



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA
AMBIENTAL Y FORESTAL



“EFICIENCIA DE LA BIOMASA DEL SANKAYO (*Echinopsis maximilliana*) EN LA REMOCIÓN DE PLOMO (Pb) Y CADMIO (Cd)”

Bach. Yanet Martha Mamani Flores
TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL Y FORESTAL

Asesor: M.Sc. Cesar Enrique Yupanqui Bendita
Co-asesor: Ing. Eusebio German Peralta Julliri



Juliaca- Perú, 2025



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA
AMBIENTAL Y FORESTAL



“EFICIENCIA DE LA BIOMASA DEL SANKAYO (*Echinopsis maximiliana*) EN LA REMOCIÓN DE PLOMO (Pb) Y CADMIO (Cd)”

Bach. Yanet Martha Mamani Flores

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL Y FORESTAL**

Asesor: M.Sc. Cesar Enrique Yupanqui Bendita

Co-asesor: Ing. Eusebio German Peralta Julliri



Juliaca, 2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL
Y FORESTAL



“EFICIENCIA DE LA BIOMASA DEL SANKAYO (*Echinopsis maximiliana*) EN LA REMOCIÓN DE PLOMO (Pb) Y CADMIO (Cd)”

Bach. Yanet Martha Mamani Flores

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL Y FORESTAL**

Asesor: M.Sc. Cesar Enrique Yupanqui Bendita

Co-asesor: Ing. Eusebio German Peralta Julliri

Juliaca, 2025

Mamani, Y. (2025). *Eficiencia de la biomasa de sankayo (Echinopsis maximiliana) en la remoción de plomo (Pb) y cadmio (Cd)*. [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional de Juliaca.

AUTOR: Yanet Martha Mamani Flores.

TÍTULO: Eficiencia de la biomasa de sankayo (*Echinopsis maximiliana*) en la remoción de plomo (Pb) y cadmio (Cd).

PUBLICACIÓN: Juliaca, 2025

DESCRIPCIÓN: Cantidad de páginas (106 pp.)

NOTA: Tesis de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Forestal – Universidad Nacional de Juliaca.

CÓDIGO: 01-000072-01/M21

NOTA: Incluye bibliografía.

ASESOR: M.Sc. Cesar Enrique Yupanqui Bendita

CO-ASESOR: Ing. Eusebio German Peralta Julliri

PALABRAS CLAVE: Adsorción, cadmio, *Echinopsis maximiliana*, plomo, remoción.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y FORESTAL

“EFICIENCIA DE LA BIOMASA DEL SANKAYO (*Echinopsis maximiliana*) EN LA REMOCIÓN DE PLOMO (Pb) Y CADMIO (Cd)”

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL Y FORESTAL

Presentada por:

Bach. Yanet Martha Mamani Flores

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Dr. Wile Mamani Navarro
PRESIDENTE DE JURADO



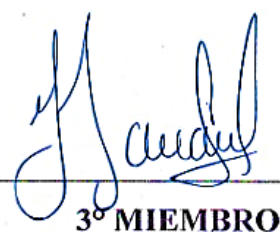
1° MIEMBRO

M.Sc. Ebed David Paredes Rodriguez
JURADO (secretario)




2° MIEMBRO

Dra. Yesica Magnolia Mamani Arpasi
JURADO (Vocal)



3° MIEMBRO



M.Sc. Cesar Enrique Yupanqui Bendita
ASESOR DE TESIS



Ing. Eusebio German Peralta Julliri
CO-ASESOR DE TESIS



Yanet Martha Mamani Flores

EFICIENCIA DE LA BIOMASA DEL SANKAYO (*Echinopsis maximiliana*) EN LA REMOCIÓN DE PLOMO (Pb) Y CADMIO (C...

 Universidad Nacional de Juliaca

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::3117:543729406

111 páginas

Fecha de entrega

31 dic 2025, 8:50 a.m. GMT-5

28.367 palabras

Fecha de descarga

31 dic 2025, 9:07 a.m. GMT-5

155.268 caracteres

Nombre del archivo

TESIS_UNAJ_FINAL_YANET_2025 (1).pdf

Tamaño del archivo

2.1 MB




12% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 10 palabras)


Fuentes principales

- 10%  Fuentes de Internet
- 2%  Publicaciones
- 7%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)



Marcas de integridad

N.º de alerta de Integridad para revisión

-  **Texto oculto**
2 caracteres sospechosos en N.º de página
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

DEDICATORIA

Dedico esta investigación a:

A Dios todo poderoso por acompañarme y ayudarme en todos los momentos de la vida, y darme siempre la esperanza de salir glorioso de cualquier obstáculo.

A mis padres Adolfo Mamani Chino y Aurelia Flores Mamani, quienes con infinito amor y trabajo guiaron mi vida profesional, por motivarme y brindarme apoyo en mi camino, los tropiezos de esta y ante cualquier otra circunstancia, hoy culmina una de las etapas más importante de mi vida.

A mis hermanos por su apoyo y consejos incondicionales que me sirvieron bastante.

