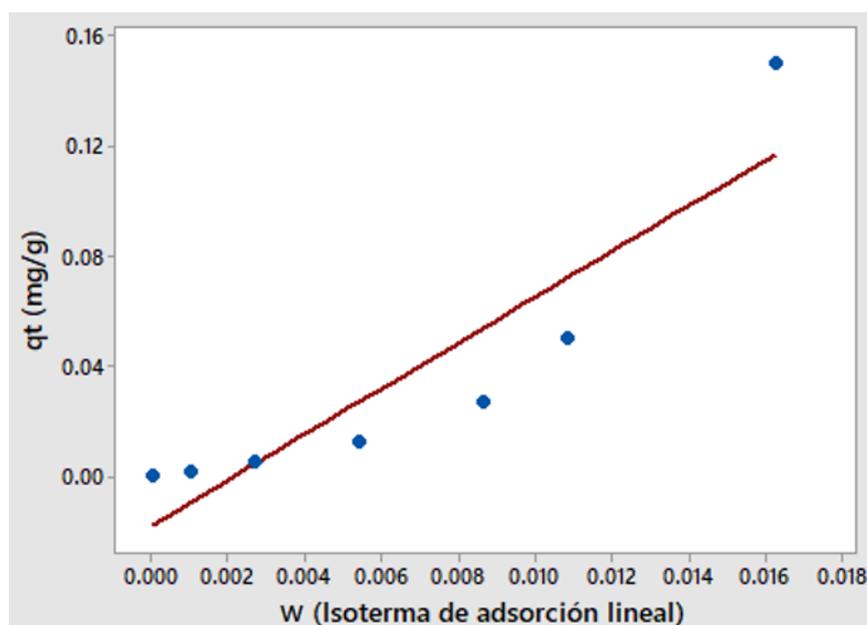
- **R-Sq (Coeficiente de determinación):** El coeficiente de determinación R-Sq es del 82.9% indica la proporción de la variabilidad total de los datos y cuanto mayor sea el valor se tendrá un buen ajuste del modelo de los datos.
- **R-Sq(adj) (Coeficiente de determinación ajustado):** El coeficiente de determinación es de 79.5%. Este valor ajusta el coeficiente de determinación R-Sq y cuan mayor sea el valor mejor será el ajuste del modelo sin incluir variables innecesarias.

Según (Barazorda y Lima, 2019), los resultados de equilibrio en la adsorción de Au utilizando carbón activado a partir de la cascara de castaña que fue carbonizada y activada con  $H_3PO_4$  muestran que se obtuvo buen ajuste con el modelo de Lineal con un valor de coeficiente de determinación  $R^2$  de 0.9063, de acuerdo con ese modelo el ajuste es mucho menor al de los modelos anteriores como son en el ajuste de la isoterma de Freundlich y Langmuir, lo cual nos da a entender que para este proceso las condiciones que se variaron no fueron de manera muy aceptable en el ajuste.

En conclusión, se puede resumir que la isoterma de adsorción lineal tiene una influencia significativa en la cantidad adsorbida. Este modelo de regresión lineal proporciona una buena aproximación de la relación entre la isoterma de adsorción lineal y la cantidad de sustancia adsorbida.

**Figura 18**

*Isoterma de adsorción Lineal*



## CONCLUSIONES

- El carbón activado elaborado de la madera de eucalipto a diferentes condiciones adsorbe el cloro residual de agua potable de la red de Santa Ana.
- La concentración de cloro residual en el agua potable de la red de Santa Ana en Cusco es alrededor de 0.6 mg/L, cifra que se considerada elevada y que podría representar un riesgo para la salud humana.
- El análisis de varianza muestra que, para la obtención del carbón activado a partir de la madera de eucalipto, la concentración de sustancia activante es la más significativa. La temperatura y el tiempo de impregnación también influyen, pero la concentración de sustancia activante muestra una relación más pronunciada con las propiedades del carbón resultante. Estos hallazgos destacan la importancia de cuidadosamente controlar y ajustar la concentración de sustancia activante para lograr un carbón activado con propiedades óptimas, lo cual es esencial para garantizar su eficiencia en procesos de adsorción y otras aplicaciones.
- La muestra que exhibió una mayor eficiencia de adsorción fue aquella sometida a condiciones específicas durante el proceso de obtención de carbón activado. En particular, esta muestra se caracterizó por una temperatura de carbonización de 700°C, una impregnación de 0.5g/mL de ácido fosfórico (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) como sustancia activante, y un tiempo de impregnación de 90 minutos. Estos parámetros, cuidadosamente seleccionados, resultaron en un carbón activado con destacadas propiedades de adsorción, subrayando la importancia de la precisión en la manipulación de variables para lograr un rendimiento óptimo en el proceso de obtención.
- Las isotermas de adsorción realizadas tuvieron un buen ajuste, pero la isoterma de adsorción que tiene un mejor ajuste a los datos experimentales que se obtuvo, es la isoterma de Freundlich con un coeficiente de correlación de R = 98.1%, y su modelo matemático correspondiente es:

$$W = 0.332Cf^{0.781}$$

## RECOMENDACIONES

- Implementar el uso de carbón activado obtenido a partir de la madera de eucalipto en el proceso de tratamiento de agua potable de la red de Santa Ana del Cusco, dado que el carbón activado demostró una alta eficiencia en la adsorción de cloro residual, se recomienda su aplicación a nivel de planta de tratamiento para mejorar la calidad del agua potable.
- Monitorear y controlar regularmente la concentración de cloro residual en la red de agua potable, ya que se identificó una concentración de cloro residual alta, es fundamental realizar un seguimiento periódico y establecer protocolos de control para garantizar que los niveles de cloro sean seguros para el consumo humano.
- Optimizar las condiciones de obtención de carbón activado, seguir investigando y ajustando los parámetros de temperatura, concentración del activante y tiempo de impregnación en la producción de carbón activado y así mejorar su eficiencia y reducir los costos de producción.
- Considerar otras aplicaciones para el carbón activado, se tiene que evaluar la viabilidad de utilizar el carbón activado obtenido a partir de la madera de eucalipto en otros procesos de purificación de agua o en la adsorción de otros contaminantes presentes en el agua potable.
- Promover la concientización sobre la importancia del tratamiento de agua potable, se debe educar a la comunidad sobre los riesgos asociados con la presencia de cloro residual y la importancia de contar con sistemas de tratamiento adecuados para garantizar el suministro de agua potable segura.

## BIBLIOGRAFÍA

- American Society for Testing and Materials. (2022). *ASTM INTERNATIONAL*. <https://la.astm.org/es/standards/>
- Asociación Española de abastecimiento de agua y saneamiento. (1984). *Manual de la Cloración*. Madrid - España.
- ASTM-2866. (2014). *Standard Test Method for Total Ash Content of Activated Carbon*. China: ASTM International.
- ASTM-2867. (2014). *Moisture in Activated Carbon*. China: ASTM-International.
- ASTM-5832. (2014). *Standard Test Method for Volatile Matter Content of Activated Carbon Samples*. China: ASTM-International.
- ASTM-6385. (2022). *Standard Test Method for Determining Acid-Extractable Content in Activated Carbon by Ashing*. China: ASTM International.
- Barazorda, K. R., & Lima, E. (2019). *Evaluación de la capacidad de adsorción de oro con carbón activado obtenido a partir de la cáscara de castaña*. Cusco-Peru.
- Barbar, R. (2019, ABRIL 23). *Potabilización del agua*. PRODAVINCI: <http://factor.prodavinci.com/como-se-potabiliza-el-agua/index.html#:~:text=Seg%C3%BAAn%20la%20OMS%2C%20se%20debe,en%20circunstancia%20de%20riesgo%20alto>.
- Bermúdez, J., Touza, M., & Sanz, F. (2004). *Manual de la madera de Eucalipto blanco*. Parque Tecnológico de Galicia.
- Cervantes, C. V. (2014). *Producción de carbón activado a partir de la cascara de frijol de soya para su aplicación como adsorbente en el tratamiento de aguas residuales contaminadas con colorante verde de malaquita*. Universidad Autónoma de Nuevo León .
- CLOROSUR. (2004). *Manual del cloro*. New Orleans - EEUU: Chlorine Institute.
- Condori, E. L. (2019). *Evaluación de la capacidad de adsorción de oro con carbón activado obtenido a partir de la cascara de castaña*. Cusco - Perú: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

