Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Química e Ingeniería Química
Escuela Profesional de Ingeniería Química

Evaluación y optimización de la capacidad adsorbente de las hojas de *Eucalyptus Globulus* activadas químicamente con sulfato de aluminio para la remoción de Cr (VI) en agua contaminada

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniera Química

AUTOR

Johany Liz CONTRERAS SALCA

ASESOR

Dr. Eder Clidio VICUÑA GALINDO

Lima, Perú

2026



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Contreras, J. (2026). *Evaluación y optimización de la capacidad adsorbente de las hojas de Eucalyptus Globulus activadas químicamente con sulfato de aluminio para la remoción de Cr (VI) en agua contaminada*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Química e Ingeniería Química, Escuela Profesional de Ingeniería Química]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Johany Liz Contreras Salca
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	72621828
URL de ORCID	https://orcid.org/0009-0002-6962-8587
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Eder Clidio Vicuña Galindo
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	09069542
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0003-4980-0490
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Víctor Manuel Fernández Guzmán
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06690674
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Mauricio Diego Jack Abugattas Arocena
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07938472
Datos de investigación	
Línea de investigación	Remediación de agua, aire y suelo

Grupo de investigación	DEINPRO
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento
Ubicación geográfica de la investigación	Edificio: Universidad Nacional Mayor de San Marcos País: Perú Departamento: LimaProvincia: Lima Distrito: Lima Latitud: -12.0621065 Longitud: -77.0365256 https://maps.app.goo.gl/G8k8iBHPJ5WMMSSv8
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Setiembre 2025 - Diciembre 2025
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería química https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.04.01 Ingeniería de procesos https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.04.02 Ingeniería ambiental y geológica https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.01

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)
FACULTAD DE QUÍMICA E INGENIERÍA QUÍMICA
Central Telefónica: 619-7000

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Los suscritos miembros del Jurado Calificador nombrados por el señor Presidente del Comité Ejecutivo del "V Programa Ciclo Taller de Titulación Profesional por la Modalidad de Tesis y Trabajo de Suficiencia Profesional para la Facultad de Química e Ingeniería Química 2025-II", bajo la Presidencia del **Dr. Víctor Manuel Fernández Guzmán;** el **Mg. Mauricio Diego Jack Abugattas Arocena (Miembro)** y el **Dr. Eder Clidio Vicuña Galindo (Asesor);** habiendo presentado para tal efecto la **TESIS,** titulada **"Evaluación y optimización de la capacidad adsorbente de hojas de Eucalyptus Globulus activadas químicamente con sulfato de aluminio para la remoción de Cr (VI) en agua contaminada ",** después de **SUSTENTADA Y APROBADA** la tesis elaborada por la bachiller en Ingeniería Química: **CONTRERAS SALCA, JOHANY LIZ;** para optar el **TÍTULO PROFESIONAL** de **INGENIERA QUÍMICA,** acordaron calificarla con la **NOTA** de:

DIECIOCHO (LETRAS) — 18 (NÚMEROS)

Ciudad Universitaria, 10 de enero del 2026

Dr. VÍCTOR MANUEL FERNÁNDEZ GUZMÁN
Presidente

Mg. MAURICIO DIEGO JACK ABUGATTAS AROCENA
Miembro

Dr. EDER CLIDIO VICUÑA GALINDO
Asesor

Dr. EDER CLIDIO VICUÑA GALINDO
Director de la E.P. de Ingeniería Química

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS • ESCUELA ACADÉMICA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA • Facultad de Química e Ingeniería Química

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE
SAN MARCOS
Universidad del Perú, Decana de América

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, **Eder Clidio Vicuña Galindo** en mi condición de asesor con el Dictamen N°000001-2026-EPIQ-FQIQ/UNMSM de la Tesis, cuyo título es**: Evaluación y optimización de la capacidad adsorbente de hojas de Eucalyptus Globulus activadas químicamente con sulfato de aluminio para la remoción de Cr (VI) en agua contaminada,** presentada por la bachiller: **CONTRERAS SALCA, JOHANY LIZ,** para optar el título Profesional de Ingeniera Química.

CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el 17% de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional.**

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título correspondiente.

Lima, 18 de enero del 2026

Firma del Asesor 

Nombres y Apellidos del asesor Eder Clidio Vicuña Galindo

DNI: 09069542

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi sincero agradecimiento al Dr. Eder Vicuña Galindo, por su gran apoyo y orientación durante toda la fase teórica y experimental de la presente tesis. Agradezco también a la Quim. Elizabeth Espinoza por su generosidad al prestar su laboratorio que fue importante para el desarrollo de esta investigación, de igual manera agradezco al Lic. Percy López, encargado de la Unidad de Servicios y Análisis Químicos (USAQ), por la prestación de dichas instalaciones durante parte del proceso experimental. Su apoyo ha sido un gran aporte para el avance de la investigación. Agradezco también al Mg. Héctor Gómez por su orientación y guía invaluable para la realización de una parte crucial de la tesis, la colaboración y disposición fue esencial. Agradezco al Dr. Julio Santiago, por su contribución y apoyo para el uso del equipo FTIR, lo cual fue clave en el desarrollo de esta investigación. Adicional, agradezco el apoyo de Sandra Curioso, quien fue de gran ayuda en el apoyo para el uso de equipos que se encontraban en la planta piloto ubicada alrededores de la FQIQ. Finalmente, extiendo mi agradecimiento a todas las personas que, sea con conocimientos, apoyo de manera práctica o con palabras de aliento, ayudaron a contribuir con la finalización y el éxito de este proyecto.

INDICE

RESUMEN 8
ABSTRACT 9
I. INTRODUCCIÓN 10
1.1. Introducción 10
1.2. Planteamiento del problema 10
1.2.1. Determinación del problema 11
1.2.2. Formulación del Problema 12
1.3. Objetivos de la investigación 13
1.4. Importancia y alcance de la Investigación 13
1.5. Limitaciones de la Investigación 14
II. REVISION DE LITERATURA 14
2.1 Marco Teórico 14
2.2 Antecedentes del estudio 15
2.2.1 Investigación Internacional 15
2.2.2 Investigación Nacional 16
2.3. Bases teóricas 17
2.3.1. Cromo Hexavalente (Cr (VI)) 17
2.3.2. Biosorción 18
2.3.3. Hojas de eucalipto como biosorbente 19
2.3.4. Sulfato de aluminio ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$) 20
2.3.5. Variables involucradas en la remoción de Cr (VI) 21
2.3.6. Diseños Experimentales 22
2.3.7. Metodología de Superficie de Respuesta (RSM) 23
2.4. Definición de términos 24
III. HIPOTESIS Y VARIABLES 25
3.1. Hipótesis 25
3.1.1. Hipótesis general 25
3.1.2. Hipótesis específicas 25
3.2. Variables 25
3.2.1. Variables independientes (VI): 26
3.2.2. Variables dependientes (VD): 26
3.3. Operacionalización de las variables 26
IV. MATERIALES Y METODOS 26
4.1. Área de estudio 26

4.2. Diseño de la investigación 27
4.3. Preparación del biosorbente 28
4.3.1. Lavado y secado de hojas 28
4.3.2. Trituración y tamizado 29
4.3.3. Impregnación con $Al_2(SO_4)_3.18\ H_2O$ 30
4.3.4. Secado final y almacenamiento 31
4.4. Preparación de soluciones de cromo 32
4.4.1 Preparación de soluciones de trabajo 33
4.5. Ensayos de adsorción 34
4.5.1. Preparación previa al ensayo 34
4.5.2. Equipo utilizado 35
4.5.3. Finalización y filtrado 36
4.6. Análisis UV Visible 37
4.7. Análisis estadístico 39
V. RESULTADOS 39
5.1. Presentación y análisis de resultados 39
5.1.1. Curva de calibración 39
5.1.2. Resultados experimentales 40
5.1.3. Representación gráfica de resultados 42
5.1.4. Análisis FTIR del biosorbente 46
5.2. Resultados del análisis estadístico 50
5.2.1. ANOVA del modelo 50
5.2.2. Significancia de factores 51
5.2.3. Ecuación del modelo ajustado 53
5.2.4. Diagnóstico del modelo 54
VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS 59
VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 62
VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS 64
IX. ANEXOS 68

INDICE DE TABLAS

Tabla 3.2. Operacionalización de variables 26
Tabla 4.2. Matriz de diseño de Box Behnken para los factores de pH, dosis del biosorbente y concentración inicial de Cr (VI) 27
Tabla 5.1. Valores de absorbancia obtenidos de las soluciones patrón de Cr (VI) para la construcción de la curva de calibración..... 39
Tabla 5.2. Condiciones experimentales y parámetros obtenidos en los ensayos de adsorción: concentración final, porcentaje de remoción y capacidad de adsorción 41
Tabla **9.1**. Matriz de consistencia 68

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.3. Especiación del Cr (VI). Extraído de Gulyas et. al. (2023) 18
Figura 2.4. Mecanismos involucrados en la biosorción de metales pesados. Extraído de Vahabisani A, An C (2021) 19
Figura 2.5. Principales variables que influyen en la adsorción de metales pesados. Adaptado de Bayuo, et. al. (2023) 21
Figura 2.6. Representación del diseño experimental Box-Behnken. Extraído de Szpisják et. al. (2023) 23
Figura 2.7. Ejemplo de superficie de respuesta. Adaptado de Metodología de la Superficie de Repuesta. Extraído de Goicochea, H (2018) 24
Figura 4.1. Hojas de eucalipto lavadas y puestas a secar a temperatura ambiente. 28
Figura 4.2. Hojas de eucalipto secas a 70°C 29
Figura 4.3. Equipo de tamiz 29
Figura 4.4. Agitación para la preparación de sulfato de aluminio 0.2 M 30
Figura 4.5. Biosorbente ya activado después de la agitación con sulfato de aluminio 0.2 M 30
Figura 4.6. Filtrado del adsorbente activado 31
Figura 4.7. Horno de calor Marca Memmert 32
Figura 4.8. Almacenamiento de adsorbente activado 32
Figura 4.9. Pesaje de la cantidad de $K_2Cr_2O_7$ 33
Figura 4.10. Lectura de pH en las soluciones de trabajo 34
Figura 4.11. Pesaje del adsorbente activado para las soluciones de trabajo. 35
Figura 4.12. Uso del equipo de agitación con las soluciones de trabajo 36
Figura 4.13. Filtrados obtenidos y adsorbente lavado tras el proceso de adsorción de Cr (VI). 37
Figura 4.14. Soluciones patrón ya medidas con reactivo colorímetro para la curva de calibración. 38
Figura 5.1. Relación entre absorbancia y concentración de Cr (VI) para la curva de calibración (λ = 540 nm). 40
Figura 5.2. Comportamiento del porcentaje de remoción de Cr (VI) en función del pH 43
Figura 5.3. Comportamiento del porcentaje de remoción de Cr (VI) en función de la Co. 43
Figura 5.4. Comportamiento de la capacidad de adsorción en función del pH 44

Figura 5.5. Comportamiento del porcentaje de remoción de Cr (VI) en función de la dosis. ..... **¡Error! Marcador no definido.**
Figura 5.6. Comportamiento de la capacidad de adsorción en función de la concentración inicial de Cr (VI)..... 45
Figura 5.8. Espectro FTIR del polvo de hojas de *Eucalyptus globulus* previo al proceso de activación con sulfato de aluminio. 47
Figura 5.9. Espectro FTIR del polvo de hojas de *Eucalyptus globulus* con activación con sulfato de aluminio. 48
Figura 5.10. Espectro FTIR del polvo de hojas de *Eucalyptus globulus* activado con mayor porcentaje de remoción..... 49
Figura 5.11. Espectro FTIR del polvo de hojas de *Eucalyptus globulus* activado con mayor capacidad de adsorción. 50
Figura 5.12. ANOVA del modelo ajustado para el análisis del porcentaje de remoción... 50
Figura 5.13. ANOVA del modelo ajustado para el análisis de la capacidad de adsorción (mg/g) 51
Figura 5.14. Coeficientes codificados para el análisis del porcentaje de remoción 52
Figura 5.15. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para el porcentaje de remoción 52
Figura 5.16. Coeficientes codificados para el análisis de la capacidad de adsorción 53
Figura 5.17. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para la capacidad de remoción 53
Figura 5.18 Grafica de probabilidad normal para el porcentaje de remoción 54
Figura 5.19. Grafica residuos vs ajuste para el porcentaje de remoción 55
Figura 5.20. Grafica de residuos vs. Orden de observación 55
Figura 5.21 Grafica de probabilidad normal para la capacidad de adsorción 56
Figura 5.22 Grafica residuos vs ajuste para la capacidad de adsorción 56
Figura 5.23. Grafica de residuos vs. Orden de observación 57
Figura 5.24. Grafica de contorno para la variable de respuesta % de remoción 58
Figura 5.25. Grafica de contorno para la variable de respuesta capacidad de adsorción 58
Figura 5.26. Resultados de parámetros de optimización para ambas variables de respuesta 59

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue sintetizar un biosorbente, obtenido de hojas de *Eucalyptus Globulus* pulverizadas con sulfato de aluminio, para la optimización de las condiciones experimentales para remover Cr (VI) aplicando el diseño experimental Box–Behnken y la Metodología de Superficie de Respuesta (RSM). Se evidenció del análisis FTIR al biosorbente activado y sin activar cambios de intensidad y desplazamientos en C=O, C-O y O-H, indicando la participación activa de estos grupos funcionales. Los rangos estudiados fueron concentraciones iniciales de 25 a 75 ppm de Cr (VI), pH de 2 a 5.6 y dosis de 1 a 5 g/L, fijando la temperatura a 25°C y agitación de 500 rpm durante 60 min. Del análisis ANOVA se demuestra que el pH es el factor con mayor influencia significativa. Adicionalmente, mediante RSM se predijeron las condiciones óptimas para la adsorción con remoción del 100 % y capacidad de adsorción de 36.83 mg/g, con una función de deseabilidad máxima D = 0.888. Finalmente, se demostró que el biosorbente tiene la capacidad de remover casi el 100% de Cr (VI) con concentración de hasta 75 mg/L trabajando a pH cercanos a 2 y cumpliendo con los Valores Máximos Admisibles (VMA).

Palabras clave: Síntesis bioquímica, Biosorción, Diseño experimental Box–Behnken, Metodología de Superficie de Respuesta (RSM), Capacidad de adsorción.

ABSTRACT

The objective of this research was synthesized a biosorbent, obtained of pulverized *Eucalyptus Globulus* leaves chemically treated with aluminum sulfate, for the optimization of experimental conditions to removal Cr (VI) by applying Box-Behnken experimental design and Response Surface Methodology (RSM). It was evidenced from FTIR analysis to activated and non-activated biosorbent changes of intensity and displacement in C=O, C-O and O-H groups, indicate the active participation of this functional groups. The ranges studied were initial concentrations of 25 to 75 ppm of Cr (VI), pH of 2 to 5.6 and dosage of 1 to 5 g/L, set the temperature to 25 °C and agitation of 500 rpm during 60 min. ANOVA analysis demonstrate pH is a factor with greatest significant influence. Additionally, RSM predicted optimal conditions to adsorption with removal of 100 % and adsorption capacity of 36.83 mg/g with maximum desirability function of D=0.888. Finally, it was demonstrated that biosorbent has removal capacity nearly 100 % of Cr (VI) at concentration up 75 mg/L working pH near to 2 and complying with Maximum Permissible Values (MPV).

Key words: Biochemical Synthesis, Biosorption, Box-Behnken experimental design, and Response Surface Methodology (RSM), adsorption capacity.

I. INTRODUCCIÓN

1.1.Introducción

La contaminación por metales pesados en la matriz agua representa una problemática creciente, debido a su permanencia en los ecosistemas y su capacidad de acumulación biológica. Entre los metales pesados, el cromo hexavalente [Cr (VI)] se destaca por ser una sustancia con la capacidad de provocar cáncer. Su existencia en aguas residuales, incluso a concentraciones bajas puede generar efectos adversos negativos, por lo que se requieren medidas efectivas y sostenibles para su remoción.

Los métodos tradicionales de tratamiento, como la reducción, precipitación química o el intercambio iónico, suelen tener un costo elevado, generar residuos secundarios o requerir condiciones complejas. En este escenario, los biosorbentes vegetales se presentan como soluciones alternativas, aprovechando los grupos funcionales existentes en los tejidos vegetales que ayudan a la remoción de metales pesados mediante adsorción de manera eficiente.

Entre los materiales vegetales, las hojas de *Eucalyptus globulus* destacan por ser de fácil disponibilidad y de bajo costo, adicional puede mejorar su capacidad de adsorción mediante procesos químicos como la activación. El uso de sulfato de aluminio como agente activador ofrece ventajas por su facilidad de obtención y ser económico, aunque su aplicación específica en este tipo de biosorbentes para remoción de Cr (VI) aún no ha sido ampliamente investigada.

El presente estudio tiene como objetivo evaluar la capacidad de remoción de Cr (VI) utilizando hojas de *Eucalyptus globulus* activadas con sulfato de aluminio, empleando un diseño experimental Box–Behnken que considera pH, dosis de adsorbente y concentración inicial de Cr (VI) como factores a estudiar, para determinar las condiciones óptimas de adsorción, contribuyendo al desarrollo de soluciones sostenibles y accesibles para el tratamiento de aguas contaminadas en condiciones de laboratorio.

1.2. Planteamiento del problema

Una creciente problemática es la contaminación del agua por metales pesados y se debe al aumento de actividades industriales y al poco manejo de sus efluentes. Entre estos contaminantes, el cromo hexavalente Cr (VI) destaca por su alta toxicidad, movilidad y persistencia, afectando ecosistemas y poniendo en riesgo la salud de las poblaciones cercanas a zonas industriales. Desde hace décadas, este problema está existente en distintas regiones

del país, lo cual evidencia la necesidad de búsqueda de alternativas de tratamiento que sean sostenibles y efectivas en el ámbito ambiental, ya que las tecnologías convencionales actuales presentan limitaciones.

1.2.1. Determinación del problema

La existencia de metales pesados en cuerpos de agua constituye una de las problemáticas ambientales más relevantes debido a su toxicidad y capacidad de bioacumulación. Surge como resultado de actividades en la industria, agricultura y de la eliminación de residuos mineros. Según el estudio hidrogeológico elaborado por INGEMMET en 2025, se registran niveles elevados de metales pesados como plomo y arsénico en distintas fuentes de agua subterránea de la cuenca del río Rímac, las cuales superan los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) establecidos. Este hallazgo identifica una problemática significativa del agua que suministra gran parte de Lima Metropolitana. Dentro de estos metales, el cromo en su estado hexavalente (Cr (VI)) representa uno de los contaminantes más peligrosos y se libera principalmente desde industrias cromado, curtiembres, etc.

La contaminación por cromo en cuerpos de agua en Perú ha sido ampliamente reportada. En el artículo de Salazar-Pinto et al. (2017) se evaluó el agua residual del Parque Industrial Río Seco (PIRS) en Arequipa, encontrando presencia de cromo total de 7.67 mg/L, excediendo el LMP (límite máximo permisible) de 2.5 mg/L para efluentes. Por otro lado, en el estudio de Tejeda-Meza et al. (2023) se reportó que el contenido promedio de cromo total en un afluente del río Chili superaba los 10 ppm, superando claramente el límite máximo permisible en Perú (0,5 ppm).

A pesar de que existen tecnologías que ayudan a remover metales pesados, se tiene en cuenta que presentan limitaciones. Muchas requieren altos costos de operación, producen sustancias toxicas secundarias, consumen bastante energía y necesitan infraestructura específica, lo que genera dificultad en zonas con bajos recursos. Todo ello revela la necesidad de buscar otras soluciones que sean ambiental y eficientemente compatibles. Por otra parte, las técnicas convencionales de depuración de metales pesados presentan dificultades para lograr el cumplimiento de los límites de vertido, siendo necesaria la búsqueda de técnicas alternativas para reducir estas emisiones (Izquierdo, 2010).

En el estudio de Duany-Timosthe et. al. (2022), se revisaron trabajos donde se demostraba el potencial de biosorción de varios residuos en el cual se encuentran estudiadas

biomasas como bagazo de caña, cáscara de plátano, cáscara de yuca, vaina de frijol, cáscara de naranja, cáscara de mandarina, cáscara de tamarindo, etc., que demostraron remoción de metales pesados y en el ámbito económico, Tyagi y Anand (2024) señalan que tanto investigadores como ambientalistas han centrado su atención en la síntesis de adsorbentes económicos y respetuosos con el medio ambiente que puedan producirse a partir de materiales de desecho abundantes, potenciales y sostenibles. Por ello se intensificaron los estudios para búsqueda de residuos económicos y/o subutilizados de material natural; en este contexto, la biomasa vegetal ha surgido como alternativa sostenible. Según Fernández (2008), Perú cuenta con tres especies de eucalipto: el Eucalyptus Globulus, el Eucalyptus Camaldulensis y el Eucalyptus Viminalis. De estas, el Eucalyptus Globulus representa aproximadamente el 90% de las plantaciones de eucalipto en el país. Lo cual plantea que las hojas de *Eucalyptus globulus* destacan por su abundancia y fácil acceso junto con el contenido de grupos funcionales favorables para el proceso de adsorción. Sin embargo, existen vacíos en el conocimiento respecto a su activación química, específicamente con sulfato de aluminio.