A mis docentes de la Universidad Nacional de Juliaca que me brindaron de sus conocimientos.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, deseo agradecer de forma especial a la Universidad Nacional de Juliaca, mi alma mater, por acogerme en sus claustros para conseguir una formación profesional de calidad.

A la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Forestal, por formarme de manera integral en una profesión que fue siempre mi anhelo personal.

A los integrantes de los miembros del jurado que revisaron y dictaminaron el presente estudio, por sus valiosas sugerencias, que permitieron el mejor desarrollo y presentación de este, el cual estuvo conformado por el Dr. Wile Mamani Navarro, Dra. Yesica Magnolia Mamani Arpasi y M.Sc. Ebed David Paredes Rodríguez.

A mi asesor de tesis al M.Sc. Cesar Enrique Yupanqui Bendita y co-asesor Ing. Eusebio German Peralta Julliri por todo el tiempo dedicado al apoyo y revisión del documento y de los resultados, gracias por todas sus sugerencias y comentarios.

A los encargados del laboratorio Ing. Maribel Jara Mamani, Ing. Eusebio German Peralta Julliri e Ing. Jhoel Amador Ticona Ramos, por todas las facilidades prestadas para la ejecución del estudio.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE ANEXOS	x
RESUMEN	11
ABSTRACT	12
INTRODUCCIÓN	13

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Planteamiento del problema	14
1.2. Pregunta de investigación.....	15
1.2.1. Pregunta general	15
1.2.2. Preguntas específicas	15
1.3. Objetivo de la investigación	16
1.3.1. Objetivo general.....	16
1.3.2. Objetivos específicos	16
1.4. Hipótesis de la investigación.....	16
1.4.1. Hipótesis general	16
1.4.2. Hipótesis específicas.....	16
1.5. Justificación.....	17

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes	19
2.1.1. Internacionales	19
2.1.2. Nacionales.....	21
2.1.3. Locales	23
2.2. Marco teórico	24
2.2.1. Biomasa	24
2.2.2. Sankayo.....	24
2.2.3. Mecanismo de adsorción	25
2.2.4. Adsorción en medio acuoso.....	26

2.2.5. Metales pesados	26
2.2.6. Contaminación de agua por metales pesados	27
2.2.7. La bioacumulación de metales pesados y factores intervinientes	27
2.2.8. El plomo (Pb).....	28
2.2.9. El Cadmio (Cd).....	28
2.2.10. El proceso de adsorción	29
2.2.11. Modelos de adsorción	29
2.2.12. Factores que afectan la adsorción	30
2.2.13. Aplicaciones de la adsorción	31

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ámbito de estudio	32
3.2. Tipo de investigación	33
3.2.1. Variables dependientes e independientes del objetivo general.....	33
3.2.2. Variables dependientes e independientes de los objetivos específicos	33
3.3. Población y/o muestra	34
3.4. Descripción de métodos	34
3.4.1. Caracterización de las propiedades fisicoquímicas de la biomasa.	35
3.4.2. Eficiencia de la remoción de plomos (Pb) con biomasa de sankayo (<i>Echinopsis maximiliana</i>), con variación independiente del pH, la concentración inicial y el tiempo de contacto.....	37
3.4.3. Eficiencia de remoción de cadmio (Cd) con la biomasa de sankayo (<i>Echinopsis maximiliana</i>), con variación independiente del pH, la concentración inicial y el tiempo de contacto.....	40
3.5. Recolección de datos	41
3.6. Procesamientos de Datos.....	41
3.7. Análisis estadístico	42

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.8. Propiedades fisicoquímicas de la biomasa del sankayo (<i>Echinopsis maximiliana</i>)	44
3.9. Eficiencia de remoción de plomo (Pb) con biomasa de sankayo (<i>Echinopsis maximiliana</i>), con variación independiente del pH, la concentración inicial y el tiempo...	50
3.9.1. Eficiencia de remoción de plomo (Pb) con biomasa de sankayo (<i>Echinopsis maximiliana</i>) con variación del pH.	50
3.9.2. Eficiencia de remoción de plomo (Pb) con biomasa de sankayo (<i>Echinopsis maximiliana</i>).....	53

3.9.3. Eficiencia de remoción de plomo (Pb) con biomasa de sankayo (<i>Echinopsis maximiliana</i>) con variación de la concentración inicial.....	56
3.9.4. Eficiencia de remoción de plomo (Pb) con biomasa de sankayo (<i>Echinopsis maximiliana</i>) con variación del tiempo de contacto.....	59
3.9.5. Isotermas de adsorción para plomo	62
3.10. Eficiencia de remoción de cadmio (Cd) con biomasa de sankayo (<i>Echinopsis maximiliana</i>), con variación independiente del pH, la concentración inicial y el tiempo de contacto.....	67
3.10.1.Eficiencia de remoción de cadmio (Cd) con biomasa de sankayo (<i>Echinopsis maximiliana</i>) con variación del pH.	67
3.10.2.Eficiencia de remoción de cadmio (Cd) con biomasa de sankayo (<i>Echinopsis maximiliana</i>).....	70
3.10.3.Eficiencia de remoción de cadmio (Cd) con biomasa de sankayo (<i>Echinopsis maximiliana</i>) con variación de la concentración inicial.....	73
3.10.4.Eficiencia de remoción de cadmio (Cd) con biomasa de sankayo (<i>Echinopsis maximiliana</i>) con variación de tiempo de contacto.....	75
3.10.5.Isotermas de adsorción para cadmio	77