- Dirección General de Salud Ambiental del Ministerio de Salud del Perú. (2011). *Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano*. Ministerio de Salud del Perú.
- E.U. Politécnica. (2011). *Manual del Carbón Activado*. España: E.U. Politécnica - Universidad de Sevilla.
- FAO. (1981). *El Eucalipto en la repoblación forestal*. Roma - Italia: FAO.
- Fernández, S. L. (2009). *Obtención de Carbón Activado a partir de la Lemna (lenteja de agua) por Activación Química*. Arequipa-Perú: Universidad Católica de Santa María.
- Herrera, P. A. (2017). *Carbón activado a partir de carbon mineral*. Chile: Universidad de Concepción.
- INDITEX. (2014). *Adsorción de Carbón Activado (FT-TER-002)*. UNIVERSIDAD DE CORUÑA.
- Injection Technical Control. (2006). *Cloración de agua potable, Innovación tecnológica catalana*. Barcelona - España: Barcelonatech.
- Marzal, M. (1997). *Modelación de la calidad de agua*. Valencia - España: Universidad Politécnica de Valencia.
- McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriott, P. (2005). *Unit Operations of Chemical Engineering (5a ed.)*. Singapore: Mc Graw-Hill.
- Mexichem. (2010). *Material Safety Data Sheet - Cloro*. Mexico: Mexichem.
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia. (2003). *Guías para manejo seguro y gestión ambiental de 25 sustancias químicas*. Colombia: Consejo Colombiano de Seguridad.
- Montgomery, D. C. (2004). *Diseño y análisis de experimentos*. Mexico: LIMUSA.
- Paredes, A. L. (2011). *Estudio de la adsorción de compuestos aromáticos mediante carbón activado preparado a partir de la cáscara de castaña*. Lima - Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Pilamonta Mañay, J. V. (2013). *Mejoramiento del Carbón Activado contaminado en el tratamiento de agua potable*. Universidad Centreal del Ecuador.

- Pino, F. F. (2011). *ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN SOLAR POR ADSORCIÓN*. Sevilla: ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS UNIVERSIDAD DE SEVILLA.
- Ramírez Quirós, F. (2005). *Tratamiento de Desinfección del Agua Potable*. Madrid - España: Canal de Isabel II.
- Ramírez, C. A., Palacio Londoño, A. M., & Barrera Zapata, R. (2018). *Cascara de Piña como Adsorbente de Colorantes Típicos de la Industria Textil*. Medellín - Colombia: Universidad de Antioquia.
- Recobert, M. P. (2015). *Evaluación de nuevos precursores y del proceso de activación con dióxido de carbono*. Universidad de Alicante.
- Rodríguez, P. W. (2014). *Obtención de carbon activado a partir de residuos de madera Shihuahuaco y su uso en la decoloración de aceite vegetal de castaña*. Cusco - Perú: Universidad de San Antonio Abad del Cusco.
- Ruiz Menendez, A. P. (2018). *Obtención de arbón activado a partir de cáscara de naranja (Citrus sinensis L. Obseck) y su aplicación como adsorbente de plomo (II) en disolución acuosa*. UNALM.
- Ruth Stringer, P. J. (2001). *Chlorine and the Environment*. Springer-science-business media, B.V.
- Tien, C. (2019). *Introduction to Adsorption*. India: Susan Herwig Ikeda.
- V.H., A. C.-R.-E.-G. (2015). *Obtención de Carbón Activado a partir de Residuos Lignocelulósicos de Canelo, Laurel y Eucalipto*. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Valencia, D. C. (2012). *Estudio Comparativo de la Capacidad de Adsorción de Cadmio utilizando carbones activados preparados a partir de semillas de aguaje y de aceituna*. Lima-Perú: Universidad Católica del Perú.
- Vidal, I. M. (2014, Enero). *clubensayos*. <https://www.clubensayos.com/Ciencia/Area-Superficial-De-Un-Poro/1539611.html>

- World Health Organization. (2022). *World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality* (4th ed.): [https://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/dwq/guidelines/es/](https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/guidelines/es/)

## APENDICE

### Imágenes de la Metodología

**Figura 19**

*Reactor en donde se carbonizará el aserrín de madera de eucalipto*



**Figura 20**

*Horno en donde se llevará a carbonizar el aserrín de eucalipto a 3 diferentes temperaturas.*