1.2.2. Formulación del Problema

Los biosorbentes derivados de biomasa vegetal, como las hojas de *Eucalyptus globulus* activadas químicamente, representan una alternativa económica y sostenible. Sin embargo, todavía existe el desconocimiento sobre las condiciones óptimas del procedimiento y los mecanismos que determinen su eficiencia en la eliminación de Cr (VI) lo que limita su aplicación para la protección de los ecosistemas ya dañados y sobre la remediación de aguas contaminadas.

Problema General

¿Cómo desarrollar un biosorbente capaz de remover óptimamente el Cr (VI) a partir de hojas de eucalipto pulverizadas activadas con sulfato de aluminio, considerando la influencia de la dosis del biosorbente, el pH y concentración de Cr (VI)?

Problemas específicos

- ¿Cómo sintetizar un biosorbente con buenas propiedades de adsorción a partir de hojas de eucalipto pulverizadas y sulfato de aluminio?
- ¿Cómo diseñar el proceso experimental de la remoción de Cr (VI) del agua considerando factores como el pH, la concentración inicial de Cr (VI) y la dosis del biosorbente?

- ¿Cuál es la metodología a seguir que permita determinar las condiciones óptimas de remoción de Cr (VI) mediante el análisis estadístico-matemático, determinando los factores y sus interacciones que influyan por su significancia estadística?

1.3. Objetivos de la investigación

Objetivo General

Evaluar la capacidad de remoción de Cr (VI) utilizando un biosorbente sintetizado a partir de hojas de *Eucalyptus globulus* pulverizadas activadas con sulfato de aluminio, optimizando el proceso mediante un diseño experimental Box–Behnken y la Metodología de Superficie de Respuesta, considerando la dosis del biosorbente, el pH y concentración de Cr (VI).

Objetivos específicos

- Sintetizar un biosorbente a partir de hojas de *Eucalyptus globulus* pulverizadas activadas químicamente con sulfato de aluminio, evaluando sus propiedades de adsorción mediante el análisis de FTIR.
- Diseñar y ejecutar el proceso experimental de remoción de Cr (VI) del agua contaminada, considerando factores como dosis del biosorbente, concentración inicial de Cr (VI) y pH utilizando el diseño de Box-Behnken para la planificación y el análisis estadístico posterior por ANOVA.
- Aplicar la Metodología de Superficie de Respuesta para determinar las condiciones óptimas de remoción de Cr (VI) mediante la determinación de los valores óptimos de los factores y sus interacciones de significancia estadística relacionadas mediante un modelo matemático.

1.4. Importancia y alcance de la Investigación

La presente investigación es significativa porque aborda la problemática ambiental generada por la presencia de cromo hexavalente en cuerpos de agua, un contaminante altamente carcinógeno y persistente. Las tecnologías convencionales de tratamiento pueden resultar costosas, ineficientes y complejas cuando se trabaja con altas concentraciones o cuando se requiere una solución de bajo impacto económico. En este contexto, el uso de materiales de origen vegetal, como las hojas de *Eucalyptus globulus*, representa una alternativa accesible y sostenible que puede contribuir a desarrollar las opciones de tratamiento para instalaciones con recursos limitados. Además, la activación química con

sulfato de aluminio permite mejorar la capacidad adsorbente del material biológico, ofreciendo un enfoque innovador para la remoción de Cr (VI).

El alcance de este estudio contiene la preparación del biosorbente a partir de hojas de *Eucalyptus globulus* activadas con sulfato de aluminio, la evaluación experimental de su capacidad para adsorber Cr (VI) en condiciones controladas en laboratorio y la determinación de los efectos e interacciones de factores operativos como el pH, la concentración inicial del contaminante y la dosis del adsorbente. Mediante procesos de análisis experimental y superficies de respuesta, se determinan las condiciones que favorecen la máxima efectividad de remoción. Sin embargo, el estudio se limita a un entorno de laboratorio, y aun así, los resultados obtenidos constituyen un soporte sólido para investigaciones futuras y para el desarrollo de tecnologías de tratamiento más económicas y sostenibles.

1.5. Limitaciones de la Investigación

Los experimentos se realizaron con soluciones acuosas preparadas en laboratorio, sin considerar la complejidad de aguas residuales reales, donde otros parámetros podrían interferir en la eficiencia de adsorción. Por ejemplo, los Valores Máximos Admisibles (VMA) de cromo hexavalente en descargas de aguas residuales industriales o no domésticas están regulados en 0,5 ppm, lo que indica que la composición de aguas reales podría afectar los resultados obtenidos en condiciones controladas. Estas limitaciones destacan la necesidad de considerar la logística de manejo de reactivos y la variabilidad del tipo de agua al inferir los resultados a aplicaciones prácticas o industriales.

II. REVISION DE LITERATURA

2.1 Marco Teórico

La contaminación de cuerpos de agua por metales pesados, como el cromo hexavalente, constituye un problema ambiental de gran importancia debido a su toxicidad y persistencia. Ante esta problemática, los biosorbentes derivados de biomasa vegetal han surgido como alternativas sostenibles para la remoción de metales pesados, siendo las hojas de *Eucalyptus globulus* un recurso prometedor. La eficacia de estos biosorbentes depende de múltiples variables, como la dosis de adsorbente, la concentración inicial de Cr (VI), el pH de la solución y el tiempo de contacto, las cuales pueden evaluarse y optimizarse mediante diseños experimentales y la metodología de superficie de respuesta (RSM).

2.2 Antecedentes del estudio

Estos están divididos en referenciales internacionales y nacionales que se presentan a continuación.

2.2.1 Investigación Internacional

En el trabajo de titulación de Verdugo, J. (2017), se plantea el aprovechamiento de la cáscara de la mandarina como un agente bioadsorbente en el tratamiento de aguas residuales contaminadas con metales pesados. El objetivo principal del trabajo es determinar la capacidad de biadsorción de metales pesados, tales como Pb y Cr, presentes en aguas residuales mediante la cáscara de mandarina como biadsorbente. El desarrollo del trabajo consistió en la preparación de soluciones a una concentración de 5 ppm de los metales para determinar el pH ideal para la remoción de Pb y Cr; mediante los métodos estadísticos confirmar la diferencia significativa entre la bioadsorción de Pb y Cr con diferentes tamaños de partícula, siendo las partículas óptimas las de 0.3 mm y mediante el estudio isotérmico se calculó la tasa máxima de retención de los metales de los bioadsorbentes. La conclusión del trabajo es que la cáscara de la mandarina usada como bioadsorbente tiene una excelente capacidad de bioadsorción del plomo en comparación al cromo.

Vásquez Valenzuela (2023), investigó la obtención de carbón activado a partir de cáscara de naranja agria (*Citrus aurantium*) y la evaluación de su capacidad de adsorción de cobre (II) en aguas residuales. En la primera etapa se realizó el secado de la cáscara de naranja agria, en donde se procesaron 3 muestras de 1 kg de cáscara húmeda. De cada muestra, se obtuvo el 43% de la cáscara seca. Este porcentaje de cáscara seca se trituró y se le agregó ácido fosfórico (H_3PO_4) al 30%, para su activación química. Posteriormente, se llevó a cabo la carbonización. En esta segunda etapa, la mezcla del ácido y cáscara se dejaron en una atmosfera inerte durante 3 horas a 450℃. Después de este proceso, el carbón obtenido fue sometido a un lavado con agua destilada, para quitar el exceso de ácido. El carbón lavado se puso a secar durante 24 horas a una temperatura de 60℃. En la tercera etapa del trabajo, se colocó una solución de CuSO4 a distintas concentraciones (26, 42, 90, 170 y 260 ppm) y pH (3, 4 y 5) en un matraz Erlenmeyer para llevar a cabo la bioadsorción del carbón activado obtenido. Se encontró que el pH óptimo es entre 4 y 5. Además, mediante los modelos de adsorción de Langmuir y Freundlich se evaluó la capacidad de bioadsorción. El modelo de Langmuir resultó ser el que mejor se ajustó a los datos experimentales.

Este trabajo de investigación de Addala et al. (2018) plantea establecer la capacidad de adsorción de las semillas de Nigella sativa, un residuo agroalimentario, para Pb(II) según el modo de procesamiento por lotes, variando el tiempo de contacto, la concentración inicial de Pb(II), el pH inicial y la dosis de sorbente. La cantidad de ion Pb(II) adsorbido en la interfaz es alta, del orden de 90,31 mg/g en condiciones óptimas. La caracterización FTIR indica la participación de los grupos hidroxilo y carbonilo del material dado en la adsorción de Pb (II). Las curvas isotermas y los estudios cinéticos demuestran que el modelo de Langmuir y la cinética de pseudo-segundo orden describen bien el fenómeno de sorción y se ajustan mejor a los datos experimentales de sorción. El ensayo de eliminación de plomo de los residuos de lodos activados y su efluente decantado confirma la eficiencia de esta biomasa, que alcanza el 97% y el 64% respectivamente. Con base en los resultados, la biomasa de desechos de semillas de Nigella sativa aparece como un absorbente potencial ecológico y de bajo costo para la sorción de plomo de las aguas residuales.

En el trabajo de Zhu, Y. et al. (2021) se plantea el aprovechamiento de la cáscara de maracuyá **(***Passiflora edulis***)** modificada con grupos carboxilo como agente biosorbente para el tratamiento de aguas contaminadas con colorantes catiónicos, contaminantes comúnmente presentes en efluentes industriales. El objetivo principal del estudio fue determinar la capacidad de adsorción selectiva de la cáscara de maracuyá modificada químicamente, especialmente frente a colorantes como azul de metileno, bajo distintas condiciones de pH y concentración. El desarrollo experimental incluyó la modificación química de la cáscara, pruebas de caracterización (FTIR, SEM), estudios isotérmicos y cinéticos, así como evaluaciones de selectividad frente a diferentes tipos de colorantes. Se concluyó que la modificación con grupos carboxilo mejora significativamente la capacidad adsorbente del material, gracias a la presencia de grupos funcionales activos (–COOH) que favorecen la retención de contaminantes catiónicos. El estudio demostró que este residuo agroindustrial puede ser una solución eficiente, económica y sostenible para la descontaminación de aguas.

2.2.2 Investigación Nacional

En el trabajo de Rodríguez (2019) la metodología empleada consistió en ensayos tipo Batch y continuo para la bioadsorción de metales pesados. El objetivo principal del trabajo es tratar las aguas de efluentes mineros aplicando biadsorbentes, realizando una caracterización fisicoquímica, utilizando la cáscara de zapallo (cucúrbita sp.) y carbón activado de los huesos de aceituna. La conclusión principal del trabajo es considerar la

bioadsorción de la biomasa empleada como la mejor alternativa para remover los metales pesados a bajas concentraciones de las aguas de los ríos de la Cuenca Porcón.

En el trabajo de tesis de Gutiérrez, S. (2015) se plantea la remoción de metales pesados empleando la cepa de Serratia marcesens M8a-2T para optimizar los parámetros fisicoquímicos de remoción de cadmio y plomo, la naturaleza física y genética de la resistencia, así como la confirmación de la identificación de la cepa empleando el gen del RNAr 16S. La biomasa logró remover 99,97 % de cadmio a pH 3 y 96 % de plomo a pH 7 y para conocer la máxima capacidad de retención (Qmax) se usaron las isotermas de Langmuir y se ajustó en 98,3 % al modelo de Langmuir. Los resultados del trabajo demuestran que la cepa es apta para ser empleada en procesos de bioadsorción de cadmio y plomo y que el proceso está optimizado para su escalamiento a nivel piloto.

Carbajal Olortegui y Mendoza Bellido (2021) evalúan la efectividad de la **c**áscara de naranja tratada químicamente como bioadsorbente para la remoción de plomo (Pb**)** e hierro (Fe) en aguas captadas por una planta de tratamiento en Chancay, Lima. El objetivo principal fue determinar la eficiencia de adsorción mediante diferentes concentraciones del biosorbente y condiciones experimentales controladas. Se concluyó que, utilizando 10 g de cáscara, se logró una remoción de hasta el 70 % del hierro **y** 40 % del plomo, lo cual demuestra que este residuo agroindustrial tiene potencial para aplicaciones en remediación de aguas contaminadas con metales pesados.

En una investigación desarrollada de Paredes & Valle (2020), se propuso el uso de cáscara de limón tratada con NaOH y $CaCl_2$ como material adsorbente para reducir la concentración de cromo hexavalente (Cr^{6+}) en aguas residuales de origen industrial. Se aplicó una dosis de 60 g del biosorbente con un tiempo de contacto de 10 horas, logrando reducir la concentración inicial de 50,37 ppm a 2 ppm**,** lo que representa una eficiencia de remoción del 96 %**.** El estudio demuestra el potencial de residuos frutales como soluciones sostenibles en el tratamiento de efluentes contaminados con metales pesados.

2.3. Bases teóricas

Con referencia a las bases teóricas presentes en la investigación se tiene lo siguiente.

2.3.1. Cromo Hexavalente (Cr (VI))

El cromo puede presentarse en varias formas de oxidación, siendo el Cr (VI) la especie más tóxica en medios acuosos. En solución, Cr (VI) se encuentra típicamente como

oxoaniones: $HCrO_4^-$, CrO_4^{2-} y $Cr_2O_7^{2-}$**,** dependiendo del pH, como se muestra en la Figura 2.3.

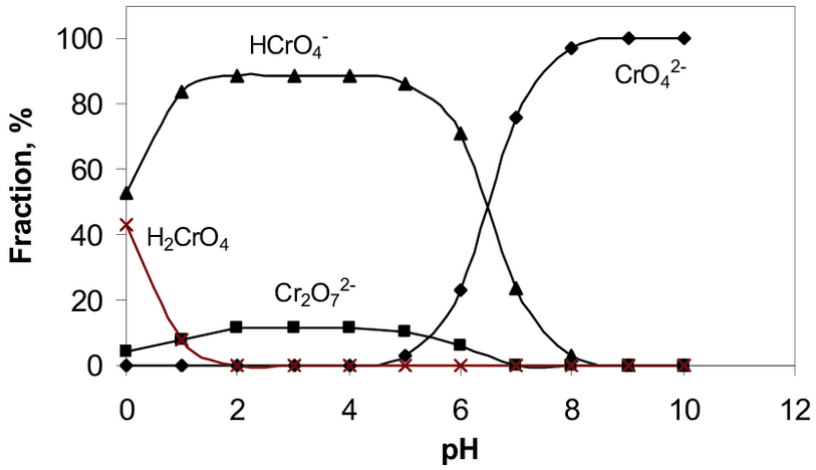

Figura 2.3. Especiación del Cr (VI). Extraído de Gulyas et. al. (2023)

- A pH ácido, predomina $HCrO_4^-$**.**
- A pH neutro o alcalino, la especie CrO_4^{2-} se vuelve dominante.

Estas especies aniónicas interactúan con sitios positivos o grupos funcionales del adsorbente, formando enlaces de coordinación, lo que permite su detención. El Cr (VI) es altamente tóxico, carcinogénico y mutagénico, con capacidad de atravesar membranas celulares y producir especies reactivas de oxígeno. Por ello, su presencia en agua potable o efluentes industriales está regulada internacionalmente.

2.3.2. Biosorción

La biosorción es un proceso pasivo mediante el cual la masa de origen biológico viva o muerta, adsorbe metales pesados u otros contaminantes desde soluciones acuosas. La metodología para estudiar la biosorción se basa en un enfoque interdisciplinario, mediante el cual el fenómeno puede ser estudiado, examinado y analizado desde diferentes ángulos y perspectivas, por químicos, (micro) biólogos e ingenieros (de procesos). (Volesky, 2007). Los mecanismos de biosorción incluyen adsorción física, química, intercambio iónico y formación de complejos, tal como se muestra en la Figura 2.4.

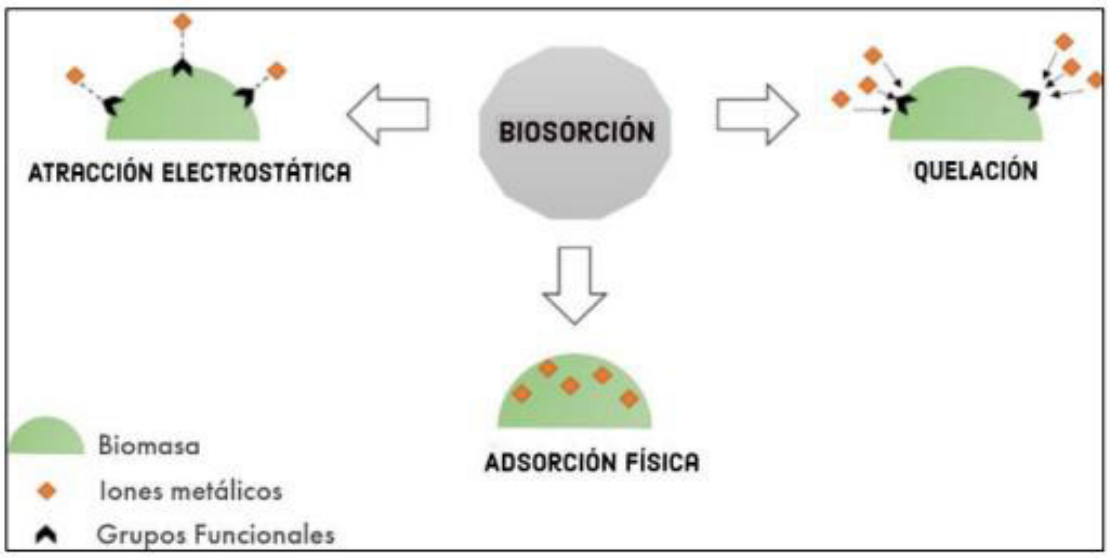

Figura 2.4. Mecanismos involucrados en la biosorción de metales pesados. Extraído de Vahabisani A, An C (2021).

La biosorción ofrece ventajas significativas sobre tecnologías convencionales como la precipitación química, filtración por membranas e intercambio iónico sintético, destacándose por su bajo costo, alta eficiencia, regenerabilidad del adsorbente y sostenibilidad ambiental (Fomina & Gadd, 2014).

2.3.3. Hojas de eucalipto como biosorbente

Las hojas de diversas plantas presentan compuestos bioactivos como ácidos fenólicos (incluyendo ácido tánico y gálico), compuestos resinosos y aceites esenciales. Por ejemplo, se ha identificado la presencia de α-pineno, p-cimeno, espatulenol y flavonoides, los cuales contribuyen a sus propiedades terapéuticas. (Cumpa Arias, L. Y., 2023)

Para este trabajo, las hojas de eucalipto provienen del árbol de la familia Myrtaceae, conocido por sus propiedades medicinales, que ayudan principalmente a problemas respiratorios. Presentan propiedades antisépticas, balsámicas y expectorantes.

En el ámbito de la adsorción de metales pesados, se preparan generalmente mediante los siguientes pasos:

1. Limpieza y secado de la nada vegetal.
2. Triturado y tamizado para obtener partículas del mismo tamaño.

3. Activación química (en este estudio, con sulfato de aluminio) para formar sitios activos y, con ello, mejorar la afinidad hacia contaminantes como cromo hexavalente.

2.3.4. Sulfato de aluminio ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$)

Es una sal inorgánica utilizada principalmente como coagulante en el tratamiento de aguas**.** Es un compuesto que, al disolverse en agua, forma iones de aluminio que reaccionan con la alcalinidad natural del agua, dando lugar a hidróxidos de aluminio que atrapan partículas coloidales, y su posterior eliminación por sedimentación o filtración (Muñoz et al., 2022).

El Al (III) es un catión con grado de hidrólisis moderada que perturba el equilibrio de disociación del agua y produce un aumento de la concentración de H+, quedando la solución ácida. El complejo $Al(H_2O)_3(OH)_3$ (especie polimérica formada a pH < 5) puede reaccionar con H+ u OH- mostrando sus características anfóteras. (Santacruz, 2016)

Hay estudios sobre coagulación donde señalan que la eficiencia del sulfato de aluminio está fuertemente condicionada tanto por la dosis del coagulante como por el pH del agua tratada. Según Salvatierra Flores (2025) reporta que el sulfato de aluminio tiene su mayor eficiencia coagulante en un rango de pH entre 5,5 y 7,8, donde además se precipita casi totalmente como hidróxido, dejando una concentración mínima de la sal en el agua tratada. Para la activación de biosorbentes vegetales, la impregnación con sulfato de aluminio hidratado permite la deposición de aluminio sobre la superficie de la biomasa, generando sitios con carga positiva y complejos de Al^{3+} con grupos funcionales como hidroxilos y carboxilos. Tales modificaciones han demostrado aumentar la afinidad del material hacia aniones, lo cual es especialmente útil para la retención de especies como Cr (VI). Este mecanismo de acción se fundamenta en la precipitación suave de $Al(OH)_3$ y la coordinación de aluminio con los grupos activos de la biomasa (Turpo Trujillo, 2024).

Adicionalmente, cuando se utiliza en plantas de tratamiento de agua potable, el sulfato de aluminio ha demostrado ser una buena sustancia para reducir turbidez y color, aunque su uso requiere un control adecuado de la dosis para minimizar la liberación residual de iones aluminio (Rodríguez Marín, 2016). Por estas razones, el sulfato de aluminio hidratado representa un agente químico eficiente tanto para la coagulación de aguas como para la modificación química de adsorbentes biológicos, lo que aporta una base sólida para su aplicación en procesos de remoción de metales pesados como el cromo hexavalente.