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1. Conclusiones	82
3.2. Recomendaciones.....	83
REFERENCIAS BIBILOGRAFICAS	84
ANEXOS	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Modelos de adsorción Freundlich y Langmuir	30
Tabla 2 Contenido de humedad y cenizas en biomasa del sankayo (<i>Echinopsis maximiliana</i>) ...	44
Tabla 3 Determinación del pH óptimo para la biosorción de plomo mediante biomasa del Sankayo (<i>Echinopsis maximiliana</i>)	50
Tabla 4 Prueba de rango múltiple de Tukey para determinación de pH óptimo para la biosorción de plomo con biomasa del Sankayo (<i>Echinopsis maximiliana</i>)	51
Tabla 5 Determinación de la cantidad de biomasa óptimo para la biosorción de plomo con biomasa del Sankayo (<i>Echinopsis maximiliana</i>).....	53
Tabla 6 Prueba de rango múltiple de Tukey para determinar la cantidad de biomasa óptimo para la biosorción de plomo.....	55
Tabla 7 Determinación de la concentración inicial de Pb óptimo para la biosorción de plomo mediante biomasa del Sankayo (<i>Echinopsis maximiliana</i>)	56
Tabla 8 Prueba de rango múltiple de Tukey para determinar la concentración inicial óptima para la biosorción de plomo.....	58
Tabla 9 Determinación del tiempo óptimo de contacto para la biosorción de Pb mediante biomasa del Sankayo (<i>Echinopsis maximiliana</i>).....	59
Tabla 10 Prueba de rango múltiple de Tukey para determinar el tiempo de contacto óptimo para la biosorción de plomo.....	61
Tabla 11 Valores para ajustar la educación bajo el modelo de Langmuir para la biosorción de plomo utilizando biomasa de Sankayo	63
Tabla 12 Valores de los parámetros del modelo de Langmuir para la biosorción de plomo utilizando biomasa de Sankayo	64
Tabla 13 Valores para ajustar la educación bajo el modelo de Freundlich para la biosorción de plomo utilizando biomasa de Sankayo	64
Tabla 14 Valores de los parámetros del modelo de Freundlich para la biosorción de plomo utilizando biomasa de Sankayo	66
Tabla 15 Determinación del pH óptimo para la biosorción de Cadmio mediante biomasa del Sankayo (<i>Echinopsis maximiliana</i>).....	67
Tabla 16 Prueba de rango múltiple de Tukey para determinar el pH óptimo para la biosorción de Cadmio.....	68
Tabla 17 Determinación de la cantidad de biomasa óptimo para la biosorción de Cadmio mediante biomasa del Sankayo (<i>Echinopsis maximiliana</i>).	70