**Figura 21**

*Verificación de la temperatura de carbonización en el horno*



**Figura 22**

*Muestras de carbón de madera de eucalipto a diferente temperatura*



**Figura 23**

*Molienda manual del carbón de madera de eucalipto*



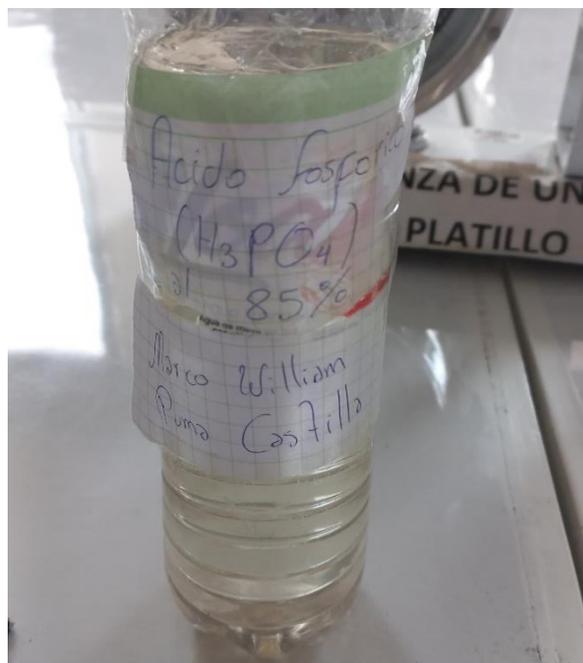
**Figura 24**

*Muestra de Carbón de madera de eucalipto molido*



**Figura 25**

*Ácido fosfórico al 85% utilizado para la activación*



**Figura 26**

*Activación de las muestras de carbón de madera de eucalipto*



**Figura 27**

*Agua destilada empleada para lavar el carbón activado y sacar la acides hasta llegar a un pH neutro*



**Figura 28**

*Lavado de cada muestra de carbon activado a partir de la madera de eucalipto*



**Figura 29**

*Muestras de carbón activado en pH neutro después del lavado*



**Figura 30**

*Secado de las muestras de carbon activado luego del lavado para llevarlos a un pH neutro*



**Figura 31**

*Total, de muestras obtenidas a diferentes temperaturas de carbonización, concentración de sustancia activante y tiempo de activación.*



**Figura 32**

*Pesado de cada muestra de carbón activado de madera de eucalipto luego del secado en el horno*



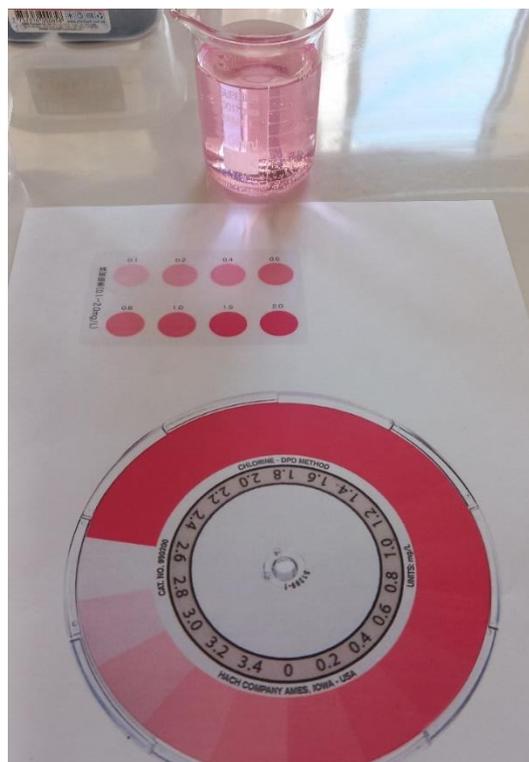
**Figura 33**

*Medición de cloro residual de la muestra para cada una de la muestra y realizar el proceso de adsorción.*



**Figura 34**

*Medición de cloro residual usando el método de colorimetría para obtener los datos de cloro residual en el agua potable*



**Figura 35**

*Proceso de adsorción del cloro residual utilizando el carbón activado a partir de la madera de eucalipto*