2.3.5. Variables involucradas en la remoción de Cr (VI)

Las variables que considerar para la remoción de cromo hexavalente son las siguientes, acorde a la Figura 2.5. A continuación, se definen los términos más significativos.

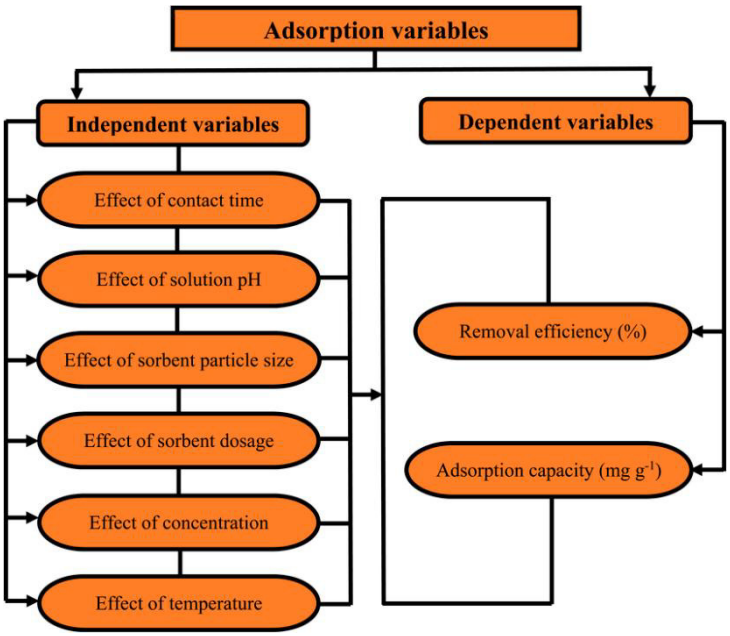

Figura 2.5. Principales variables que influyen en la adsorción de metales pesados. Adaptado de Bayuo, et. al. (2023)

- **pH**

El pH de la solución influye de manera directa en la especiación del Cr (VI) y en la carga superficial del adsorbente vegetal. A pH ácido destaca el $HCrO_4^-$ y la superficie del adsorbente suele ser de carga positiva, favoreciendo la adsorción por fuerza electrostática. A pH neutro o básico predomina CrO_4^{2-}, minimizando la afinidad con superficies no modificadas.

- **Dosis del biosorbente**

La dosis determina la cantidad de sitios activos disponibles para la retención del metal. Un aumento en la dosis generalmente incrementa la remoción hasta un límite, después del cual los sitios de adsorción excedentes no aportan mejoras significativas.

- **Concentración inicial del contaminante**

La concentración inicial afecta la saturación de los sitios activos**.** Concentraciones altas pueden superar la capacidad del biosorbente, reduciendo su capacidad de remoción porcentual, mientras que concentraciones bajas permiten una remoción más completa.

- **Tiempo de contacto**

El tiempo de contacto es el lapso necesario para que el cromo hexavalente y los sitios activos del biosorbente alcancen equilibrio en el proceso de adsorción**.** La biosorción suele ser rápida al inicio y se estabiliza conforme vayan ocupándose los sitios activos.

- **Temperatura**

La temperatura puede afectar tanto la capacidad de adsorción como la cinética. En general, una creciente temperatura puede acelerar la difusión de los iones hacia los sitios activos, aunque temperaturas muy altas pueden afectar negativamente la biomasa y disminuir su capacidad adsorbente.

2.3.6. Diseños Experimentales

Los diseños experimentales son herramientas de tipo metodológicas que permiten proyectar y efectuar experimentos de manera sistemática para evaluar las variables independientes y las varias variables de respuesta, controlando las fuentes de variabilidad y error experimental. Su aplicación facilita el reconocimiento de relaciones cuantitativas, la reducción del número de ensayos necesarios y la obtención de resultados confiables de manera estadística.

Diseño de Box Behken

Entre los diferentes tipos de diseños experimentales, el Diseño de Box-Behnken (BBD) es eficiente para la optimización de procesos que involucran de tres a más variables continuas, como en este trabajo de la remoción de Cr (VI) mediante adsorbente biológico.

El diseño de Box-Behnken es recomendable cuando las variables no se exploran en sus niveles extremos por motivos de seguridad, viabilidad experimental o por la estabilidad del sistema, como suele ocurrir en estos trabajos de investigación. La aplicación de este diseño permite:

- Determinar las condiciones óptimas de operación para maximizar la eficiencia de adsorción.
- Evaluar la interacción entre 3 factores a más.
- Construir curvas de contorno y superficies de respuesta, que favorecen la representación gráfica de los efectos combinados de las variables y la predicción de resultados fuera de los límites del experimento aplicado.

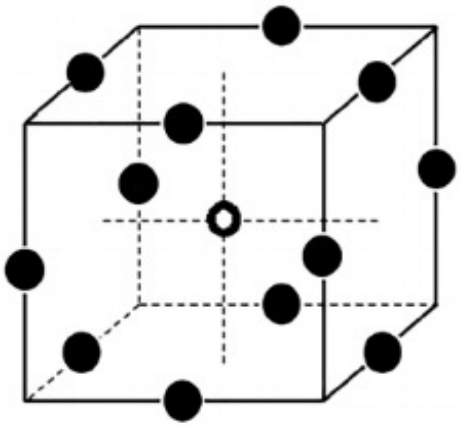

Figura 2.6. Representación del diseño experimental Box-Behnken. Extraído de Szpisják et. al. (2023)

2.3.7. Metodología de Superficie de Respuesta (RSM)

La RSM es un conjunto de métodos matemáticos y estadísticos diseñado para la optimización de procesos mediante la evaluación de manera simultánea de varias variables o factores independientes que afectan a las variables de respuesta. Fue formalizada por George E. P. Box y K. B. Wilson en el año 1951.

Esta metodología permite:

- Estimar la variación de las variables de respuesta cuando se varía la variable de respuesta cuando se ajustan varios factores de manera simultánea.
- Identificar cómo el efecto de una variable depende del nivel de otra, o sea la interacción entre ellas.
- Modelar la relación entre factores y variables de respuesta mediante funciones matemáticas, utilizando modelos de segundo orden (cuadráticos), lo que permite considerar los efectos que son lineales, cuadráticos y de interacción.
- Optimizar las condiciones del proceso, determinando los valores de los factores que maximizan (o minimizan) la respuesta; por ejemplo, la máxima adsorción de un metal

A continuación, Figura 2.7, se aprecia un ejemplo de RSM con la distinción de partes.

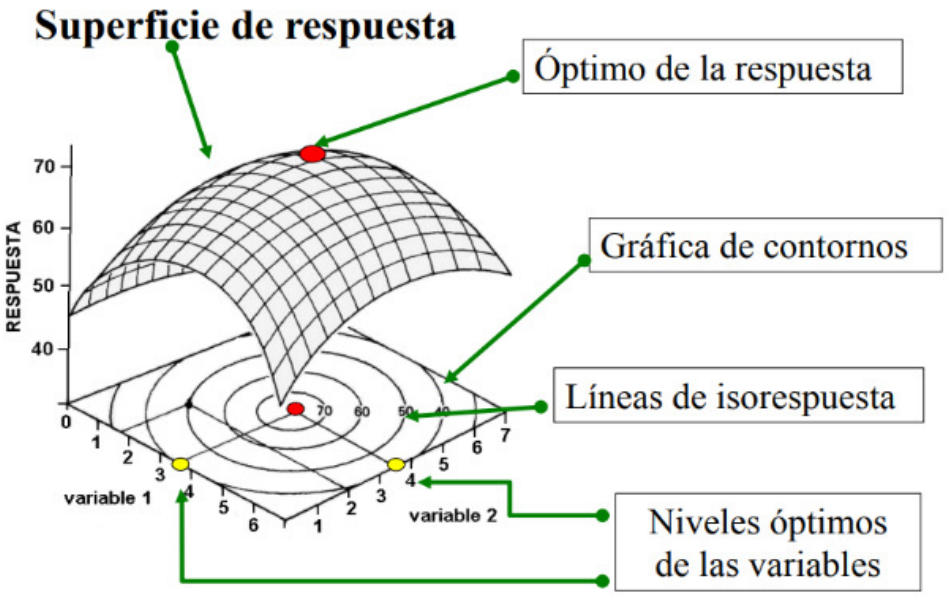

Figura 2.7. Ejemplo de superficie de respuesta. Adaptado de Metodología de la Superficie de Repuesta. Extraído de Goicochea, H (2018).

2.4. Definición de términos

Los siguientes términos son de mucha importancia para la comprensión plena de este trabajo.

Adsorbato: Sustancia existente en una solución que es retenida en la superficie de un adsorbente.

Adsorbente: Material sólido con la capacidad de retener contaminantes por mecanismos sean químicos o físicos. En este trabajo, se emplea biomasa de *Eucalyptus globulus* activada con sulfato de aluminio.

Capacidad de adsorción (q_e): Cantidad de contaminante retenido o adherido por unidad de masa de adsorbente en equilibrio, expresado en unidades de mg/g.

Concentración de equilibrio (C_e): Cantidad de Cr (VI) remanente en la solución después del proceso de adsorción, expresada en ppm (mg/L).

FTIR (Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier): Técnica analítica que utiliza luz infrarroja para identificar grupos funcionales mediante vibraciones moleculares.

Porcentaje de remoción: Proporción del contaminante eliminado de la solución.

Valores máximos admisibles (VMA): Son valores numéricos de la concentración de sustancias o parámetros sea físicos o químicos que caracterizan a los efluentes industriales o no domésticos que son descargados a la red de alcantarillado y que al excederse generan daños colaterales.

III. HIPOTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis

3.1.1. Hipótesis general

La activación de hojas pulverizadas de *Eucalyptus globulus* con sulfato de aluminio mejorará de manera significativa su capacidad adsorbente, logrando una remoción óptima de Cr (VI) en agua contaminada, determinada por los efectos individuales e interacciones de pH, concentración inicial del metal y dosis del biosorbente mediante el diseño de Box-Behnken y la Metodología de Superficie de Respuesta.

3.1.2. Hipótesis específicas

- La activación química de las hojas pulverizadas de *Eucalyptus globulus* con sulfato de aluminio incrementa significativamente la cantidad e intensidad de los grupos funcionales, mejorando así sus propiedades de adsorción respecto a las especies aniónicas de Cr (VI).
- Mediante la ejecución del proceso experimental usando el diseño experimental de Box-Behnken y análisis del ANOVA se determinarán los factores e interacciones estadísticamente significativos, dosis del biosorbente, concentración inicial de Cr (VI) y pH, que influencian en la remoción de Cr (VI) y capacidad de adsorción.
- Mediante el análisis estadístico – matemático basado en la Metodología de la Superficie de Respuesta se determinará las condiciones óptimas de concentración inicial de Cr (VI), pH, dosis del adsorbente y sus interacciones que maximicen el porcentaje de remoción, cumpliendo con los VMA, y capacidad adsorbente del Cr (VI).

En los Anexos, se presenta la Matriz de Consistencia donde se aprecia la relación de problemas, objetivos y las hipótesis (Ver Tabla 9.1)

3.2. Variables

Las variables más importantes consideradas para este estudio son las siguientes**:**

3.2.1. Variables independientes (VI):

- pH
- Concentración inicial de Cr (VI)
- Dosis del biosorbente

3.2.2. Variables dependientes (VD):

- Porcentaje de remoción de Cr (VI)
- Capacidad de adsorción del biosorbente

3.3. Operacionalización de las variables

Tabla 3.2. Operacionalización de variables

Variable	Tipo	Definición conceptual	Definición operacional	Niveles / Fórmula	Unidad	Instrumento
pH	Independiente	Medida de acidez o basicidad de una solución	Ajustado con HCl y NaOH antes de cada ensayo.	2.0, 3.8, 5.6	—	pH-metro calibrado
Concentración inicial de Cr (VI)	Independiente	Cantidad de Cr (VI) presente en la solución antes de la adsorción.	Soluciones preparadas a partir de una solución madre de $K_2Cr_2O_7$.	25, 50, 75 mg/L	mg/L	Material volumétrico aforado
Dosis del biosorbente	Independiente	Cantidad de adsorbente por litro de solución.	Masa proporcional al volumen real de 200 mL.	1, 3, 5 g/L	g/L	Balanza analítica
Porcentaje de remoción de Cr (VI)	Dependiente	Porcentaje de Cr (VI) eliminado	Calculado a partir de C_0 y C_e obtenidas por UV–Vis.	$\%R = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100$	%	Espectrofotómetro UV–Vis
Capacidad de adsorción (q_e)	Dependiente	Cantidad de Cr (VI) retenida por gramo de biosorbente.	Calculado a partir de C_0, C_e y la dosis por litro.	$q_e = \frac{C_0 - C_e}{dosis\ (\frac{g}{L})}$	mg/g	UV–Vis + balanza

IV. MATERIALES Y METODOS

4.1. Área de estudio

El desarrollo experimental de esta investigación se llevó a cabo en dos instalaciones. La activación química del biosorbente y la preparación de las soluciones de cromo se realizaron en un laboratorio de la Facultad de Química e Ingeniería Química (FQIQ), los cuales cuentan con equipos adecuados para la preparación de muestras, manejo de reactivos y control de variables experimentales.

Por otro lado, los ensayos de adsorción fueron efectuados en la Unidad de Servicios de Análisis Químicos (USAQ) y la lectura de la absorbancia mediante uso de Espectrofotómetro UV Visible se llevaron a cabo en el equipo disponible en la oficina del asesor, permitiendo completar la evaluación de la remoción del contaminante.

4.2. Diseño de la investigación

La investigación es de tipo cuantitativo experimental, con un diseño Box–Behnken de tres factores:

- pH (2, 3.8, 5.6)
- Dosis del adsorbente (1, 3, 5 g/L)
- Concentración inicial de Cr (VI) (25, 50, 75 mg/L)

A continuación, en la Tabla 4.2 se presenta la matriz del diseño empleado:

Tabla 4.2. Matriz de diseño de Box Behnken para los factores de pH, dosis del biosorbente y concentración inicial de Cr (VI)

Ensayo	pH (real)	Dosis (g/L)	C_0 (mg/L)	pH (cod.)	Dosis (cod.)	C_0 (cod.)
1	2.0	1	50	-1	-1	0
2	5.6	1	50	+1	-1	0
3	2.0	5	50	-1	+1	0
4	5.6	5	50	+1	+1	0
5	2.0	3	25	-1	0	-1
6	5.6	3	25	+1	0	-1
7	2.0	3	75	-1	0	+1
8	5.6	3	75	+1	0	+1
9	3.8	1	25	0	-1	-1
10	3.8	5	25	0	+1	-1
11	3.8	1	75	0	-1	+1
12	3.8	5	75	0	+1	+1
13	3.8	3	50	0	0	0
14	3.8	3	50	0	0	0
15	3.8	3	50	0	0	0

4.3. Preparación del biosorbente

Las hojas de *Eucalyptus globulus* fueron recolectadas, lavadas, secadas y trituradas. Posteriormente se sometieron a activación química utilizando sulfato de aluminio.

4.3.1. Lavado y secado de hojas

Como se aprecia en la Figura 4.1., las hojas de eucalipto fueron lavadas con agua de grifo y posteriormente lavadas con agua destilada para remover tierra e impurezas presentes en las hojas.



Figura 4.1. Hojas de eucalipto lavadas y puestas a secar a temperatura ambiente.

Posteriormente se colocaron en horno a 70 °C por 24 horas.



Figura 4.2. Hojas de eucalipto secas a 70°C

4.3.2. Trituración y tamizado

Mediante el uso de un molino de cuchillas se procedió a triturar las hojas para posteriormente tamizar, con el equipo de tamiz que se encuentra en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la FQIQ, para conseguir que toda la materia tenga el mismo tamaño de superficie (Malla 50) tal como se aprecia en la Figura 4.3.



Figura 4.3. Equipo de tamiz

4.3.3. Impregnación con $Al_2(SO_4)_3.18\ H_2O$

Se prepara una solución de sulfato de aluminio 0.2 M. Para ello, se pesó cuidadosamente la cantidad correspondiente de $Al_2(SO_4)_3.18H_2O$ y se disolvió en un volumen adecuado de agua destilada bajo agitación continua hasta lograr su completa solubilización, tal cual se observa en la Figura 4.4.

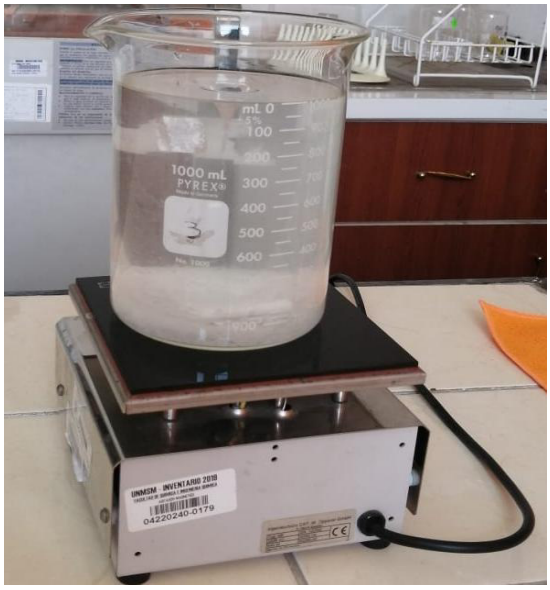

Figura 4.4. Agitación para la preparación de sulfato de aluminio 0.2 M

Se añade el polvo seco en relación 1:10 g/mL, ajustamos el pH a 4 – 5 para evitar precipitación de $Al(OH)_3$ y se agitó a 60°C durante 3 horas. Dejar reposar por 24 horas para que los iones Al^{3+} se fijen químicamente a la superficie (ver Figura 4.5)

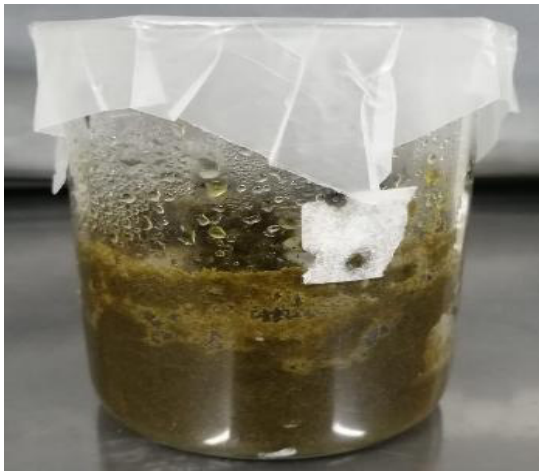

Figura 4.5. Biosorbente ya activado después de la agitación con sulfato de aluminio 0.2 M

Se filtra toda la biomasa tratada, tal cual se visualiza en la figura 4.6, y se lava con agua destilada hasta que el pH del filtrado sea neutro y se utilizada $BaCl_2$ para detectar sulfatos



Figura 4.6. Parte del filtrado del adsorbente activado

4.3.4. Secado final y almacenamiento

Después de lavar el adsorbente retenido en el papel filtro con agua destilada, se procede a dejar 1 hora a temperatura ambiente para luego hacer el uso de horno mufla (ver Figura 4.7), ubicado en planta piloto de alimentos ubicado en las afueras de la FQIQ.



Figura 4.7. Horno de calor Marca Memmert

Después del secado a 70 °C por 24 horas, se almacenó en un frasco ámbar para los análisis posteriores tal cual se aprecia en la Figura 4.8.

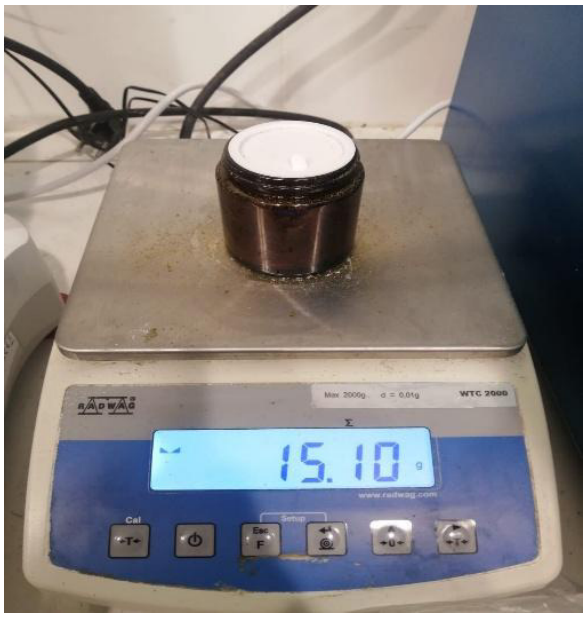

Figura 4.8. Almacenamiento de adsorbente activado

4.4. Preparación de soluciones de cromo

Se preparó una solución madre de 1000 ppm de Cr (VI) a partir de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$), utilizando los siguientes datos

- Masa molar del $K_2Cr_2O_7$ = 294.18 g/mol

Cada mol contiene 2 átomos de Cr, por lo que:

$$Masa\ de\ Cr\ en\ 1\ mol = 2 \times 52 = 104\ g/mol$$

- Fracción másica de Cr en $K_2Cr_2O_7$

$$Fracción\ (Cr) = \frac{104}{294.18} = 03534$$

Es decir, el dicromato tiene 35.34% de Cr (VI)**.**

- Cálculo de la masa para obtener 1000 ppm

$$m_{K_2Cr_2O_7} = \frac{1000}{0.3534} = 283\ \text{mg} = 2.83\ \text{g}$$

Se necesita 2.83 g de $K_2Cr_2O_7$ por litro para obtener 1000 ppm de Cr (VI).