Tabla 18 Prueba de rango múltiple de Tukey para determinar la biomasa óptima para la biosorción de Cadmio.....	71
Tabla 19 Determinación de la concentración inicial óptima de cadmio para la biosorción mediante biomasa del Sankayo (<i>Echinopsis maximiliana</i>)	73
Tabla 20 Prueba de rango múltiple de Tukey para determinar la concentración inicial óptima para la biosorción de cadmio.....	74
Tabla 21 Determinación del tiempo de contacto óptimo para la biosorción de cadmio mediante biomasa del Sankayo (<i>Echinopsis maximiliana</i>)	75
Tabla 22 Prueba de rango múltiple de Tukey para determinar el tiempo de contacto óptimo para la biosorción de cadmio.....	76
Tabla 23 Valores para ajustar la educación bajo el modelo de Langmuir para la biosorción de Cadmio utilizando biomasa de Sankayo (<i>Echinopsis maximiliana</i>).....	78
Tabla 24 Valores para ajustar la ecuación bajo el modelo de Freundlich para la biosorción de cadmio utilizando biomasa de Sankayo (<i>Echinopsis maximiliana</i>)	80
Tabla 25 Valores de los parámetros del modelo de Freundlich para la biosorción de cadmio utilizando biomasa de Sankayo (<i>Echinopsis maximiliana</i>)	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Interacción de los iones metálicos de Pb^{2+} y Cd^{2+}</i>	26
Figura 2. <i>Zona de recolección de plantas de Sankayo (<i>Echinopsis maximiliana</i>)</i>	32
Figura 3. <i>Proceso de obtención de biomasa de sankayo (<i>Echinopsis maximiliana</i>)</i>	35
Figura 4. <i>Diagrama de proceso de remoción de Pb con biomasa de sankayo (<i>Echinopsis maximiliana</i>)</i>	39
Figura 5 . <i>Diagrama del proceso de remoción de Cd con sankayo (<i>Echinopsis maximiliana</i>)</i>	43
Figura 6. <i>Microscopio Electrónico de Barrido ETD de sankayo (<i>Echinopsis maximiliana</i>) antes de tratamiento</i>	45
Figura 7. <i>Microscopio Electrónico de Barrido EDS-Ultra Dry de sankayo (<i>Echinopsis maximiliana</i>) antes de tratamiento</i>	46
Figura 8. <i>Espectro FTIR de la biomasa de los cladodios de sankayo</i>	48
Figura 9. <i>Determinación de pH óptimo para la biosorción de plomo mediante biomasa del Sankayo (<i>Echinopsis maximiliana</i>)</i>	52
Figura 10. <i>Determinación de biomasa óptima para la biosorción de plomo mediante biomasa del Sankayo (<i>Echinopsis maximiliana</i>)</i>	55
Figura 11. <i>Determinación de concentración inicial óptima para la biosorción de plomo mediante biomasa del Sankayo (<i>Echinopsis maximiliana</i>)</i>	58
Figura 12. <i>Determinación del tiempo de contacto óptimo para la biosorción de plomo mediante biomasa del Sankayo (<i>Echinopsis maximiliana</i>)</i>	61
Figura 13. <i>Modelo de adsorción de Langmuir para la biosorción de plomo mediante biomasa del Sankayo (<i>Echinopsis maximiliana</i>)</i>	63
Figura 14. <i>Modelo de adsorción de Freundlich para la biosorción de plomo mediante biomasa del Sankayo (<i>Echinopsis maximiliana</i>)</i>	65
Figura 15. <i>Determinación del pH óptimo para la biosorción de Cadmio mediante biomasa del Sankayo (<i>Echinopsis maximiliana</i>)</i>	69
Figura 16. <i>Determinación de la biomasa óptima para la biosorción de Cadmio mediante biomasa del Sankayo (<i>Echinopsis maximiliana</i>)</i>	72
Figura 17. <i>Determinación de la concentración inicial óptima para la biosorción de Cadmio mediante biomasa del Sankayo (<i>Echinopsis maximiliana</i>)</i>	74
Figura 18. <i>Determinación del tiempo de contacto óptimo para la biosorción de Cadmio mediante biomasa del Sankayo (<i>Echinopsis maximiliana</i>)</i>	77
Figura 19. <i>Modelo de adsorción de Langmuir para la biosorción de Cadmio mediante biomasa del Sankayo (<i>Echinopsis maximiliana</i>)</i>	79

Figura 20. <i>Modelo de adsorción de Freundlich para la biosorción de cadmio mediante biomasa del Sankayo (Echinopsis maximiliana).</i>	80
Figura 21. <i>Recolección de sankayo (Echinopsis maximiliana).</i>	104
Figura 22. <i>Limpieza y selección de sankayo (Echinopsis maximiliana).</i>	104
Figura 23. <i>Trozado y secado de sankayo (Echinopsis maximiliana).</i>	105
Figura 24. <i>Molido y tamizado de sankayo (Echinopsis maximiliana).</i>	105
Figura 25. <i>Obtención de la humedad y cenizas.</i>	106
Figura 26. <i>Biomasa de sankayo (Echinopsis maximiliana).</i>	106
Figura 27. <i>Preparación de curvas de calibración y soluciones de Plomo y Cadmio</i>	107
Figura 28. <i>Disolución de muestra en solución estándar y ajuste de pH.</i>	107
Figura 29. <i>Agitación y filtración de muestra.</i>	108
Figura 30. <i>Lectura de muestras con equipo espectrofotometría por flama.</i>	108

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo I. <i>Operacionalización de variables</i>	94
Anexo II. <i>Análisis estadístico</i>	95
Anexo III. <i>Ficha de compra de solución estándar</i>	97
Anexo IV. <i>Informe de análisis EDT/EDS de la biomasa de sankayo (Echinopsis maximiliana)</i>	98
Anexo V. <i>Análisis por espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) de la biomasa de sankayo (Echinopsis maximiliana)</i>	100
Anexo VI. <i>Panel fotográfico</i>	104

RESUMEN

La presencia de plomo (Pb) y cadmio (Cd) en el medio ambiente representa un problema medioambiental debido a sus efectos nocivos para la salud y el ecosistema. En respuesta a este problema, se evaluó la eficacia de la biomasa de sankayo (*Echinopsis maximiliana*) para eliminar el plomo y el cadmio de soluciones acuosas. La biomasa se secó y se molió previamente, y posteriormente se caracterizó mediante microscopía electrónica de barrido Ultra Dry/ETD y espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). El análisis Ultra Dry/ETD reveló una superficie irregular y porosa, una característica que favorece los procesos de adsorción, el análisis EDS reveló una composición elemental predominante de carbono 45.19 %, oxígeno 27.09 % y nitrógeno 5.81 %. Así como también el espectro FTIR confirmó la presencia de grupos funcionales O-H, C-H, C=O, C=C y C-O-C, que actúan como sitios activos responsables de la interacción con los iones metálicos. En cuanto a las pruebas de adsorción en laboratorio, el Pb^{2+} alcanzó su máxima eliminación a un pH de 5.5, con una biomasa de 0.5 g, una concentración inicial de 5 mg/L y un tiempo de contacto de 60 min, ajustándose al modelo de Freundlich $R^2 = 0.9902$. Para el Cd^{2+} , las mejores condiciones fueron pH 5, 0.5 g de biomasa, 10 mg/L y 120 min, con un buen ajuste al modelo de Langmuir $R^2 = 0.9665$ y una alta afinidad de la biomasa por este metal. La biomasa obtenida muestra que (*Echinopsis maximiliana*), sin tratamiento químico, es un biosorbente económico y eficiente, siendo una alternativa natural para la remediación de aguas contaminadas con metales pesados, gracias a su significativa capacidad de adsorción.