**Figura 36**

*Uso de cada muestra de carbón activado para cada muestra de agua con cloro residual*



**Figura 37**

*Muestras después del uso de carbón activado comparadas a partir de la colorimetría después del añadido del DPD*



## ANEXOS

### a. Matriz de consistencia

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLES
<p><b>General</b> ¿Se podrá realizar el proceso de adsorción de cloro residual del agua potable con carbón activado a partir de la madera de eucalipto?</p> <p><b>Problemas específicos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Cuál es la concentración de cloro residual presente en la red de agua potable del Cusco?</li> <li>• ¿Cuáles son los parámetros físicos (tiempo y temperatura) y parámetros químicos (concentración de ácido fosfórico) más eficaces para la obtención de carbón activado a partir de la madera de eucalipto?</li> <li>• ¿Cuál de las muestras afectadas por las diferentes variables utilizadas en la obtención de carbón activo tiene mejor eficiencia de adsorción?</li> <li>• ¿Cuáles es la isoterma de adsorción física que más se ajusta a los datos experimentales en la adsorción de cloro?</li> </ul>	<p><b>General</b> Adsorber el cloro residual del agua potable de la ciudad del Cusco con carbón activado obtenido a partir de la madera de eucalipto.</p> <p><b>Objetivos específicos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Corroborar la concentración de cloro residual en la red de suministro de agua potable, en la ciudad de Cusco.</li> <li>• Obtener carbón activado a partir de la madera de Eucalipto a diferentes condiciones de temperatura, concentración del activante y el tiempo de impregnación</li> <li>• Evaluar el carbón activo más eficiente en el proceso de adsorción obtenido por las diferentes condiciones.</li> <li>• Obtener la isoterma de adsorción física que más se ajusta a los datos experimentales de la adsorción de cloro.</li> </ul>	<p><b>General</b> Se puede realizar el proceso de adsorción de cloro residual del agua potable de la red de Santa Ana del Cusco con carbón activado a partir de la madera de eucalipto.</p> <p><b>Hipótesis nula (H0):</b> La pendiente de la línea de regresión es igual a cero, lo que indica que no hay una relación significativa entre la concentración inicial de cloro residual y la cantidad de cloro residual adsorbido por el carbón activado.</p> <p><b>Hipótesis alternativa (H1)</b> La pendiente de la línea de regresión no es igual a cero, lo que sugiere que hay una relación significativa entre la concentración inicial de cloro residual y la cantidad de cloro residual adsorbido por el carbón activado.</p> <p><b>Hipótesis específicas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La red de distribución de agua potable de Santa Ana en Cusco tiene una concentración de cloro residual mayor a las establecidas por los parámetros de la OMS.</li> <li>• El carbón activado obtenido a partir de la madera de eucalipto por diferentes condiciones presentara diferentes propiedades de adsorción</li> <li>• El carbón con más eficiencia en el proceso de adsorción será el de la muestra en la cual se utilizó mayor sustancia activante.</li> <li>• La isoterma que se logra ajustar a los datos obtenidos en la adsorción física de cloro es será la del modelo de Freundlich.</li> </ul>	<p><b>Variables independientes</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura de carbonización (°C)</li> <li>• Concentración de sustancia activante (mL/mg)</li> <li>• Tiempo de impregnación (minutos)</li> </ul> <p><b>Variables dependientes</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Adsorción de cloro por el carbón activado</li> </ul>
<b>TIPÓ DE ESTUDIO</b>	<b>POBLACIÓN Y MUESTRA</b>	<b>RECOLECCIÓN DE DATOS</b>	<b>PRUEBAS ESTADÍSTICAS</b>
<p><b>Nivel de investigación</b> El nivel de investigación es explicativo-aplicativo:</p> <p><b>Tipo de investigación</b> Investigación de tipo experimental (ensayos experimentales)</p>	<p><b>Población</b> No presenta población</p> <p><b>Muestra</b> No presenta muestra</p>	<p>Elaboración de ensayos experimentales para la obtención de muestras y levantamiento de de datos debido a sus tratamientos expuestos en cada muestra</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estadísticos de ensayos experimentales</li> <li>• Análisis de varianza (ANOVA de 3 factores)</li> <li>• ANOVA para un análisis de regresión</li> </ul>