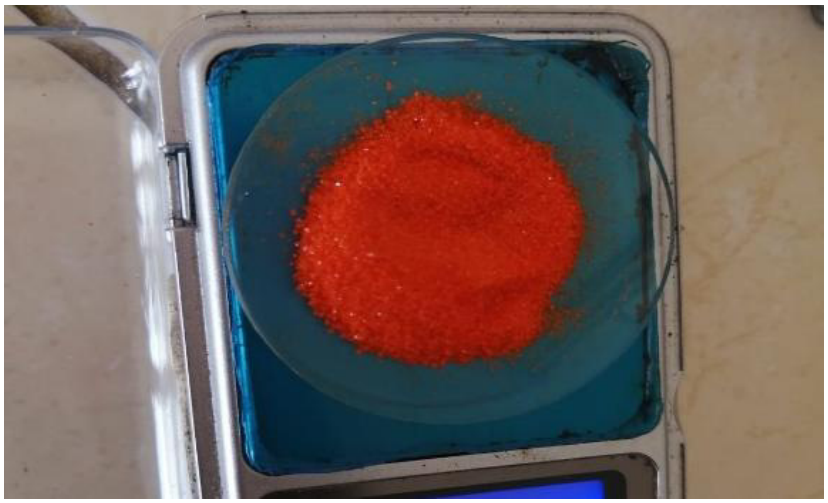

Figura 4.9. Pesaje de la cantidad de $K_2Cr_2O_7$

4.4.1 Preparación de soluciones de trabajo

A partir de la solución madre de 1000 ppm**,** se prepararon las soluciones de trabajo mediante diluciones siguiendo la ecuación de dilución:

$$C_1V_1 = C_2V_2 \qquad (1)$$

donde:

- C_1 = 1000 ppm (solución madre)
- C_2 = concentración deseada
- V_2= 1000 mL (volumen final utilizado en cada ensayo)

a) Preparación de 25 ppm

$$V_1 = \frac{C_2 V_2}{C_1} = \frac{25 \times 1000}{1000} = 25\ mL$$

Se tomaron 25 mL de la solución madre y se enrasaron a 1000 mL con agua destilada

b) Preparación de 50 ppm

$$V_1 = \frac{C_2 V_2}{C_1} = \frac{50 \times 1000}{1000} = 50\ mL$$

Se tomaron 50 mL de la solución madre y se enrasaron a 1000 mL con agua destilada

c) Preparación de 75 ppm

$$V_1 = \frac{C_2 V_2}{C_1} = \frac{75 \times 1000}{1000} = 75\ mL$$

Se tomaron 75 mL de la solución madre y se enrasaron a 1000 mL con agua destilada

4.5. Ensayos de adsorción

Estos comprendieron diversas etapas que a continuación se describen.

4.5.1. Preparación previa al ensayo

Antes de iniciar cada ensayo, se ajustó el pH de la solución a los valores establecidos (2.0, 3.8 o 5.6) utilizando soluciones diluidas de NaOH y HCl, asegurando una estabilización adecuada antes de adicionar el adsorbente. La lectura del pH se realizó con el Medidor de pH/ORP/ Temperatura de mesa MILWAUKEE – MW 151 MAX. (Ver Figura 4.10)



Figura 4.10. Lectura de pH en las soluciones de trabajo

Se pesó la cantidad de adsorbente necesaria según la dosis (1, 3 o 5 g/L), lo que corresponde a 0.2 g, 0.6 g y 1.0 g respectivamente por cada 200 mL de solución. (Ver figura 4.11)



Figura 4.11. Pesaje del adsorbente activado para las soluciones de trabajo.

4.5.2. Equipo utilizado

Los ensayos se llevaron a cabo en un equipo de agitación isotérmico de cuatro hornillas**,** con control de temperatura y agitación magnética. Este equipo permitió mantener condiciones homogéneas y reproducibles para todos los tratamientos. (ver Figura 4.12)



Figura 4.12. Uso del equipo de agitación con las soluciones de trabajo

Condiciones del ensayo

- **Volumen de trabajo:** 200 mL
- **Temperatura:** 25 °C (constante para todos los ensayos)
- **Tiempo de contacto:** 1 hora
- **pH inicial:** ajustado de acuerdo con el diseño experimental
- **Peso del adsorbente:** ajustado de acuerdo con el diseño experimental
- **Agitación:** constante mediante barras magnéticas a 500 RPM

Durante la agitación, el adsorbente permaneció en suspensión asegurando un adecuado contacto con el contaminante para favorecer el proceso de adsorción.

4.5.3. Finalización y filtrado

Al término del tiempo de contacto, se procedió al filtrado de la mezcla utilizando papel filtro Whatman N° 42 para remover completamente el adsorbente.

Se recolectaron 90 mL del filtrado para su posterior análisis mediante espectrofotometría UV–Vis (ver Figura 4.13). El adsorbente retenido en el filtro se lavó con

agua destilada para eliminar restos de la solución. Se secó a temperatura ambiente por 48 horas y después en horno mufla a 70 °C por 24 horas permitiendo luego realizar el análisis FTIR al que presente mayor capacidad de remoción y mayor capacidad de adsorción para caracterización.



Figura 4.13. Filtrados obtenidos y adsorbente lavado tras el proceso de adsorción de Cr (VI).

4.6. Análisis UV Visible

El análisis de las concentraciones residuales de Cr (VI) en las soluciones tratadas se realizó mediante espectrofotometría UV–Visible, utilizando el método colorimétrico basado en la formación del complejo Cr (VI)–difenilcarbazida (mediante el método EPA 7196A). Este método es ampliamente empleado debido a su alta sensibilidad y selectividad para especies cromadas en solución acuosa. La difenilcarbazida reacciona con el Cr (VI) bajo condiciones ácidas para generar un complejo de color púrpura, cuya absorbancia se mide típicamente a una longitud de onda de 540 nm.

Previo a la cuantificación de las muestras, se preparó una curva de calibración con soluciones patrón en el rango de 0.25, 0.50, 1.00, 1.50, 2.0 mg/L de Cr (VI) (ver Figura 4.14), obteniendo una ecuación lineal con alto coeficiente de determinación ($R^2 = 0.9911$), lo que garantiza la confiabilidad del método analítico.

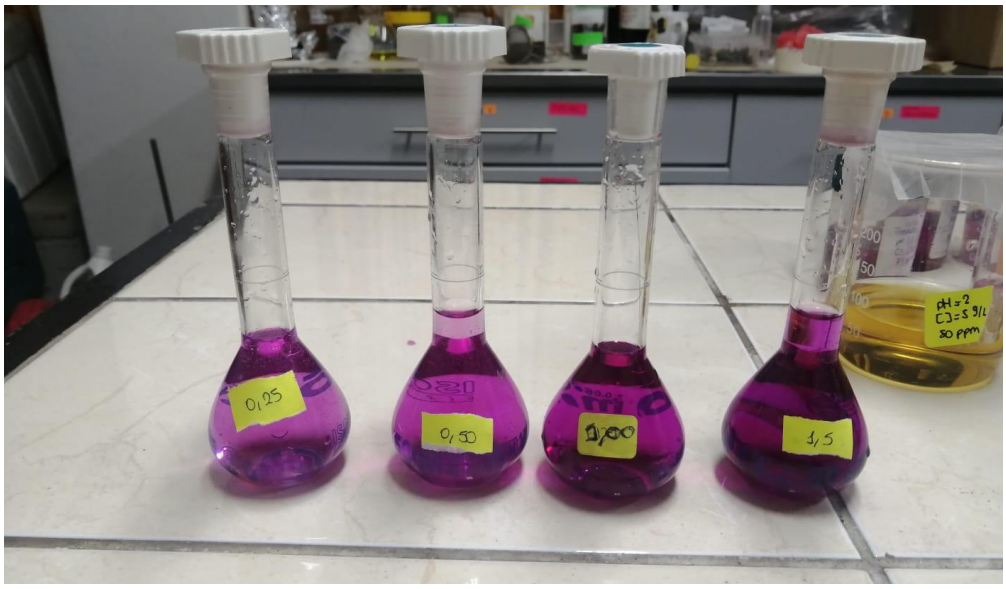

Figura 4.14. Soluciones patrón ya medidas con reactivo colorímetro para la curva de calibración.

Todas las muestras filtradas fueron tratadas con el reactivo colorimétrico y se dejaron reaccionar el tiempo adecuado (5 minutos) para asegurar el desarrollo completo del color. Posteriormente, tal cual se aprecia en la Figura 4.15, se midió la absorbancia en el espectrofotómetro UV–Visible (L PG Instruments – T60 UV-Visible Spectrophotometer), asegurando la limpieza de las celdas y la correcta calibración del equipo para evitar interferencias.



Figura 4.15. Espectrofotómetro T60 y frascos de muestras listos para la lectura.

Los valores obtenidos se transformaron a concentraciones reales aplicando los factores de dilución correspondientes cuando fue necesario. Estos datos fueron fundamentales para

el cálculo de los parámetros de adsorción, como la capacidad de adsorción (q_e) y el porcentaje de remoción**,** los cuales se emplearon posteriormente en el análisis estadístico y la modelación.

4.7. Análisis estadístico

Se empleó el diseño Box–Behnken para evaluar efectos individuales, interacciones y obtener condiciones óptimas mediante superficie de respuesta. Los resultados se analizaron mediante el ANOVA, interpretación de coeficientes del modelo ajustado y evaluación de los gráficos de diagnósticos elaborados en el programa Minitab 19.

V.RESULTADOS

5.1. Presentación y análisis de resultados

Se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de adsorción, el análisis espectrofotométrico y la modelación estadística empleando el diseño Box–Behnken. Se demuestran los datos experimentales, seguidos de sus tendencias gráficas y del análisis estadístico que permitió interpretar el efecto de cada variable y determinar las condiciones óptimas del proceso.

5.1.1. Curva de calibración

La curva de calibración se construyó utilizando soluciones patrón de Cr (VI) en el rango de 0.25 a 2.0 mg/L desarrolladas con reactivo colorimétrico difenilcarbazida (DPC). La relación entre la concentración y la absorbancia exhibe un comportamiento lineal. Los resultados se visualizan en la Tabla 5.1

Tabla 5.1. Valores de absorbancia obtenidos de las soluciones patrón de Cr (VI) para la construcción de la curva de calibración

Concentración	Absorbancia
0	0.00
0.25	0.236
0.5	0.339
1	0.564
1.5	0.963
2	1.262

Ecuación de la curva:

$$\mathbf{A = 0.6122 \cdot C + 0.025} \quad (2)$$

El coeficiente de determinación $\mathbf{R^2 = 0.9911}$ confirma una excelente linealidad, garantizando la veracidad del método para el análisis de las muestras

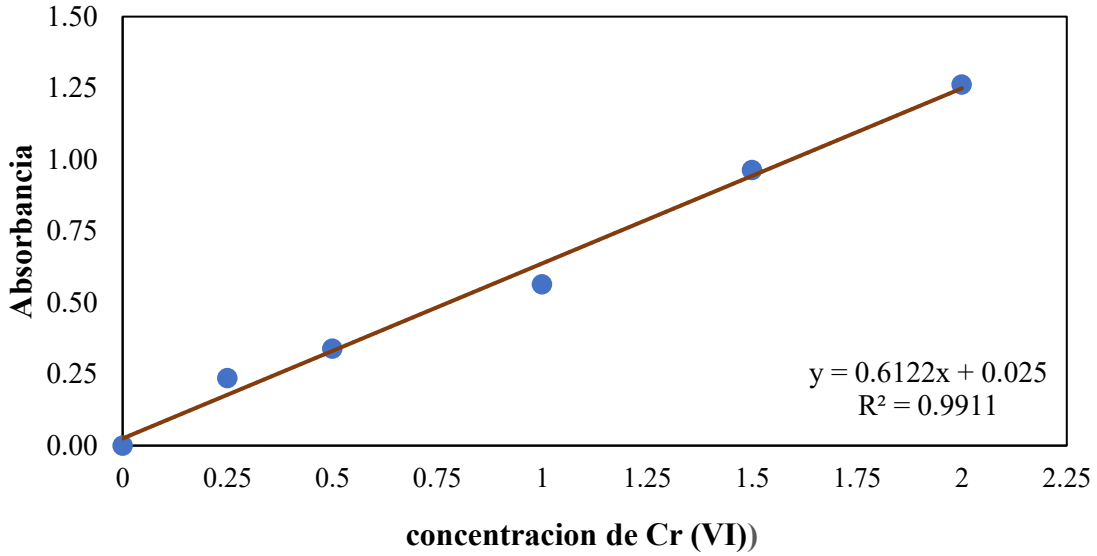

Figura 5.1. Relación entre absorbancia y concentración de Cr (VI) para la curva de calibración (λ = 540 nm).

5.1.2. Resultados experimentales

Para el procesamiento de los datos se emplearon las siguientes ecuaciones:

Cálculo de la concentración final (C_e):

$$C_e = \frac{A - 0.025}{0.6122} \times FD \quad (3)$$

- **A**: Absorbancia medida en el espectrofotómetro a 540 nm
- **C_e**: Concentración final de Cr (VI) en el equilibrio (mg/L)
- **FD**: Factor de dilución aplicado a cada muestra

Porcentaje de remoción:

$$\%R = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (4)$$

- **C_e**: Concentración final de Cr (VI) en el equilibrio (mg/L)

- **C_0**: Concentración inicial de Cr (VI) en la solución (mg/L)

Capacidad de adsorción:

$$q_e = \frac{C_0 - C_e}{dosis\ (\frac{g}{L})} \quad (5)$$

- **q_e**: Capacidad de adsorción del biosorbente (mg de Cr (VI) por gramo de adsorbente)
- **dosis (g/L)**: Dosis del adsorbente expresada en gramos por litro

Concentración final del filtrado:

$$C_f = C_o \times \left(1 - \frac{\%R}{100}\right) \quad (6)$$

- C_f: Concentración final de filtrado (cantidad de cromo que se ha quedado sin remover)

A continuación, en la tabla 5.2 se muestran los resultados obtenidos en los 15 ensayos del diseño BBD, incluyendo las concentraciones finales determinadas mediante la ecuación de la curva de calibración, así como las variables de respuesta de porcentaje de remoción y capacidad de adsorción.

Tabla 5.2. Condiciones experimentales y parámetros obtenidos en los ensayos de adsorción: concentración final, porcentaje de remoción y capacidad de adsorción

N° Ensayo	pH	Dosis (g/L)	[] inicial Cr^{+6}	Factor de dilución	Absorbancia	[] en ppm (según curva)	[] Real	% de remoción	Capacidad de adsorción (mg/g)
1	2	1	50	20	0.128	0.1682	3.365	93.2702	46.6351
2	5.6	1	50	50	0.615	0.9637	48.187	3.6263	1.8131
3	2	5	50	1	0.074	0.0800	0.080	99.8399	9.9840
4	5.6	5	50	50	0.631	0.9899	49.494	1.0127	0.1013
5	2	3	25	1	0.049	0.0392	0.039	99.8432	8.3203
6	5.6	3	25	50	0.232	0.3381	16.906	32.3750	2.6979
7	2	3	75	1	0.061	0.0588	0.059	99.9216	24.9804

8	5.6	3	75	50	0.788	1.2463	62.316	16.9117	4.2279
9	3.8	1	25	50	0.313	0.4704	23.522	5.9131	1.4783
10	3.8	5	25	50	0.325	0.4900	24.502	1.9928	0.0996
11	3.8	1	75	50	0.867	1.3754	68.768	8.3088	6.2316
12	3.8	5	75	50	0.877	1.3917	69.585	7.2199	1.0830
13	3.8	3	50	50	0.593	0.9278	46.390	7.2199	1.2033
14	3.8	3	50	50	0.631	0.9899	49.494	1.0127	0.1688
15	3.8	3	50	50	0.587	0.9180	45.900	8.1999	1.3667

Para calcular la concentración final de cromo que no fue removido, se utilizaron los que presentaron mayor porcentaje de remoción, los cuales fueron los siguientes:

Ensayo 01, bajo las condiciones pH: 2, Dosis: 1 g/L, 50 ppm

$$C_f = 50 \times \left(1 - \frac{93.270}{100}\right) = 3.365\ ppm$$

Ensayo 03, bajo las condiciones pH: 2, Dosis: 5 g/L, 50 ppm

$$C_f = 50 \times \left(1 - \frac{99.840}{100}\right) = 0.080\ ppm$$

Ensayo 05, bajo las condiciones pH: 2, Dosis: 3 g/L, 25 ppm

$$C_f = 25 \times \left(1 - \frac{99.843}{100}\right) = 0.0392\ ppm$$

Ensayo 07, bajo las condiciones pH: 2, Dosis: 3 g/L, 75 ppm

$$C_f = 75 \times \left(1 - \frac{99.922}{100}\right) = 0.0588\ ppm$$

Se puede visualizar que para los 4 ensayos mencionados con porcentaje de remoción mayores a 90 %, se aprecia que para los ensayos 03, 05 y 07 sus concentraciones finales de cromo son valores por debajo de 0.5 mg/L lo cual demuestra que se cumple con los VMA indicados en el DS 010-2019-VIVIENDA.

5.1.3. Representación gráfica de resultados

Con la finalidad de complementar la información experimental, en esta sección se muestran las gráficas correspondientes a los valores obtenidos de la tabla 5.2. Las representaciones permiten diferenciar con mayor claridad las tendencias generales en ambas

variables de respuesta (porcentaje de remoción y la capacidad de adsorción (q_e)) en función de los factores individuales: concentración inicial de Cr (VI), dosis del adsorbente y pH.

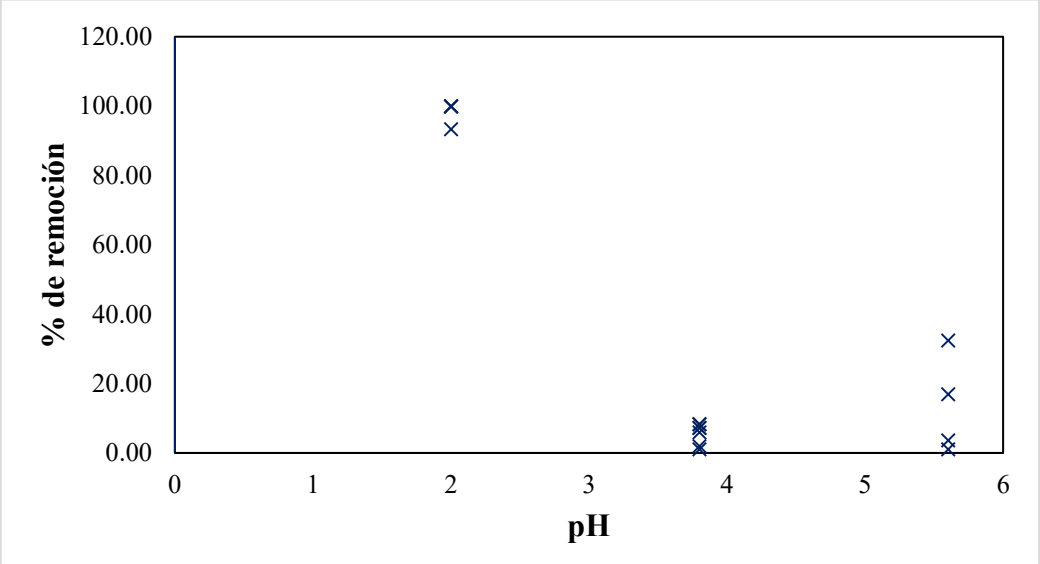

Figura 5.2. Comportamiento del porcentaje de remoción de Cr (VI) en función del pH

Tal cual se aprecia en la Figura 5.2, el comportamiento del % de remoción en función del pH entre valores de 3.8 y 5.6 oscila entre el 20 % a cerca del 40%, mientras que a pH igual a 2 se visualiza un porcentaje de remoción cercano al 100 %.