Palabras clave: Adsorción, cadmio, *Echinopsis maximiliana*, plomo, remoción.

ABSTRACT

The presence of lead (Pb) and cadmium (Cd) in the environment poses an environmental problem due to their harmful effects on health and the ecosystem. In response to this problem, the effectiveness of sankayo biomass (*Echinopsis maximiliana*) in removing lead and cadmium from aqueous solutions was evaluated. The biomass was dried and ground beforehand, and then characterized using Ultra Dry/ETD scanning electron microscopy and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). Ultra Dry/ETD analysis revealed an irregular and porous surface, a characteristic that favors adsorption processes. EDS analysis revealed a predominant elemental composition of 45.19% carbon, 27.09% oxygen, and 5.81% nitrogen. The FTIR spectrum also confirmed the presence of functional groups O-H, C-H, C=O, C=C, and C-O-C, which act as active sites responsible for interaction with metal ions. Regarding laboratory adsorption tests, Pb^{2+} achieved maximum removal at a pH of 5.5, with a biomass of 0.5 g, an initial concentration of 5 mg/L, and a contact time of 60 min, fitting the Freundlich model $R^2 = 0.9902$. For Cd^{2+} , the best conditions were pH 5, 0.5 g of biomass, 10 mg/L, and 120 min, with a good fit to the Langmuir model $R^2 = 0.9665$ and a high affinity of the biomass for this metal. The biomass obtained shows that (*Echinopsis maximiliana*), without chemical treatment, is an economical and efficient biosorbent, being a natural alternative for the remediation of water contaminated with heavy metals, thanks to its significant adsorption capacity.

Keywords: Adsorption, cadmium, *Echinopsis maximiliana*, lead, removal.

INTRODUCCIÓN

El agua es esencial para el funcionamiento saludable de los ecosistemas y la salud humana (Quispe & Torres, 2024), sin embargo a nivel mundial, la gestión inadecuada del agua ha reducido en un 20 % la disponibilidad per cápita de agua dulce; el 72 % se destina a la agricultura, y el agua subterránea, que representa el 99 % del agua dulce líquida, enfrenta graves amenazas por contaminación. (FAO, 2021), de metales pesados, es un problema crítico en diversas actividades, representando un riesgo para el ecosistema y la salud humana (Flores et al., 2025). El plomo (Pb) y el cadmio (Cd) se destacan entre los metales más preocupantes debido a su persistencia, solubilidad y toxicidad (Riveros & Huaman, 2022); ha generado una contaminación significativa que compromete la calidad del agua. (López et al., 2022).

La contaminación de fuentes con metales pesados es una preocupación mundial, que ha aumentado debido al incremento de actividades contaminantes (Wan et al., 2020). Las tecnologías convencionales para su remoción, como la precipitación química, la filtración por membranas, suelen ser costosas y generan residuos secundarios que requieren tratamiento adicional. Por ello, se propone las alternativas ecológicas y económicas, como el uso de adsorbentes naturales, que actúan como agentes eficientes para secuestrar metales pesados en medios acuáticos (Pillaca, 2023), el uso de biomasa de origen vegetal han emergido como alternativa de bajo costo y amigable al medio ambiente (Vásquez et al., 2021), contienen grupos funcionales como carboxilos e hidroxilos, que al estar desprotonados pueden reaccionar con diferentes iones metálicos para formar complejos estables, esto permite la absorción de metales pesados (Barbera et al., 2023).

La biomasa de *Echinopsis maximiliana* ha sido considerada como un biosorbente eficiente para metales pesados, ya que presenta grupos funcionales como grupo hidroxilo, cetona, éster, carboxílico, estas contienen electrones libres, es decir, existe una alta afinidad entre los grupos funcionales de la biomasa y los contaminantes con metales (Leon, 2023). También Barbera et al.,(2023) menciona la capacidad de *Opuntia Ficus Indica* para retener iones metálicos es eficiencia en la remoción de metales en una solución acuosa, ya que pertenece al género *Opuntia*, de la familia *Cactaceae*. En ese contexto, el presente estudio tiene como objetivo general Determinar la eficiencia de la biomasa del sankayo (*Echinopsis maximiliana*) en la remoción de Plomo (Pb) y Cadmio (Cd) en soluciones acuosas a nivel de laboratorio. Los resultados contribuirán al desarrollo de técnicas sostenibles para la remoción de metales en aguas contaminadas. (Abdelkarim et al., 2025).