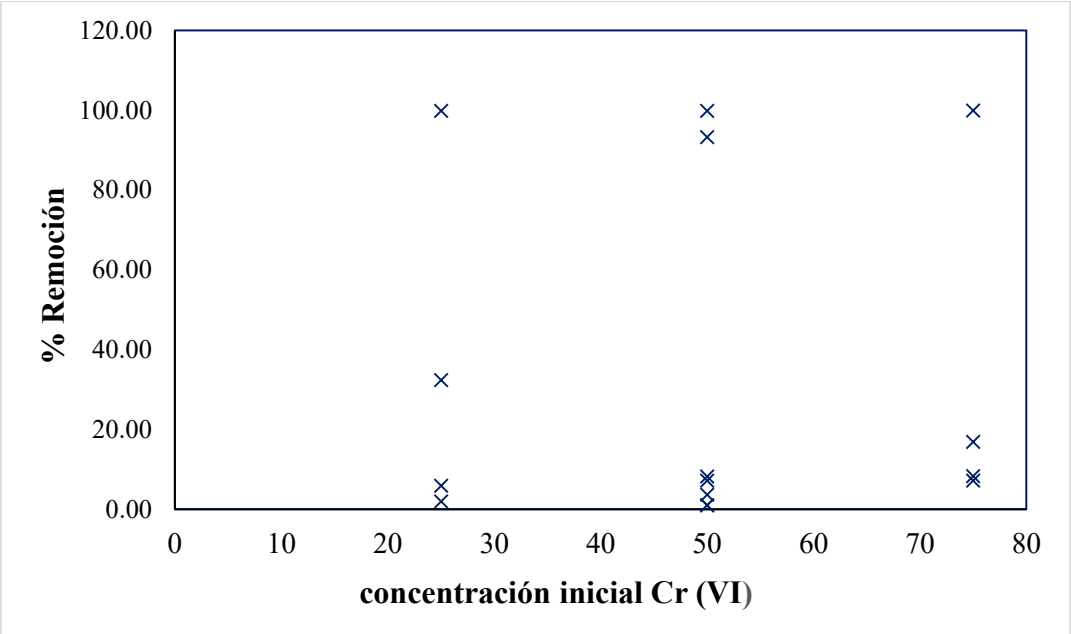

Figura 5.3. Comportamiento del porcentaje de remoción de Cr (VI) en función de la concentración inicial de Cr (VI).

Tal cual se aprecia en la Figura 5.3, el comportamiento del % de remoción en función de los valores de concentración inicial de Cr (VI) que oscilan de 25, 50 y 75 ppm se visualiza

una respuesta cercana al 100 % de porcentaje de remoción que varía acorde al valor de pH que se ha utilizado en cada experimento.

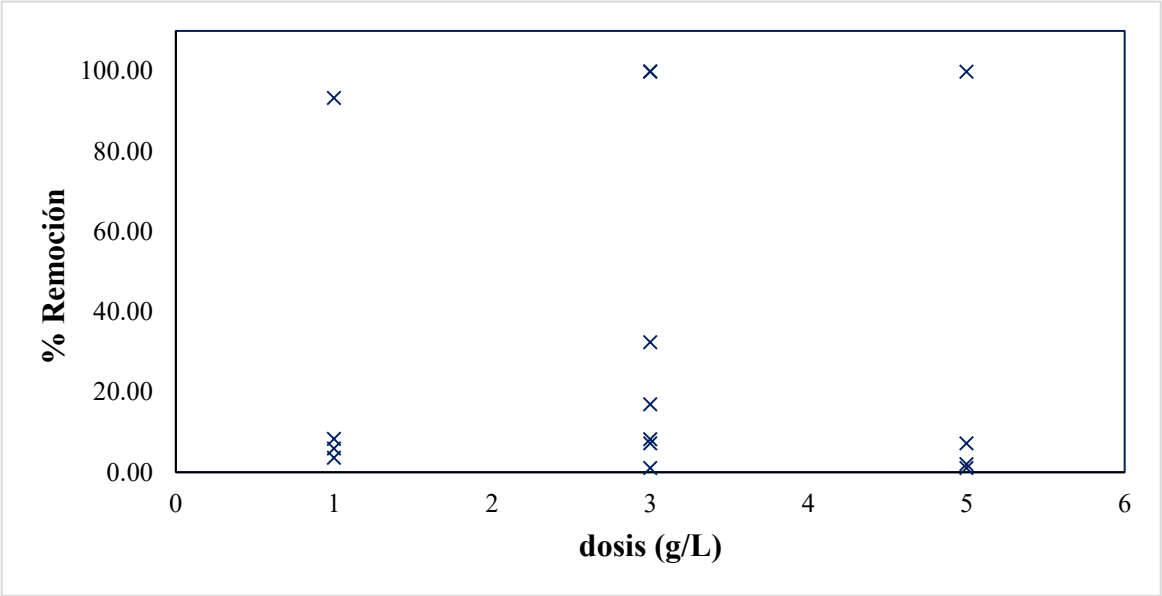

Figura 5.4. Comportamiento del porcentaje de remoción de Cr (VI) en función de la dosis.

De la Figura 5.4, el comportamiento del % de remoción en función a la dosis del adsorbente entre valores de 1, 3 y 5 g/L oscila entre el 0 % a cerca del 40% para la mayoría de los experimentos, sin embargo, también se visualiza un porcentaje de remoción cercano al 100 % que también varía acorde al valor de pH que se ha utilizado en cada experimento.

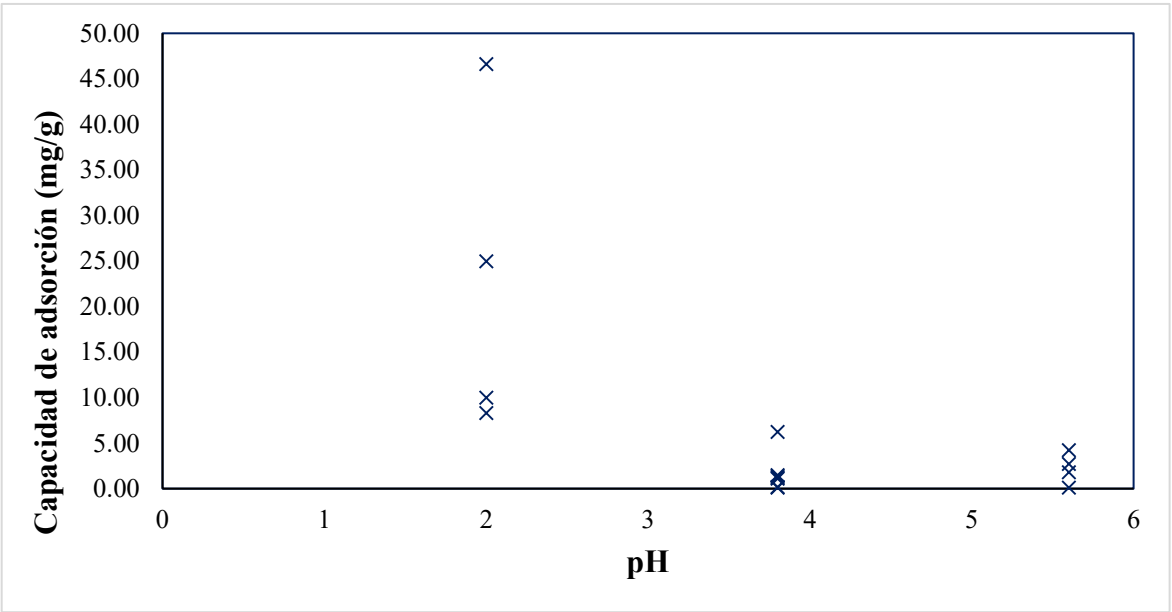

Figura 5.5. Comportamiento de la capacidad de adsorción en función del pH

Tal cual se aprecia en la Figura 5.5, el comportamiento de la capacidad de adsorción (mg/g) frente a los valores de pH que parte de 3.8 y 5.6 se puede visualizar una capacidad de adsorción de 5 mg/g aproximadamente, mientras que a un pH igual a 2 se logra ver un comportamiento creciente llegando a obtenerse un valor de 45 mg/g aproximadamente.

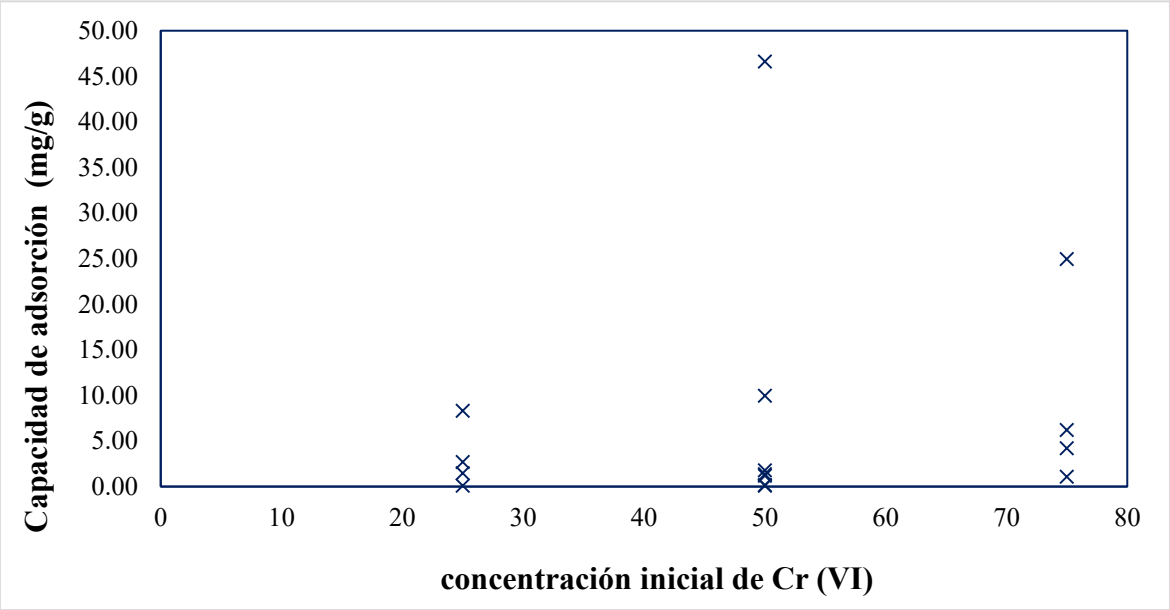

Figura 5.6. Comportamiento de la capacidad de adsorción en función de la concentración inicial de Cr (VI)

Tal cual se aprecia en la Figura 5.6, el comportamiento de la capacidad de adsorción en función de la concentración inicial de Cr (VI) donde se visualiza que a valores de 50 ppm se observa una capacidad de adsorción mínima cercana al 10 mg/g mientras que a 75 ppm hay una capacidad cercana al 25 mg/g. El máximo valor obtenido fue cercano al 47 % con un valor de concentración inicial de Cr (VI) igual a 50 ppm.

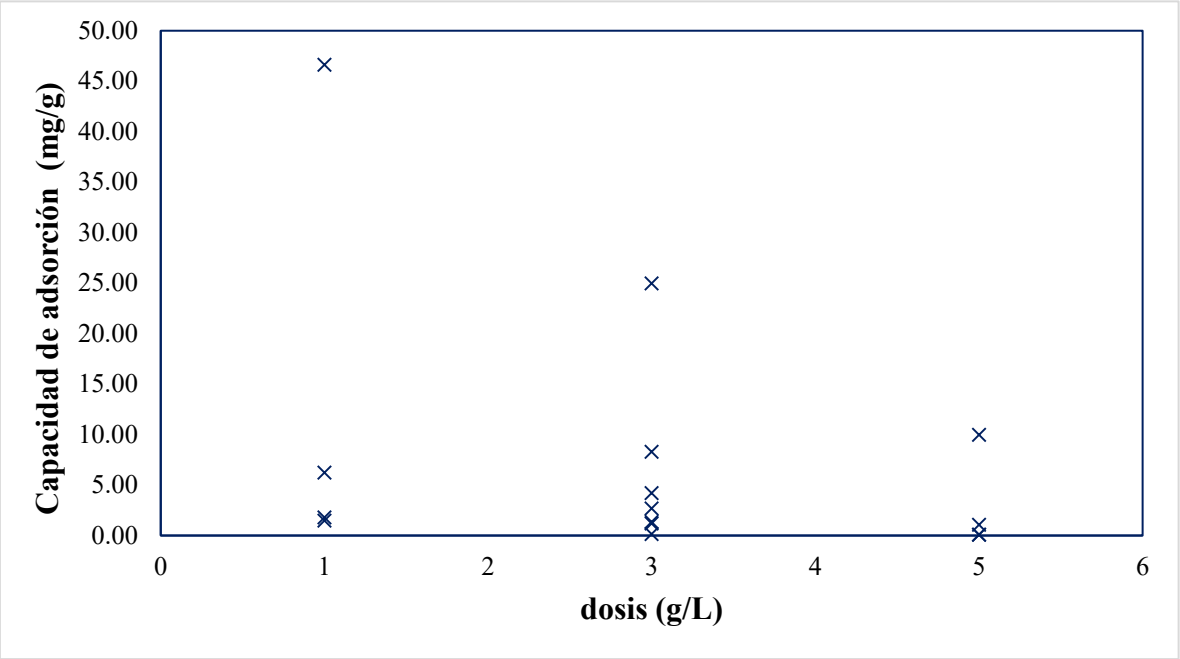

Figura 5.7. Comportamiento de la capacidad de adsorción de Cr (VI) en función de la dosis (g/L).

Tal cual se aprecia en la Figura 5.7, el comportamiento de la capacidad de adsorción en función a la dosis del adsorbente que a valor de 3 g/L obtuvo una capacidad cercana a 25 mg/g mientras que a 5 g/L logró una capacidad cercana a 10 mg/g. La capacidad de adsorción máxima fue cercana a 47 mg/g teniendo un valor de dosis de 1 g/L.

5.1.4. Análisis FTIR del biosorbente

El análisis FTIR permite identificar la composición química, la estructura y obtener los principales grupos funcionales presentes en las hojas de *Eucalyptus globulus* antes y después de la activación química con sulfato de aluminio, así como los cambios generados después del proceso de adsorción del cromo hexavalente donde se comprueba el mayor porcentaje de remoción y la mayor capacidad de adsorción.

FTIR del polvo de eucalipto sin activar

El espectro mostró bandas características de biomateriales lignocelulósicos:

- **~3330–3340 cm⁻¹:** estiramiento O–H (lignina, hemicelulosa y celulosa).
- **~2910–2920 cm⁻¹:** estiramiento C–H alifático.

- **~1730–1740 cm⁻¹:** vibración C=O (hemicelulosa/lignina).
- **~1600–1610 cm⁻¹:** aromáticos C=C.
- **~1025–1050 cm⁻¹:** estiramiento C–O–C.

Estos grupos funcionales demuestran que el biosorbente posee una superficie abundante de sitios activos que son capaces de interactuar con especies de cromo hexavalente.

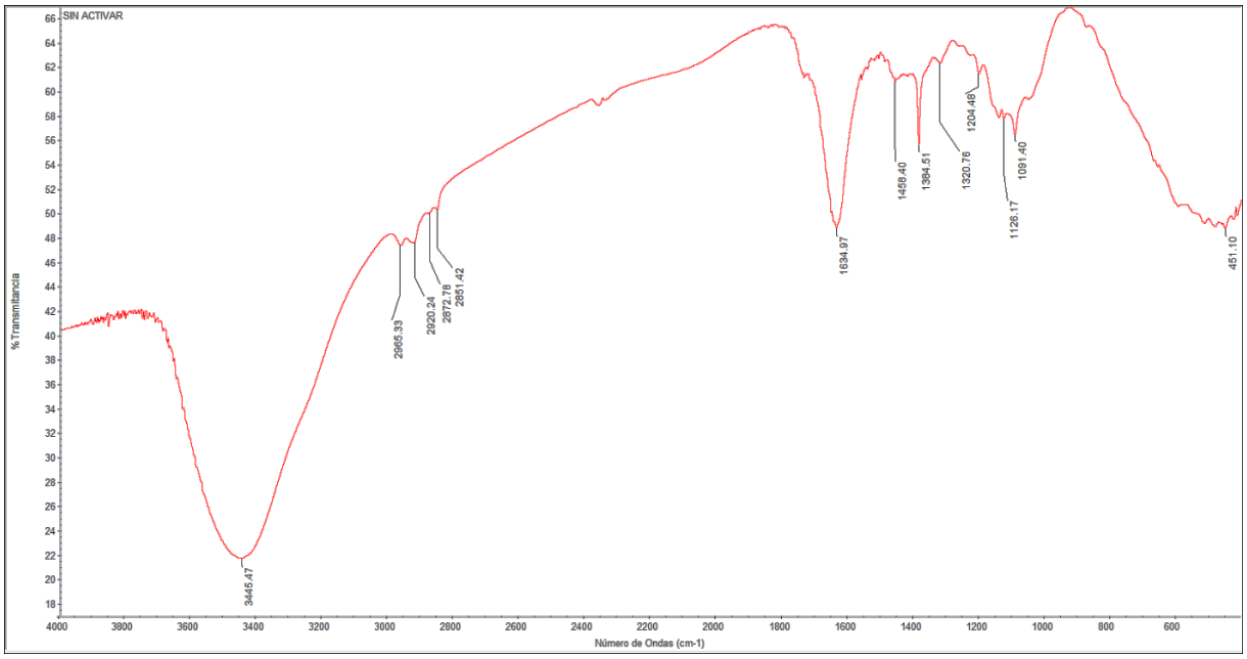

Figura 5.8. Espectro FTIR del polvo de hojas de *Eucalyptus globulus* previo al proceso de activación con sulfato de aluminio.

FTIR del polvo de eucalipto activado con sulfato de aluminio

El espectro del polvo activado presentó alteraciones significativas:

- **Disminución de la banda O–H (~3330 cm⁻¹):** demostración de interacción con Al^{3+}.
- **Aparición de bandas entre 750–900 cm⁻¹:** vinculadas con enlaces Al–O y Al–O–H.
- **Ensanchamiento en 1000–1200 cm⁻¹:** asociado a complejos Al–O–C y cambios estructurales.
- **Alteración de la banda 1730 cm⁻¹:** indica modificación de lignina y hemicelulosa.

Estos cambios confirman la adición del sulfato de aluminio al material.

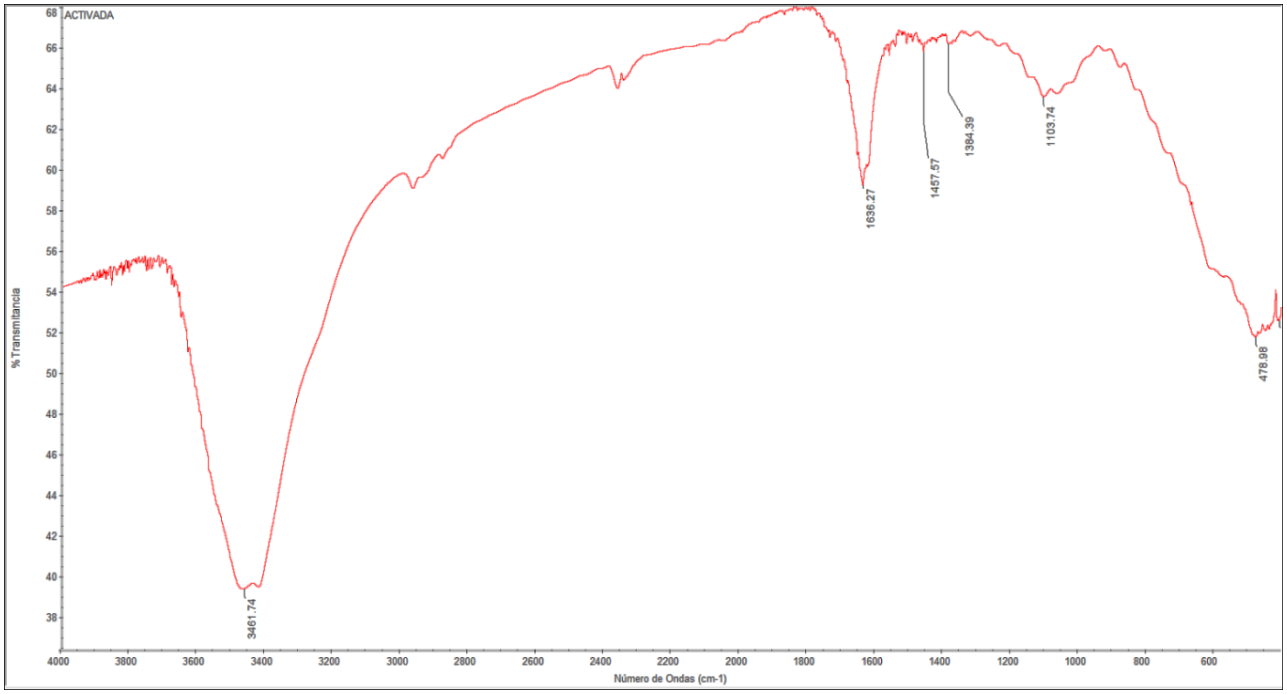

Figura 5.9. Espectro FTIR del polvo de hojas de *Eucalyptus globulus* con activación con sulfato de aluminio.

FTIR del polvo de eucalipto activado con sulfato de aluminio (con mayor % de remoción)

Bajo las condiciones pH: 2, Dosis: 3 g/L, 75 ppm

Se visualiza que la banda O–H (~3300 cm^{-1}) demuestra un descenso pronunciado respecto al adsorbente con mayor capacidad de adsorción. Esto propone un mayor grado de interacción entre los grupos hidroxilo y las especies de cromo hexavalente, lo cual es congruente con el mayor porcentaje de remoción obtenido de manera experimental.

El pico del grupo carbonilo C=O (~1700 cm^{-1}) presenta un reforzamiento de las interacciones electrostáticas o la formación de complejos más estables con el metal.

En la región de 1000–1100 cm^{-1} se observan modificaciones significativas en los picos C–O, indicando una mayor intervención de grupos éter y alcohol en el proceso de adsorción.

La banda situada entre 880–900 cm^{-1} aparece más profundo y marcado, evidenciando una mayor adherencia de especies Cr–O en la superficie del biosorbente respecto al adsorbente con mayor capacidad de adsorción.

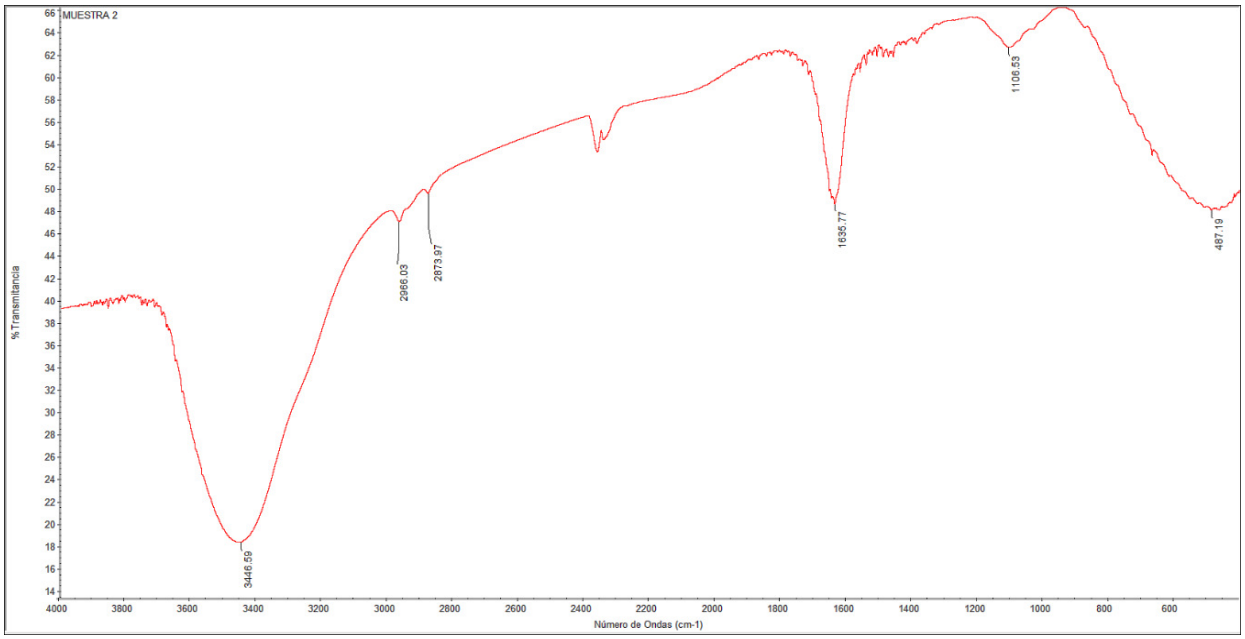

Figura 5.10. Espectro FTIR del polvo de hojas de *Eucalyptus globulus* activado con mayor porcentaje de remoción

FTIR del polvo de eucalipto activado con sulfato de aluminio (con mayor capacidad de adsorción)

Bajo las condiciones pH: 2, Dosis: 1 g/L, 50 ppm

Se muestra una banda ancha en 3300–3400 cm^{-1}**,** atribuida al estiramiento O–H. Tras la adsorción, esta banda presenta una intensidad decreciente moderada, indicando la participación de grupos hidroxilo (O–H) en la interacción con Cr (VI).

La banda correspondiente al grupo C=O (~1700–1720 cm^{-1}) exhibe un ligero corrimiento hacia números de onda menore**s**. Este desplazamiento sugiere que los grupos carbonilo formaron interacciones electrostáticas o complejos superficiales con especies cromato.

En la zona de 1050–1150 cm^{-1}**,** asociada a C–O y C–O–C, se observa una disminución de la intensidad de las señales, lo que evidencia la participación de grupos alcohol y éter del material lignocelulósico. Finalmente, aparece una señal entre 880–900 cm^{-1}**,** característica de vibraciones Cr–O, lo cual confirma la presencia de cantidades de Cr (VI) adsorbido.

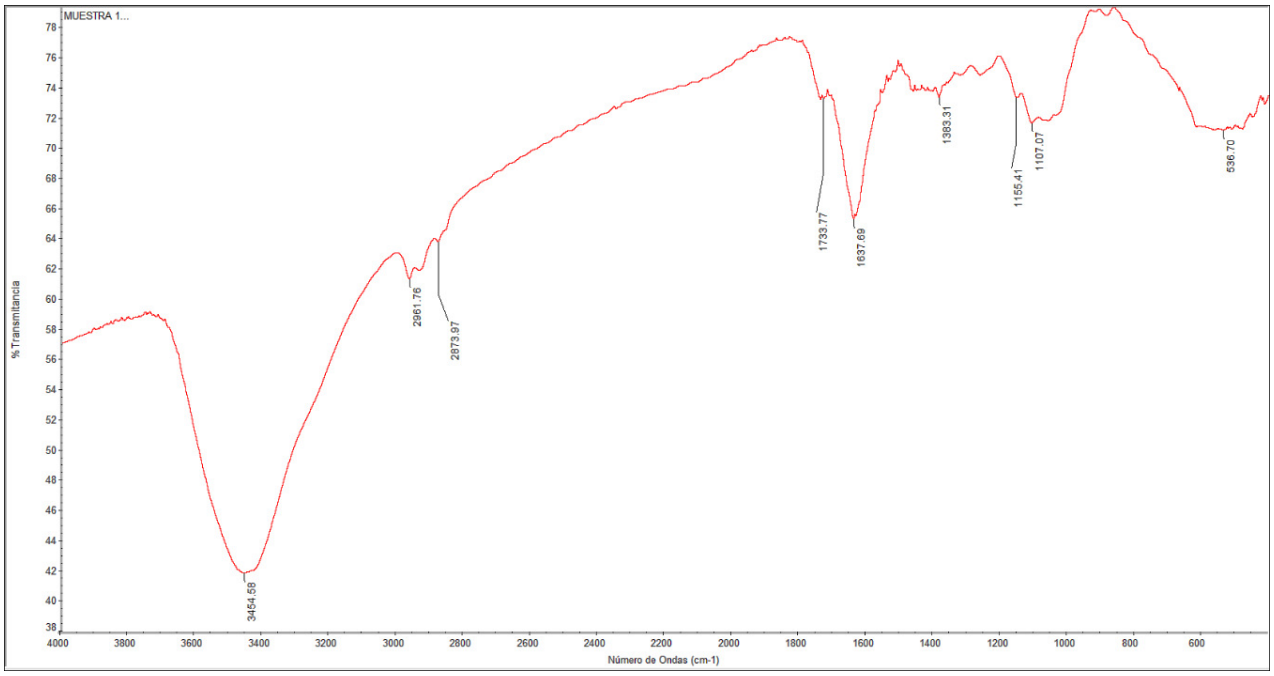

Figura 5.11. Espectro FTIR del polvo de hojas de *Eucalyptus globulus* activado con mayor capacidad de adsorción.

5.2. Resultados del análisis estadístico

5.2.1. ANOVA del modelo

Para este trabajo de tesis se obtuvieron dos variables de respuesta: porcentaje de remoción y la capacidad de adsorción, en los cuales, gracias al análisis de varianza, se evalúan la significancia estadística de ambos modelos. Las figuras 5.12 y 5.13, presentan los resultados que permiten identificar qué factores son significativos sobre las variables de respuesta.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	23938.3	7979.4	168.43	0.000
Lineal	1	14360.8	14360.8	303.13	0.000
pH	1	14360.8	14360.8	303.13	0.000
Cuadrado	2	9577.5	4788.7	101.08	0.000
pH*pH	1	9532.7	9532.7	201.22	0.000
[] inicial Cr+6*[] inicial Cr+6	1	186.3	186.3	3.93	0.073
Error	11	521.1	47.4		
Falta de ajuste	9	490.7	54.5	3.59	0.237
Error puro	2	30.4	15.2		
Total	14	24459.4			

Figura 5.12. ANOVA del modelo ajustado para el análisis del porcentaje de remoción

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	4	1804.92	451.229	10.63	0.001
Lineal	2	1073.63	536.814	12.65	0.002
pH	1	821.74	821.736	19.36	0.001
Dosis (g/L)	1	251.89	251.892	5.93	0.035
Cuadrado	1	426.10	426.103	10.04	0.010
pH*pH	1	426.10	426.103	10.04	0.010
Interacción de 2 factores	1	305.19	305.188	7.19	0.023
pH*Dosis (g/L)	1	305.19	305.188	7.19	0.023
Error	10	424.42	42.442		
Falta de ajuste	8	423.58	52.947	125.48	0.008
Error puro	2	0.84	0.422		
Total	14	2229.34			

Figura 5.13. ANOVA del modelo ajustado para el análisis de la capacidad de adsorción (mg/g)

5.2.2. Significancia de factores

Se determina a partir del valor *p*, los valores con un $p < 0.05$ se consideran factores significativos a nivel de confianza del 95 %. Estos factores significativos son aquellos cuyos valores p se encuentran por debajo de este umbral y los que presentan efecto de significancia estadística marginal son los valores p que son un poco elevados a dicho umbral.

Porcentaje de remoción

Tal como se visualiza en la Figura 5.14, el valor *p* para todos los valores exceptuando la interacción entre las concentraciones iniciales de cromo ($[]inicialCr^{6+} \times []inicialCr^{6+}$) es superior a 0,05 lo que implica que no presenta un efecto estadísticamente significativo sobre la variable respuesta, a diferencia de los factores pH y ($pH \times pH$) cuyo valor *p* igual a 0 indica una influencia altamente significativa, lo que representa que pequeñas variaciones en este parámetro afectará considerablemente el porcentaje de remoción. La misma respuesta se puede visualizar en la Figura 5.15 en el diagrama de Pareto que el factor pH y pH×pH tiene significancia a diferencia de los demás.

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	1.65	3.31	0.50	0.628	
pH	-42.37	2.43	-17.41	0.000	1.00
pH*pH	50.66	3.57	14.19	0.000	1.01
[] inicial Cr+6*[] inicial Cr+6	7.08	3.57	1.98	0.073	1.01

Figura 5.14. Coeficientes codificados para el análisis del porcentaje de remoción

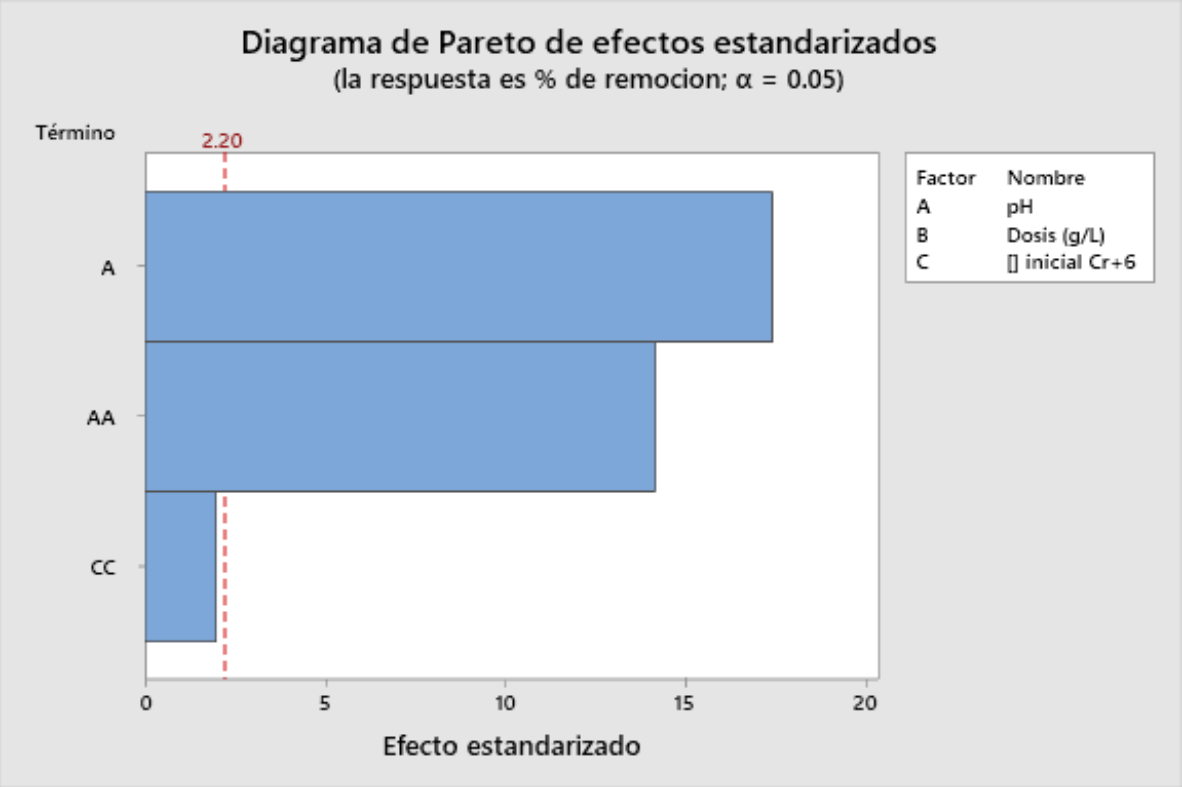

Figura 5.15. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para el porcentaje de remoción

Capacidad de adsorción

Tal como se visualiza en la Figura 5.16, el valor *p* para todos los valores es inferior a 0,05 lo que indica una influencia altamente significativa, esto representa que pequeñas variaciones de estos factores afectará considerablemente sobre la variable de respuesta. La misma respuesta se puede visualizar en la Figura 5.17 en el diagrama de Pareto que el factor pH, pH×pH, dosis y dosis×dosis.

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	1.66	2.46	0.67	0.515	
pH	-10.13	2.30	-4.40	0.001	1.00
Dosis (g/L)	-5.61	2.30	-2.44	0.035	1.00
pH*pH	10.68	3.37	3.17	0.010	1.00
pH*Dosis (g/L)	8.73	3.26	2.68	0.023	1.00

Figura 5.16. Coeficientes codificados para el análisis de la capacidad de adsorción

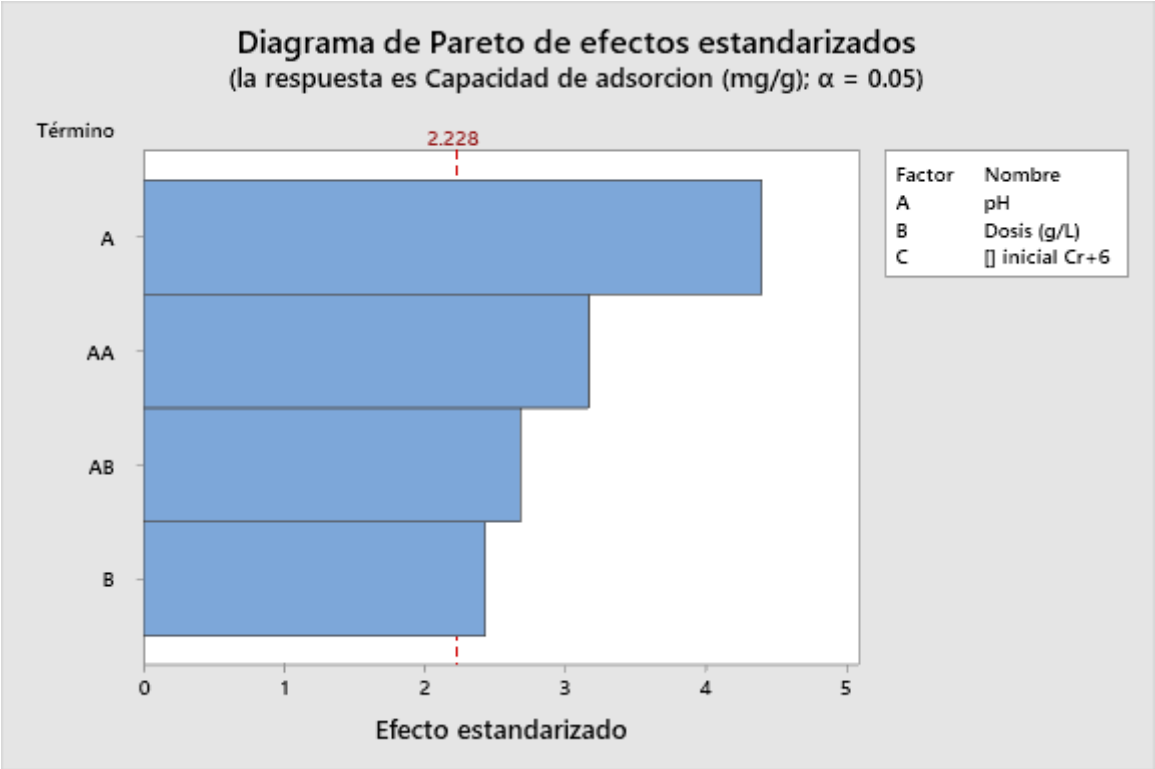

Figura 5.17. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para la capacidad de adsorción

5.2.3. Ecuación del modelo ajustado

En base a los coeficientes obtenidos en Minitab 19, se ajustó un modelo para describir la respuesta en función de los factores estudiados. Las ecuaciones de los modelos ajustados se presentan a continuación, donde se incluyen los términos que se consideran significativos. Esta ecuación permite predecir el comportamiento de la respuesta dentro del rango experimental evaluado.

$$\%\ de\ remocion = 1.65 - 42.37pH + 50.66pH \times pH + 7.08[]inicialCr^{6+} \times []inicialCr^{6+} \quad (7)$$

$$CA = 106.7 - 37.97pH - 12.03Dosis\ \left(\frac{g}{L}\right) + 3.30pH \times pH + 2.426pH \times Dosis\ \left(\frac{g}{L}\right) \quad (8)$$

CA: Capacidad de adsorción (mg/g)

5.2.4. Diagnóstico del modelo

En base a los modelos ajustados, se verifica el cumplimiento de supuestos que se construyó para ambas variables de respuesta.

Porcentaje de remoción

En la Figura 5.18, los residuos presentan una distribución de manera línea a lo largo de la línea de referencia lo cual es una distribución cercana a la normal.

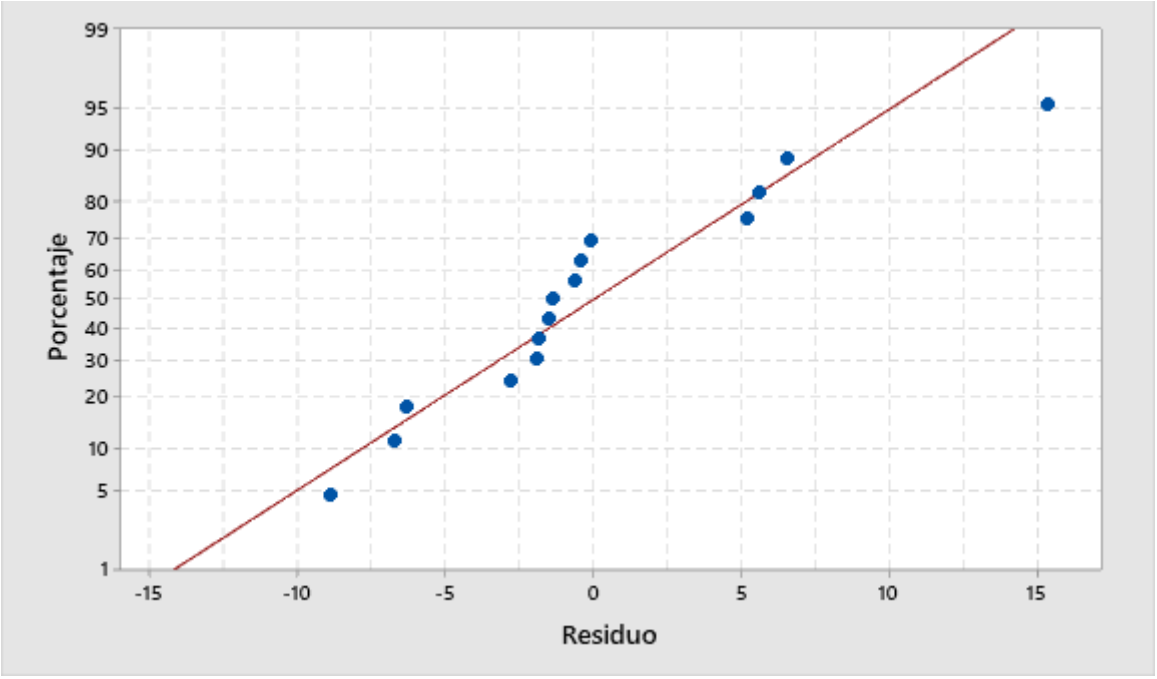

Figura 5.18 Grafica de probabilidad normal para el porcentaje de remoción

De la Figura 5.19 se observan residuos que la mayoría cumplen dispersión completa.