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Planteamiento del problema

A nivel global, la inadecuada gestión del agua ha reducido en 20 % la disponibilidad per cápita de agua dulce, de la cual el 72 % se destina a la agricultura, además, el agua subterránea que representa el 99 % del agua dulce líquida enfrenta crecientes riesgos de contaminación al medio ambiente (FAO, 2021) entre los principales fuentes destacan efluentes urbanos, los cuales aportan metales pesados como Pb, Cd, Cu y Zn (Venkadeshwaran et al., 2025)(Torres et al., 2025) estos metales pesados son los principales problemas ambientales de gran preocupación a nivel mundial.

En Latinoamérica mientras tanto se concentra cerca de un tercio del agua dulce del planeta. Sin embargo, alrededor de 166 millones de personas carecen de acceso a agua potable (FAO, 2023), y el 50% de las aguas residuales no recibe un tratamiento adecuado (OMS, 2024), lo que incrementa la crisis hídrica en la región (IPCC, 2023). Así como en Canadá, se ha informado que el 33% de los estudios realizados en muestras de agua detectaron niveles de plomo que exceden los valores máximos permitidos por la legislación nacional (Nascimento et al., 2024). La presencia de metales tóxicos como plomo (Pb) y cadmio (Cd) altera el equilibrio natural de los ecosistemas, sobrepasando su capacidad de autodepuración y acumulándose en niveles que ponen en riesgo tanto a la fauna acuática como a la salud humana (Mena & Perez, 2021).

En el Perú, al ser el cuarto mayor productor de plomo (Pb) a nivel mundial, no es raro que se presenten casos de contaminación por este metal. En la región Puno, en diversos distritos se evidenció la presencia de metales tóxicos como plomo, cadmio, arsénico y mercurio (Pino & Soto, 2024). Estos metales pesados constituyen uno de los problemas ambientales de mayor preocupación a nivel global. (Torres et al., 2025). La exposición a metales pesados afecta gravemente la salud, provocando deterioro cognitivo y alteraciones en el desarrollo (Canales et al., 2022).

Esta situación tiene un fuerte impacto en la salud de la población, causando efectos como disminución de las capacidades cognitivas, retraso en el desarrollo mental, alteraciones en el comportamiento y problemas en el desarrollo neuropsicológico, lo cual acarrea serias consecuencias para el país (Canales et al., 2022). Así mismo el

Cadmio, presenta efectos perjudiciales en la salud del ser humano, como son su relación con procesos cancerígenos, es importante destacar que parte del cadmio que ingresa al cuerpo humano se excreta en la orina; sin embargo, el proceso de excreción de cadmio es lento, el período de retención de Cd varía de 7 a 30 años, lo que permite su acumulación y efectos sobre la salud (Serra et al., 2024). Por lo cual, este elemento por sus características es considerado como uno de los más perjudiciales para la salud humana y para el medio ambiente (Kumar et al., 2024). Este escenario refleja una problemática ambiental preocupante, asociada principalmente a la contaminación de cuerpos de agua por actividades antrópicas, la cual afecta tanto a los ecosistemas como a la salud de la población local (Pillaca, 2023).

La bioabsorción es una alternativa ambientalmente amigable y económicamente accesible para la retención y eliminación de contaminantes, especialmente metales, desde soluciones acuosas (Barbera et al., 2023, Volpe et al., 2025).

Mientras que, por otro lado, en la región Puno se evidencia la presencia de diversas especies vegetales con potencial de aprovechamiento en la remediación de aguas contaminadas con metales pesados (Quispe, 2023). Entre estas especies destaca *Echinopsis maximiliana*, una cactácea ampliamente distribuida en la zona, cuyas características morfológicas y bioquímicas permiten considerarla como una alternativa natural para la remoción de contaminantes (León, 2024). Frente a ello, surge la necesidad de explorar soluciones sostenibles, económicamente viables y de aplicación en plazos relativamente cortos, que permitan mitigar los impactos negativos de los metales pesados.

1.2. Pregunta de investigación

1.2.1. Pregunta general

¿Es eficiente la biomasa del sankayo (*Echinopsis maximiliana*) en la remoción de plomo (Pb) y cadmio (Cd)?

1.2.2. Preguntas específicas

- ¿Cuáles son las propiedades fisicoquímicas del biosorbente obtenido de biomasa del sankayo (*Echinopsis maximiliana*)?

- ¿Es eficiente la biomasa de sankayo (*Echinopsis maximiliana*) con variación independiente del pH, la concentración inicial y el tiempo de contacto para la remoción de plomo (Pb) ?
- ¿Es eficiente la biomasa de sankayo (*Echinopsis maximiliana*), con variación independiente del pH, la concentración inicial y el tiempo de contacto para la remoción de cadmio (Cd)?

1.3. Objetivo de la investigación

1.3.1. Objetivo general

Evaluar la eficiencia de la biomasa del sankayo (*Echinopsis maximiliana*) en la remoción de plomo (Pb) y cadmio (Cd).

1.3.2. Objetivos específicos

- Caracterizar las propiedades fisicoquímicas de la biomasa del sankayo (*Echinopsis maximiliana*).
- Evaluar la eficiencia de remoción de plomo (Pb) con biomasa de sankayo (*Echinopsis maximiliana*) con variación independiente del pH, la concentración inicial y el tiempo de contacto.
- Evaluar la eficiencia de remoción de cadmio (Cd) con biomasa de sankayo (*Echinopsis maximiliana*) con variación independiente del pH, la concentración inicial y el tiempo de contacto.