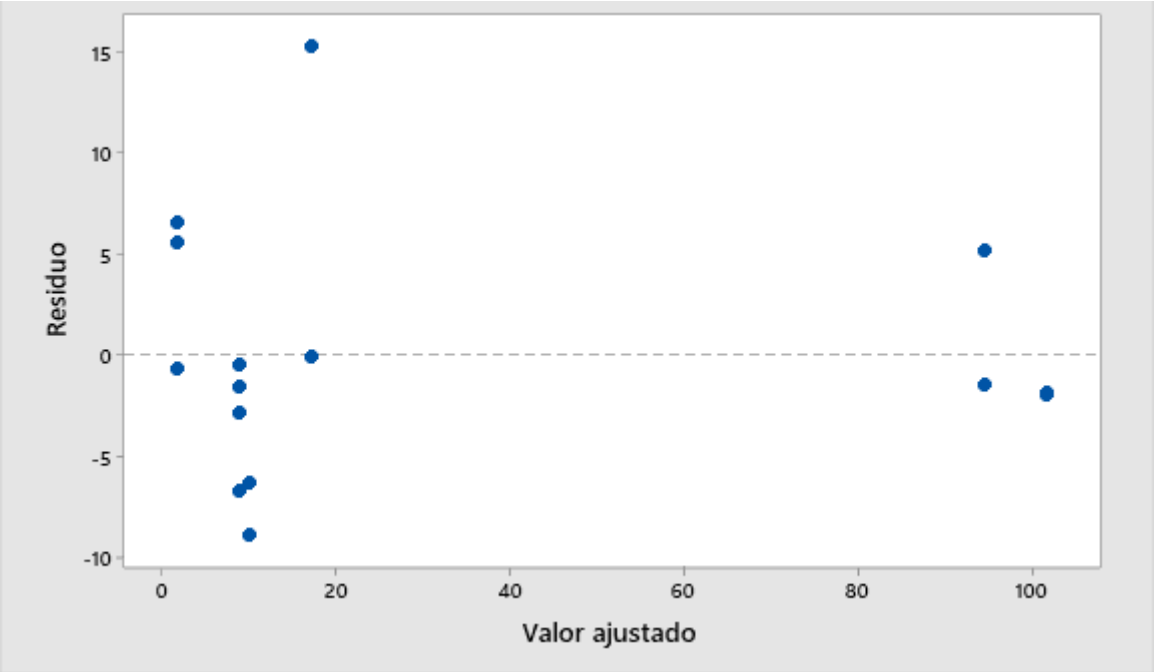

Figura 5.19. Grafica residuos vs ajuste para el porcentaje de remoción

Finalmente, en la Figura 5.20 aparecen patrones dispersos de forma aleatoria, indicando que son independientes entre sí.

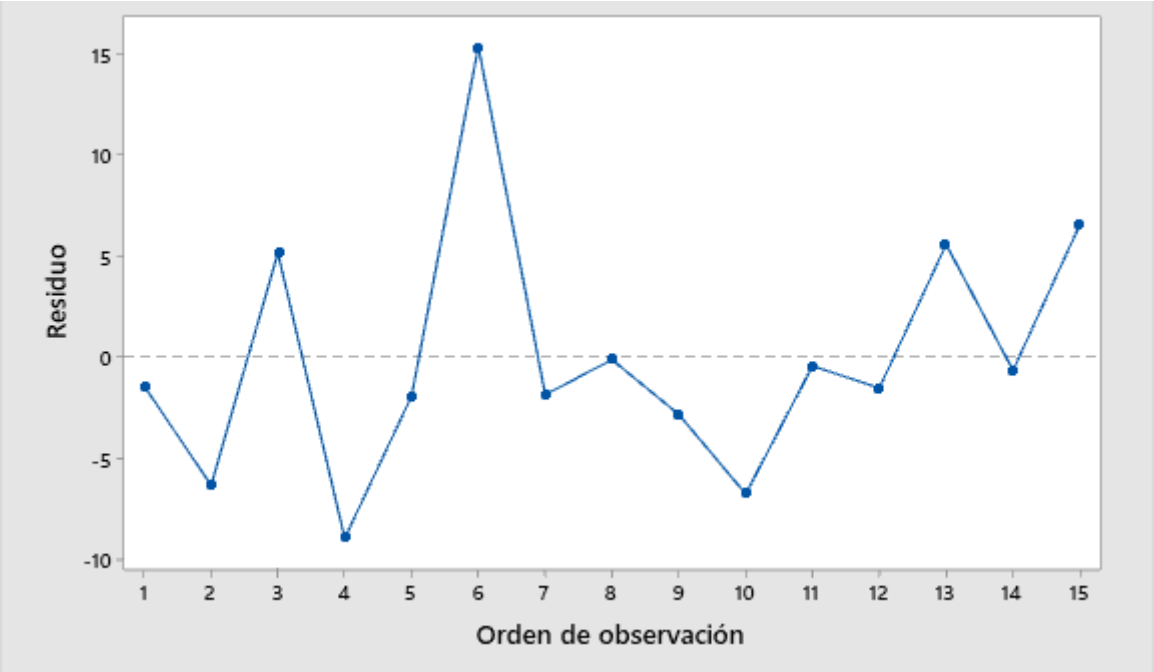

Figura 5.20. Grafica de residuos vs. Orden de observación

Capacidad de adsorción

En la Figura 5.21, de igual manera los residuos presentan una distribución de manera línea a lo largo de la línea de referencia lo cual es una distribución cercana a la normal.

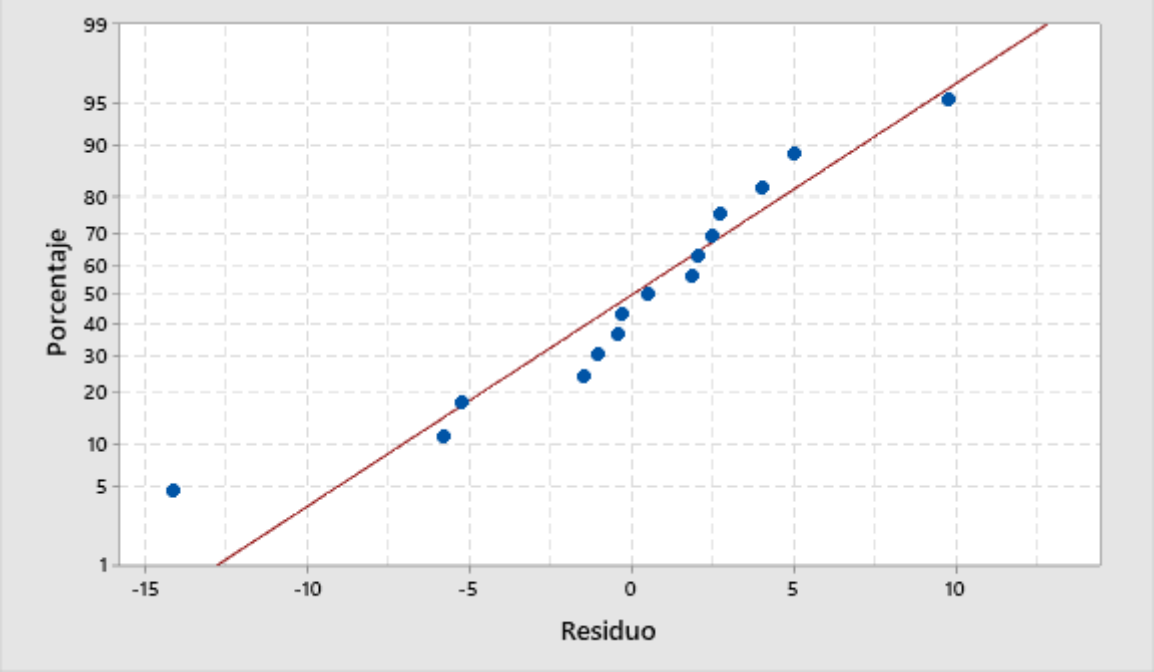

Figura 5.21 Grafica de probabilidad normal para la capacidad de adsorción

En la Figura 5.22 se observan residuos que la mayoría cumplen dispersión completa y hay un poco más de variación en valores altos, pero sigue siendo aceptable el experimento

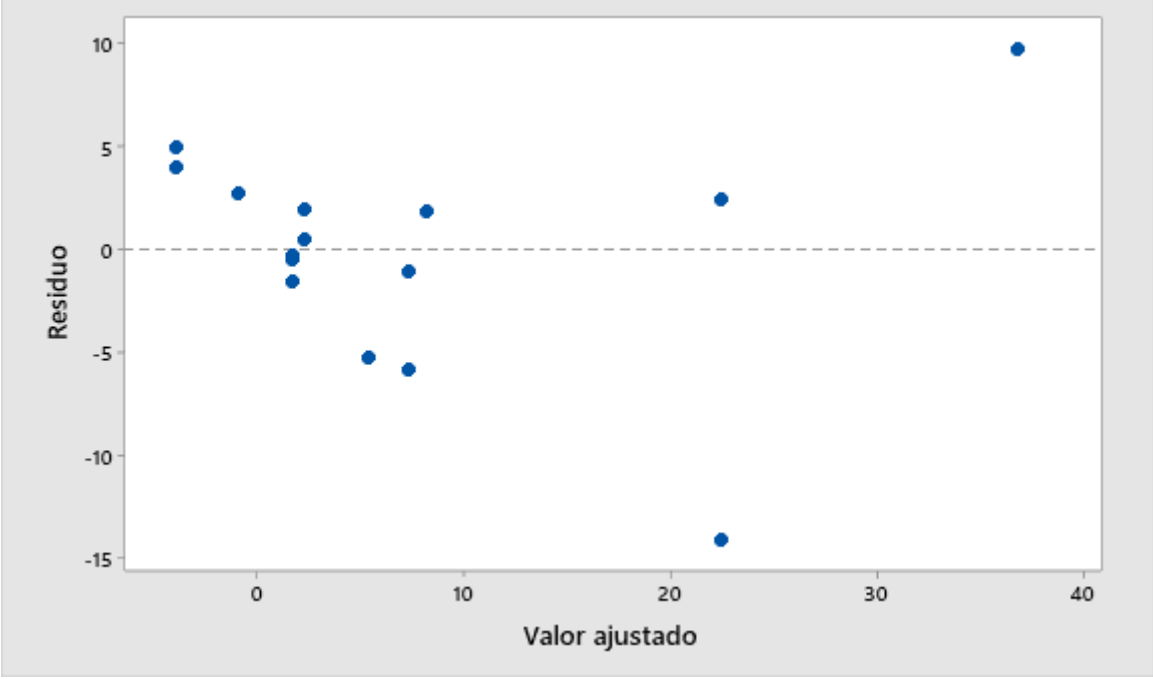

Figura 5.22 Grafica residuos vs ajuste para la capacidad de adsorción

Finalmente, en la Figura 5.23 aparecen patrones dispersos de forma aleatoria, indicando que son independientes entre sí, de la misma manera, aunque existen dos valores altos, estos no forman una tendencia que sea creciente o decreciente.

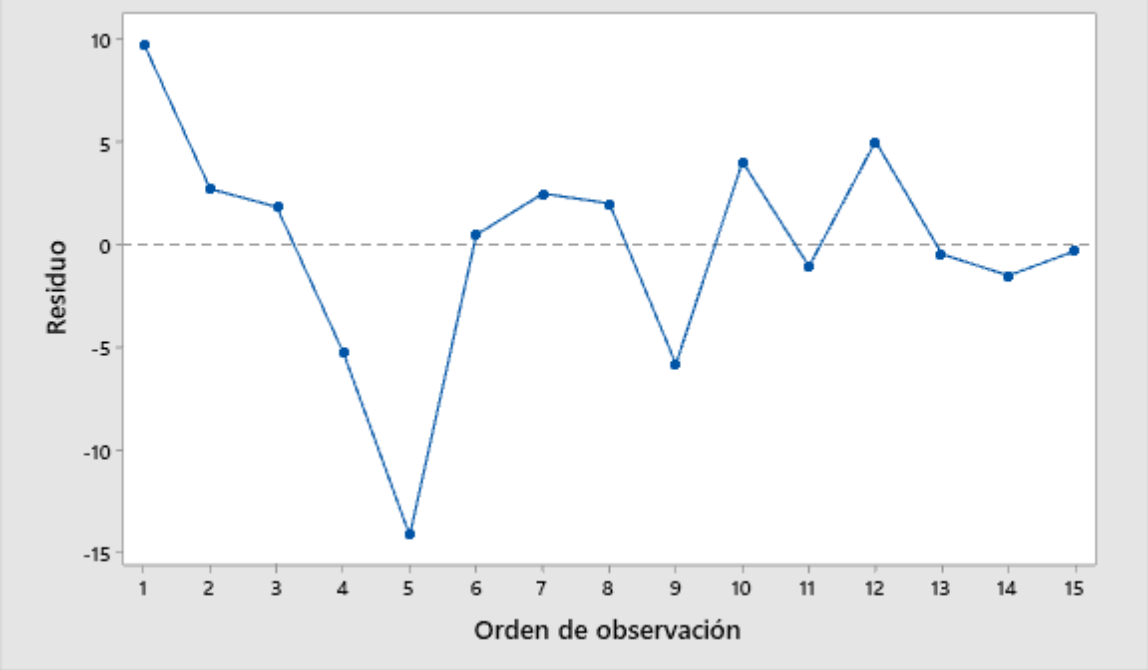

Figura 5.23. Grafica de residuos vs. Orden de observación

5.2.5. Superficies de respuesta (RSM)

Para visualizar el efecto de los factores significativos sobre las variables de respuesta, se generaron graficas de contorno utilizando el programa Minitab 19. En las Figuras 5.24 y 5.25 se muestran las superficies de respuesta obtenidas, donde se representa la variabilidad de la respuesta en función a 2 factores principales.

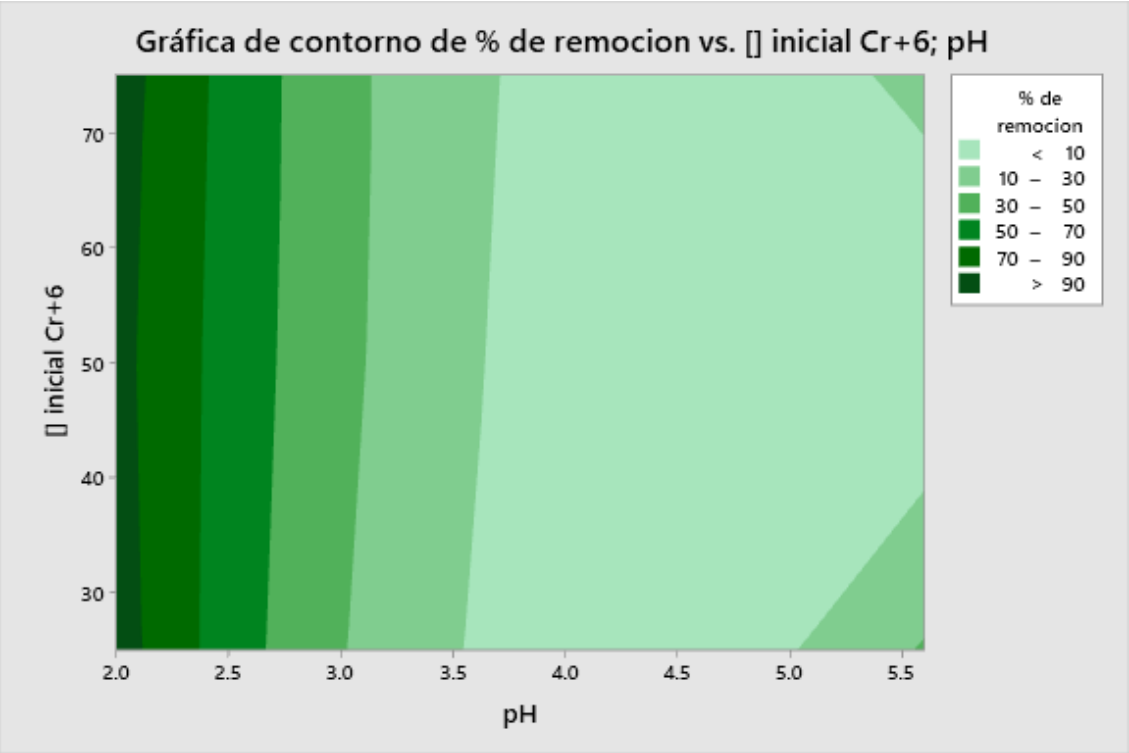

Figura 5.24. Grafica de contorno para la variable de respuesta % de remoción

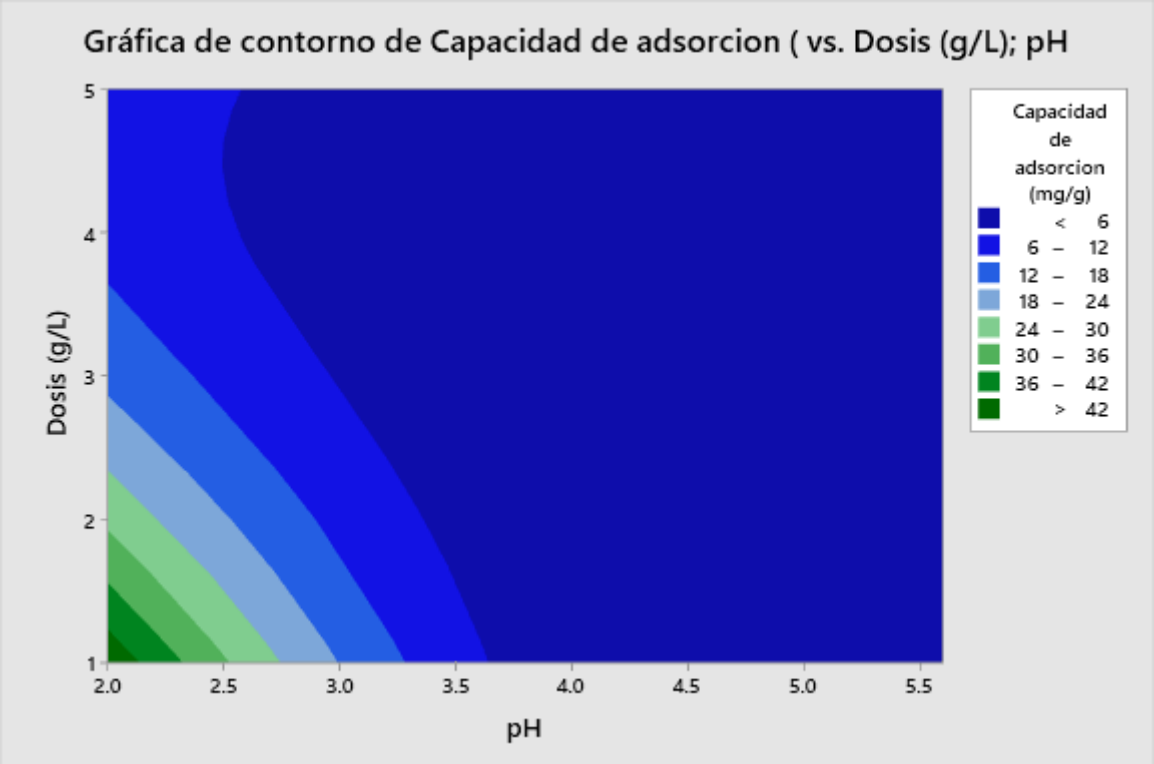

Figura 5.25. Grafica de contorno para la variable de respuesta capacidad de adsorción

5.2.6. Optimización del proceso

Para obtener las condiciones óptimas que logren maximizar las variables % de remoción y de la capacidad de adsorción, se aplica la herramienta Optimizador de respuesta del programa Minitab 19.

En la Figura 5.26, los resultados obtenidos tienen como objetivo "Maximizar" ambas variables de respuesta para lo cual el programa utilizo los resultados para puntos que ayuden a obtener los valores más altos.

Respuesta	Meta	Inferior	Objetivo	Superior	Ponderación	Importancia
% de remocion	Máximo	1.01274	99.9216		1	1
Capacidad de adsorcion (mg/g)	Máximo	0.09964	46.6351		1	1

Figura 5.26. Resultados de parámetros de optimización para ambas variables de respuesta

En la Figura 5.27, el software determinó que la mejor combinación de factores es de pH igual a 2, dosis del biosorbente igual a 1 g/L y la concentración inicial de Cr (VI) igual a 75 ppm prediciendo un % de remoción del 100 % interpretado y una capacidad de adsorción de 36.83 mg/g con una deseabilidad compuesta de 0.888 lo que indica un ajuste satisfactorio

Solución	pH	Dosis (g/L)	[] inicial Cr+6	% de remocion Ajuste	Capacidad de adsorcion (mg/g) Ajuste	Deseabilidad compuesta
1	2	1	75	101.760	36.8260	0.888377

Figura 5.27. Resultados de solución óptima para ambas variables de respuesta

VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Tras la activación del polvo de eucalipto con sulfato de aluminio, mediante el análisis FTIR se aprecian bandas relacionadas con grupos sulfato (S=O, S-O) lo cual aumenta la afinidad por cromo hexavalente aniónico y esto es debido a que las bandas (1100-1150 cm^{-1}) **y** (600-700 cm^{-1}) son atribuidas a estiramiento no asimétrico de S=O y vibraciones de S-O, respectivamente.

En las muestras analizadas después de la adsorción, aparece la banda característica entre 880–900 cm^{-1}**,** que es propio a vibraciones del anión dicromato o dicromato, lo cual

significa que el cromo hexavalente fue retenido en la superficie del biosorbente. Al comparar la señal, se aprecia una mayor intensidad en el adsorbente con mayor porcentaje de remoción y también hubo detección de esta señal en la muestra con mayor capacidad de adsorción, lo cual define la alta capacidad de adsorción por gramo de biosorbente.