1.4. Hipótesis de la investigación

1.4.1. Hipótesis general

La biomasa del sankayo (*Echinopsis maximiliana*) es eficiente en la remoción de plomo (Pb) y cadmio (Cd).

1.4.2. Hipótesis específicas

- La biomasa del sankayo (*Echinopsis maximiliana*) tiene propiedades fisicoquímicas para ser biosorbente.
- La biomasa del sankayo (*Echinopsis maximiliana*), con variación independiente del pH, la concentración inicial y el tiempo de contacto es eficiente en la remoción de plomo (Pb).

- La biomasa del sankayo (*Echinopsis maximiliana*), con variación independiente del pH, la concentración inicial y el tiempo de contacto es eficiente en la remoción de cadmio (Cd).

1.5. Justificación

Desde la perspectiva ambiental Desde el enfoque ambiental, la región Puno presenta contaminación en sus cuerpos de agua por actividades antrópicas, con plomo (Pb) y cadmio (Cd) frecuentemente por encima de los límites establecidos (MINAM, 2018; Acuña, 2020); Ante esta problemática, surge la necesidad de implementar tecnologías sostenibles, eficientes y de bajo costo para la remoción de estos contaminantes. La bioadsorción se presenta como una alternativa ambientalmente amigable, ya que utiliza materiales naturales y biodegradables, no genera subproductos tóxicos y contribuye a la disminución de la contaminación hídrica (Barbera et al., 2023), (Volpe et al. (2025), es por ello se utilizó especie cactácea sankayo (*Echinopsis maximiliana*) ya que presenta amplia distribución en esta región (Pari & Taype, 2020), y debido a su contenido de lignina y celulosa, se perfila como un adsorbente natural de alto rendimiento para iones metálicos (Dong et al., 2025).

En la dimensión social, la contaminación por metales pesados afecta los cuerpos de agua y los ecosistemas acuáticos. Evaluar la eficiencia de la biomasa de sankayo (*Echinopsis maximiliana*) como bioadsorbente constituye una alternativa sostenible para reducir Pb y Cd a niveles seguros, protegiendo la salud humana y los ecosistemas (Quispe 2023) (Irfan, 2024).

En la dimensión económico, la bioadsorción constituye una alternativa económica y sostenible frente a los métodos convencionales, aprovechando biomásas locales como *Opuntia ficus-indica* y *Echinopsis maximiliana*, que permiten la remoción eficiente de metales pesados con bajos costos operativos, siendo especialmente adecuada para comunidades rurales y de bajos recursos (Lascari et al., 2025; Barbera et al., 2023; Leon, 2023; Usedo et al., 2025).

En la dimensión tecnológico, la bioadsorción es una alternativa tecnológica eficiente para la remoción de metales pesados ya que es más sencilla y económica que otros métodos tradicionales como la precipitación química o la filtración, que

suelen ser costosos y demandan infraestructura compleja (Usedo et al., 2025). Esta tecnología permite aprovechar recursos naturales locales, es sostenible, integrando la eficiencia en la remoción de metales con un enfoque ambiental y económico (Liu et al., 2024).

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes

2.1.1. Internacionales

Lascari et al., (2025), analizaron los cladodios de *Opuntia ficus indica* (OFIC) para la eliminación de iones Pb^{2+} en soluciones acuosas. Se caracterizó mediante ATR-FTIR, y EDT-EDX, y se evaluó condiciones de pH, temperatura y fuerza iónica. El espectro FTIR del material evidenció bandas características de grupos funcionales como $-OH$ y $-NH_2$ a $3419-3250\text{ cm}^{-1}$, $C-H$ aromático a 3057 cm^{-1} , alifático a $2927-2851\text{ cm}^{-1}$, alrededor de 1027 cm^{-1} se atribuyen a vibraciones de celulosa y hemicelulosa, y la banda a 780 cm^{-1} se asocia al anillo de galactosa del mucílago. Los modelos de pseudo-segundo orden y Langmuir describieron adecuadamente la adsorción, con una capacidad máxima de 121 mg g^{-1} a pH 5,0. El proceso fue endotérmico, reversible y el material reutilizable hasta cuatro ciclos, conservando una eficiencia del 82,6 %.

Volpe et al. (2025) estudiaron la biomasa de *Opuntia ficus-indica* para remover metales pesados del agua en Sicilia. Se aplicaron procesos encadenados: carbonización hidrotermal (HTC), extracción de biocombustibles y activación con CO_2 . A $180\text{ }^\circ C$ de HTC y $800\text{ }^\circ C$ de activación, se obtuvieron rendimientos de 33 % líquidos hidrotermales, 22 % de char secundario y 15 % de carbón activado. Los adsorbentes lograron capacidades de hasta 669 mg/g para metales como Cd, Co, Cu y Zn. La adsorción fue química, facilitada por grupos carboxilo e hidroxilo. Se concluye que este enfoque modular permite generar energía renovable y tratar agua contaminada de forma eficiente y ecológica.