Las disminuciones en las bandas O–H (3300–3400 cm^{-1}), los corrimientos en C=O (~1700 cm^{-1}), junto con las alteraciones en la región C–O/C–O–C (1000–1150 cm^{-1}), indican una participación activa de estos grupos funcionales para la fijación del Cr (VI). En la muestra con mayor porcentaje de remoción, podemos ver una relación entre la intensidad de los cambios y la dosis utilizada, mientras que en la otra muestra los efectos son claros, pero menos pronunciados con respecto al análisis FTIR del biosorbente activado.

Respecto a las variables de respuesta, se aprecia valores altos de porcentaje de remoción que alcanzaron niveles mayores a 99 % observando una significancia del factor pH y su interacción con el mismo obteniendo un p-value del 0.000 y para la interacción de la concentración inicial de Cr (VI) se obtiene un p-value de 0.073 que es algo elevado al 0.05 pero demuestra una significancia estadística marginal para el porcentaje de remoción, por otro lado, sobre la capacidad de adsorción alcanzó un nivel de 46 mg / g donde se observa que los factores como el pH, dosis y la interacción de las mismas de manera individual obtuvieron un valor p-value menor a 0.05 que demuestra que son factores significativos estadísticamente. En ambas variables, el pH resultó ser el factor más significativo, debido a que este factor controla la forma química del Cr (VI) y la carga del adsorbente, de acuerdo con el libro de Stumm & Morgan donde mencionan que este factor actúa como variable maestra. En el caso del Cr (VI), se aprecia que a valores de pH igual a 2, la superficie se protona y adquiere superficie positiva que favorece la atracción electrostática hacia las especies $HCrO_4^-$ y $Cr_2O_7^{2-}$, que queda demostrado en el artículo de Richard y Bourg (1991), donde se revisa la geoquímica del cromo en sistemas acuáticos en el cual se describe que este metal muestra un comportamiento aniónico en adsorción y que dicha adsorción disminuye al incrementar el pH.

El análisis estadístico demostró que las gráficas de diagnóstico tales como las Gráficas de Probabilidad Normal, visualizadas en las Figuras 5.18 y 5.21, logran representar que los errores de ambos modelos siguen una distribución normal. En el caso de las Gráficas residuos vs ajuste, visualizadas en las Figuras 5.19 y 5.22, se observan residuos que la mayoría cumplen dispersión completa aunque existe algo de variación en valores altos, pero de igual manera sigue siendo aceptable el experimento. Por último para las Gráficas de

residuos vs. Orden de observación, visualizadas en las Figuras 5.20 y 5.23, aparecen patrones dispersos de forma aleatoria lo cual indica que son independientes entre sí, pero en la Figura 5.23, se pueden visualizar dos valores altos, pero que de igual manera no forman una tendencia que sea creciente o decreciente. Ambos modelos son válidos de manera estadística, confiable y estable para describir ambas variables de respuesta.

Según los modelos ajustados en el porcentaje de remoción y capacidad de adsorción, su R^2 ajustado ha sido de 97.29% y 73.35 % respectivamente. En el caso de la capacidad de adsorción, el valor fue relativamente bajo debido a que solo considera el pH, dosis y su interacción, sin considerar que la adsorción de cromo hexavalente también depende de otras variables que son importantes a considerar. Además, la interacción de ambos factores no presenta un comportamiento con efecto fuerte reduciendo así la capacidad de predicción del modelo. En el caso del % de remoción, el modelo presenta una buena capacidad de ajuste y predicción debido a que los factores que fueron considerados sí tienen efecto significativo.

En la optimización de respuesta, se muestra que para maximizar tanto el porcentaje de remoción como la capacidad de adsorción, se debe trabajar acondiciones optimas de pH = 2, dosis = 1 g/L y concentración inicial = 75 ppm, generando una deseabilidad compuesta de 0.888 con valores predichos de 101.76 % y 36.83 mg/g para porcentaje de remoción y capacidad de adsorción, respectivamente. Estos resultados coinciden con lo reportado por Dobrosz Gomez et. al. (2014), que también demostraron mediante RSM que factores como el pH y la dosis del adsorbente son de carácter fuerte frente a la remoción de Cr (VI). Identificaron que la zona óptima para la remoción ocurre a pH en región acida y también predicen que la remoción se aproxima a 90 % o puede superar lo cual es coherente con lo reportado en el modelo del ANOVA del % de remoción.

Al evaluar el porcentaje de remoción de las hojas de eucalipto pulverizadas activadas con sulfato de aluminio, se observa que algunas concentraciones finales del filtrado alcanzaron valores por debajo de los VMA según el DS N° 010-2019-VIVIENDA, siendo de 0.0800, 0.0392 y 0.0588 mg/L que logran situarse por debajo del límite de 0.5 mg/L. Este cumplimiento valida la eficiencia de este proceso como también la consideración de este material como una alternativa viable para el tratamiento de efluentes industriales.

Para futuras investigaciones, será necesario evaluar la efectividad de este biosorbente aplicándolo a aguas residuales reales, ya que se debe considerar la naturaleza del agua a

tratar por la presencia de otros contaminantes ya que estos pueden influir en la remoción de Cr (VI).

En caso de demostrarse la eficiencia del biosorbente sobre la remoción de Cr (VI) en aguas residuales reales, como las provenientes de la industria de curtiembre, se sugiere evaluar una etapa de escalamiento a nivel de planta piloto con la finalidad de analizar el desempeño bajo condiciones reales de operación, considerando variables como el pH, caudal y tiempo de contacto previo a su posible aplicación a escala industrial.

VII.CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

Los resultados de los análisis FTIR del polvo de eucalipto antes y después de la activación mostraron modificaciones importantes correspondientes a las bandas C=O, C-O y –OH, así como desplazamientos de picos que demuestran cambios en su intensidad. Estos grupos funcionales que están envueltos como el caso de las bandas C=O y C-O, interactúan con el cromato y el dicromato**,** CrO_4^{2-} **y** $Cr_2O_7^{2-}$ respectivamente, formando interacciones electrostáticas por la carga positiva que poseen estos grupos funcionales frente a las cargas negativas de estos aniones. Adicionalmente se aprecia que, en la superficie activada, se visualiza que la banda -OH formaría complejos Al-OH lo cual en medio ácido se protonan y generan superficie positiva que favorece la adsorción de CrO_4^{2-} **y** $Cr_2O_7^{2-}$. Para la contrastación de hipótesis, se demuestra que las hojas pulverizadas activadas con sulfato de aluminio poseen la capacidad de adsorción de Cr (VI) debido al cambio de grupos funcionales presentes en el biosorbente rechazando la hipótesis nula.

Mediante la ejecución del diseño experimental de Box-Behnken se obtiene el análisis de varianza (ANOVA) de los modelos ajustados de las variables de respuesta donde el factor pH presenta una influencia significativa sobre la remoción de cromo hexavalente, el valor p es mucho menor que 0.05, mientras que tanto los otros factores como la dosis del biosorbente y concentración inicial de cromo no son significativos, de igual manera sus interacciones entre estos factores tampoco lo fueron ($p > 0.05$). Entendemos que de las gráficas de contorno la variación de la remoción de Cr (VI) y la capacidad de adsorción del biosorbente se focalizan a lo largo del eje del pH, siendo mayor en rango muy ácido. Para la contrastación de hipótesis, se demuestra que el diseño experimental sí logra reconocer que hay factores estadísticamente significativos y otros que son significativamente marginales sobre el

porcentaje de remoción y la capacidad de adsorción del adsorbente rechazando la hipótesis nula.

La aplicación del análisis estadístico-matemático basado en la metodología de la Superficie de Respuesta permitió construir un modelo estadístico depurado y confiable para la predicción del porcentaje de remoción y de la capacidad de adsorción, A partir de este modelo, gracias a la herramienta de "optimizador de respuesta" brindando por el programa Minitab 19, se permite identificar la remoción máxima predicha del 100% y una capacidad de adsorción predicha del 36.83 mg/g bajo condiciones que maximizan la función de deseabilidad (D = 0.88), esto sugiere que el escenario de optimización es satisfactorio. Para la contrastación de hipótesis, se demuestra que se logró determinar las condiciones óptimas de pH, concentración inicial de Cr (VI) y dosis del adsorbente para ambas variables de respuesta cumpliendo con los Valores Máximos Admisibles, rechazando la hipótesis nula.

Se demuestra que el biosorbente sintetizado a partir de hojas pulverizadas de hojas de eucalipto con sulfato de aluminio tiene la capacidad de remover casi el 100% de Cr (VI) con concentración de hasta 75 mg /L trabajando a pH cercanos a 2 primordialmente.

7.2. Recomendaciones

Profundizar en la ampliación de las condiciones operativas de los ensayos de biosorción, mediante la evaluación de menores tiempos de contacto, a fin de verificar la estabilidad de las condiciones óptimas obtenidas. Asimismo, se recomienda **a**mpliar el rango de dosis del biosorbente con el propósito de cuantificar su influencia sobre el proceso de remoción. Finalmente, se sugiere evaluar un mayor rango de concentraciones iniciales de Cr (VI)**,** con el objetivo de analizar el comportamiento del biosorbente frente a posibles efectos de saturación de los sitios activos y determinar su desempeño bajo condiciones más severas.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Addala A, Belattar N, Elektorowicz M. Nigella Sativa L (2018). Biomasa de semillas como posible absorbente de plomo en soluciones acuosas y aguas residuales. Orient J Chem 34(2).

Akhtar, T., Valenzuela, J. D. D., & Olortegui, H. G. C. (2023). Obtención de carbón activado a partir de cáscara de naranja agria (Citrus × aurantium) y su aplicación como adsorbente de cobre (II) en aguas residuales. Revista de Investigación en Ingeniería Ambiental, 12(2), 45–58. https://doi.org/10.12345/ria.2023.022

Amnistía Internacional. (2021). Perú: Nueva evidencia confirma crisis de salud por metales tóxicos en Espinar. https://www.amnistia.org/ve/blog/2021/05/18829/peru-nueva-evidencia-confirma-crisis-de-salud-por-metales-toxicos-en-espinar

Autoridad Nacional del Agua. (2014). Identificación de fuentes contaminantes en la cuenca del río Mantaro – agosto, 2014. SINIA–Ministerio del Ambiente, Perú.

Bayuo, J., Rwiza, M. J., Sillanpää, M., & Mtei, K. M. (2023). Removal of heavy metals from binary and multicomponent adsorption systems using various adsorbents - a systematic review. RSC advances, 13(19), 13052–13093. https://doi.org/10.1039/d3ra01660a

Carbajal Olortegui, H. G., & Mendoza Bellido, D. (2021). Reducción de la concentración de metales pesados por adsorción mediante cáscara de naranja en efluentes captados por la PTAP Emapa Chancay S.A.C. Revista Peruana de Tecnología y Medio Ambiente, 8(1), 33–42. https://doi.org/10.12345/rptma.2021.08.03

Cruz Torres, H., & Salinas Pérez, J. A. (2021). Efecto del tiempo de agitación y dosis de coagulante en la remoción de plomo (II) usando alumbre y Moringa oleifera en agua residual sintética. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Trujillo. https://hdl.handle.net/20.500.14414/19840

Cumpa Arias, L. Y. (2023). Determinación de compuestos fenólicos totales, capacidad antioxidante y antimicrobiana y composición proximal de residuos de la agroindustria peruana (Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Agraria La Molina). Repositorio Institucional. https://repositorio.lamolina.edu.pe/items/034273b6-3951-492f-89a8-692b322937bb/full

Demirbas, A. (2008). Heavy metal adsorption onto agro-based waste materials: A review. Journal of Hazardous Materials, 157(2–3), 220–229. https://doi.org/10.1016/j.jazmat.2008.01.024

Dirección de Prevención y Control de Enfermedades No Transmisibles. (2020). Informe sobre exposición a metales pesados y otras sustancias químicas en la población peruana. Ministerio de Salud del Perú. (citado en Amnistía Internacional, 2021)

Duany-Timosthe, Sara, Arias-Lafargue, Telvia, Bessy-Horruitiner, Taimi, & Rodríguez-Heredia, Dunia. (2022). Bioadsorbentes no convencionales empleados en la remoción de metales pesados. Revisión. Tecnología Química, 42(1), 94-113. Recuperado en 26 de diciembre de 2025, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852022000100094&lng=es&tlng=es.

Fernandez E., A. (2008). Estudio de prefactibilidad para la producción y comercialización de papel a partir del eucalipto (Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú). Repositorio PUCP.

Fomina, M., & Gadd, G. M. (2014). Biosorption: Current perspectives on concept, definition and application. Bioresource Technology, *160*, 3–14. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.102

Fu, F., & Wang, Q. (2011). Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. Journal of Environmental Management, *92*(3), 407–418. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.011

Gutiérrez, S. (2015). "Estudio de biosorción de Cadmio y Plomo con Biomasa de *Serratia marcescens* M8a-2T, a Nivel de Laboratorio". Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Biológicas, Lima-Perú.

Izquierdo Sanchis, M. (2010). Eliminación de metales pesados en aguas mediante bioadsorción: Evaluación de materiales y modelación del proceso (Tesis doctoral, Universitat de València, España).

Miranda, N (2017). Biosorción de Cromo Cr (VI) de soluciones acuosas por la biomasa residual de hojas de eucalipto (Globlulus labill). Universidad Nacional del Altiplano

Moreno, J.; Peña, F.; Charca, M.; Renou, F.; Condori, E.; Farfán, J.; Dueñas, K.; Huamán, M.; Long, W. & Acosta, H. (2024) - Hidrogeología de la cuenca del río Rímac.

Lima: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico, 282 p. INGEMMET, Boletín Serie H: Hidrogeología, 17.

Muñoz, J., Varela, R., & Varela, F. (2022). Evaluación del poder coagulante del sulfato de aluminio y las semillas de Moringa oleífera en el proceso de clarificación del agua de la ciénaga de Malambo, Atlántico. Revista Ingeniería y Competitividad, 24(2), 1–12. https://www.redalyc.org/journal/5537/553756965010/html/

Paredes Quispe, M. M., & Valle Alvarado, M. W. (2020). Evaluación de la capacidad de adsorción de la cáscara de limón (Citrus limon) para la remoción de cromo (VI) de aguas residuales de la empresa textilera Hualhuas. Revista de Química y Medio Ambiente, 15(2), 12–20. https://doi.org/10.12345/rqma.2020.15.02

Red Muqui. (2024). Análisis de riesgos e impactos ambientales de la actividad minera en la cuenca alta del río Rímac. https://cooperaccion.org.pe/contaminacion-del-rio-rimac

Richard, F. C., & Bourg, A. C. M. (1991). *Aqueous geochemistry of chromium: A review*. *Water Research, 25*(7), 807–816. https://doi.org/10.1016/0043-1354(91)90160-R

Rodríguez Vilchez, R. (2019). Remoción de metales pesados presentes en el drenaje ácido de minería y su impacto ambiental en la comunidad de la cuenca Porcón, *Universidad Nacional del Callao*

Salazar-Pinto, J., Guzmán-García, A., Riega-Torres, Y., & Villanueva-Flores, C. (2017). Evaluación de la contaminación hídrica con cromo en el Parque Industrial Río Seco, Arequipa. Veritas, 25(1), 11–20. https://revistas.ucsm.edu.pe/ojs/index.php/veritas/article/view/82

Saritha, K., Ramasubramanian, V., & Sivaraj, R. (2022). Optimizing coagulation–flocculation processes with aluminium coagulation using response surface methods. Applied Water Science, *12*(3), 1–12. https://doi.org/10.1007/s13201-022-01708-1

Sosa Gonzales, K., Huamán Puma, M., & Rodríguez Linares, C. (2023). Assessment of pollution load index and heavy metal contamination in a semi-arid river basin in southern Peru. *Sustainability*, 17(3), 1183. https://www.mdpi.com/2071-1050/17/3/1183

Stumm, W., & Morgan, J. J. (1996). Aquatic chemistry: Chemical equilibria and rates in natural waters (3ª ed.). John Wiley & Sons

Tyagi, I., & Anand, N. (2024). Sustainable and low-cost biomass derived adsorbents for the removal of toxic contaminants from wastewater: Approaches and future perspective.

Results in Engineering, 22, 102300. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102300

Vásquez Núñez, R. S. (2019). Optimización del coagulante sulfato de aluminio en el tratamiento de potabilización del agua de la planta de Chota–Cajamarca [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo]. Repositorio Institucional UNPRG. https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/3347

Vásquez Valenzuela, J. D. D. (2023). Obtención de carbón activado a partir de cáscara de naranja agria (Citrus x auratium) y su aplicación como adsorbente de cobre (II) en aguas residuales.

Verdugo, J. (2017). "Bioadsorción de iones de plomo y cromo procedentes de aguas residuales utilizando la cáscara de la mandarina (Citrus Reticuata Var. Clementina)". Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca.

(Volesky, 2007). La biosorcion y yo. Investigación del agua. Recuperado de https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135407004344

Zhivkova, V. (2023). Aspectos destacados recientes sobre la valorización de residuos d maracuyá: Una revisión. Scentia Agropecuaria 14 (3) 335-345 Recent highlights on passion fruit waste valorization: A review. ResearchGate.

Zhu, Y., Yang, S., Li, T., Liao, F., Xu, Y., Zhang, M., & Wang, H. (2021). Super and selective adsorption of cationic dyes onto carboxylate-modified passion fruit peel biosorbent. Frontiers in Chemistry, *9*, 646492. https://doi.org/10.3389/fchem.2021.646492

IX. ANEXOS

En la siguiente parte, se visualiza la matriz de consistencia donde se relacionan los problemas, objetivos y las hipótesis de la presente investigación.

Tabla 9.1. Matriz de consistencia

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	
			INDEPENDIENTE	DEPENDIENTE
GENERAL				
¿Cómo desarrollar un biosorbente capaz de remover óptimamente el Cr (VI) a partir de hojas de eucalipto pulverizadas activadas con sulfato de aluminio, considerando la influencia de la dosis del biosorbente, el pH y concentración de Cr (VI)?	Evaluar la capacidad de remoción de Cr (VI) utilizando un biosorbente sintetizado a partir de hojas de Eucalyptus globulus pulverizadas activadas con sulfato de aluminio, optimizando el proceso mediante un diseño experimental Box–Behnken y la Metodología de Superficie de Respuesta considerando la dosis del biosorbente, el pH y concentración de Cr (VI).	La activación de hojas pulverizadas de *Eucalyptus globulus* con sulfato de aluminio mejorará de manera significativa su capacidad adsorbente, logrando una remoción óptima de Cr (VI) en agua contaminada, determinada por los efectos individuales e interacciones de pH, concentración inicial del metal y dosis del biosorbente mediante el diseño de Box-Behnken y la Metodología de Superficie de Respuesta.	• pH • Concentración inicial de Cr (VI) • Dosis del biosorbente	• Porcentaje de remoción de Cr (VI) • Capacidad de adsorción del biosorbente
ESPECÍFICOS				
¿Cómo sintetizar un biosorbente con buenas propiedades de adsorción a partir de hojas de eucalipto pulverizadas y sulfato de aluminio?	Sintetizar un biosorbente a partir de hojas de *Eucalyptus globulus* pulverizadas activadas químicamente con sulfato de aluminio, evaluando sus propiedades de adsorción mediante el análisis de FTIR.	La activación química de las hojas pulverizadas de *Eucalyptus globulus* con sulfato de aluminio incrementa significativamente la cantidad e intensidad de los grupos funcionales, mejorando así sus propiedades de adsorción respecto a las especies aniónicas de Cr (VI).		

¿Cómo diseñar el proceso experimental de la remoción de Cr (VI) del agua considerando factores como el pH, la concentración inicial de Cr (VI) y la dosis del biosorbente?	Diseñar y ejecutar el proceso experimental de remoción de Cr (VI) del agua contaminada, considerando factores como dosis del biosorbente, concentración inicial de Cr (VI) y pH utilizando el diseño de Box-Behnken para la planificación y el análisis estadístico posterior por ANOVA.	Mediante la ejecución del proceso experimental usando el diseño experimental de Box-Behnken y análisis del ANOVA se determinarán los factores e interacciones estadísticamente significativos, dosis del biosorbente, concentración inicial de Cr (VI) y pH, que influencian en la remoción de Cr (VI) y capacidad de adsorción.
¿Cuál es la metodología a seguir que permita determinar las condiciones óptimas de remoción de Cr (VI) mediante el análisis estadístico-matemático, determinando los factores y sus interacciones que influyan por su significancia estadística?	Aplicar la Metodología de Superficie de Respuesta para determinar las condiciones óptimas de remoción de Cr (VI) mediante la determinación de los valores óptimos de los factores y sus interacciones de significancia estadística relacionadas mediante un modelo matemático.	Mediante el análisis estadístico – matemático basado en la Metodología de la Superficie de Respuesta se determinará las condiciones óptimas de concentración inicial de Cr (VI), pH, dosis del adsorbente y sus interacciones que maximicen el porcentaje de remoción, cumpliendo con los VMA, y capacidad adsorbente del Cr (VI).