Prieto et al. (2024) realizaron un estudio sobre el uso de semillas de *Opuntia* como materiales en la bioadsorción de cadmio y manganeso, partiendo de soluciones con concentraciones iniciales de 0.50 mg/L . Los resultados evidenciaron que las especies evaluadas presentan mayor afinidad por el manganeso, alcanzando eficiencias de adsorción entre 86.30% y 92.80%, siendo *O. ficus-indica* la de mejor desempeño, seguida de *O. matudae*. En el caso del cadmio, las eficiencias fueron menores, entre 51.80% y 66.30%, destacando *O. matudae* y *C. imbricata*. Se concluyó que, las semillas de *Opuntia* son eficaces en la bioadsorción de Mn y Cd.

González et al. (2024), evaluarón la concentración de ácidos urónicos en mucílago de *Opuntia ficus-indica* en la remoción de metales pesados del río Yautepec, México. Se utilizaron mucílagos de nopales en tres etapas (M1, M2 y M3) y se analizaron por espectrofotometría UV-vis y FTIR. Las muestras de agua contenían hasta 1546 µg/L de hierro, 209 µg/L de manganeso y 80.8 µg/L de plomo. M3, logró remover hasta el 90.26 % de metales. Los espectros FTIR evidenciaron interacciones electrostáticas entre grupos funcionales del mucílago y los metales, siendo una alternativa eficaz, económica y ecológica para tratar aguas contaminadas.

Barbera et al., (2023), Se evaluó el cladodio crudo de *Opuntia ficus indica* como biosorbente sostenible para la remoción de Ni, Pb, Cu y Cd en soluciones acuosas. La caracterización por DRIFT-FTIR y CP-MAS-NMR evidenció la presencia de grupos funcionales O–H, N–H y C–H, responsables de la interacción con los metales. Al variar el pH (4–6), la concentración metálica y la cantidad de biomasa, se obtuvo hasta 80 % de remoción en 30 minutos, lo que indica una adsorción rápida, cuya cinética se ajustó al modelo de Freundlich.

Maaoui et al., (2023), caracterizaron la biomasa de cladodios de *Opuntia ficus-indica* (OFI) evidenció su alto contenido de materia volátil (64,31 %) y cenizas (25,27 %), así como su riqueza en minerales como Ca, Mg, K y P, lo que la hizo apta para aplicaciones energéticas y agrícolas. Los análisis FTIR mostraron la presencia de grupos funcionales como –OH, –COO⁻ y enlaces glucosídicos, mientras que las propiedades físicas del biocarbón obtenido, como área superficial, porosidad y pH, dependieron de la temperatura y el tiempo de residencia durante el pirólisis. Esta caracterización proporcionó información clave para optimizar la producción, así como para su aprovechamiento en la economía circular local

Wattanakornsiri et al. (2022) en su trabajo de investigación evaluarón el potencial de cáscaras de pitahaya (DFP), rambután (RP) y maracuyá (PFP), modificadas químicamente, para remover plomo (Pb²⁺) y cadmio (Cd²⁺) de aguas residuales. Bajo condiciones óptimas de 0.25 g de adsorbente, pH 4, 180 min de contacto y 100 mg/L de concentración inicial, los porcentajes de remoción fueron 97.87 % para Pb²⁺ y 97.10 % para Cd²⁺, siendo la cáscara de pitahaya la más eficiente. Estos resultados confirman ser una alternativa viable, bajo costo y sostenible para el tratamiento de aguas contaminadas con metales.

Nouri et al., (2021), evaluaron que el polvo de cladodios de cactus tunecino es un adsorbente de bajo costo eficaz para eliminar iones Pb (II) en solución acuosa; bajo condiciones variables de pH 2-10, concentración y temperatura 30-60 °C, los datos de equilibrio se ajustaron mejor al modelo de Freundlich, identificándose difusión de película e intrapartícula y un mecanismo exotérmico y químico. Alcanzó una capacidad de remoción de 166 mg/g, mostró buena porosidad y grupos funcionales superficiales, la remoción aumentó de 34 % a 80 % al subir el pH de 2 a 10, alcanzó el equilibrio en 120 min, lo que lo posiciona como adecuado para tratamiento de aguas con metales pesados.

Weldu et al., (2018), evaluaron el polvo seco del cactus *Opuntia* para la remoción de metales pesados como Pb²⁺ y Zn²⁺ en soluciones acuosas. Los espectros EDS obtenidos del polvo virgen y del polvo cargado con metales confirmaron el proceso de adsorción de los iones Pb²⁺ y Zn²⁺. El polvo virgen presentó la presencia de C, O, Mg, Ca, Pb y K, mientras que en el polvo cargado con plomo (*Opuntia*-Pb) se observó un pico más intenso correspondiente a este metal. El material mostró una eficiencia máxima de eliminación de 90.6 % para Pb²⁺ y 37.6 % para Zn²⁺, los resultados de los modelos cinéticos de pseudo-segundo orden y Freundlich evidencian como una alternativa natural, económica y sostenible para el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados.

2.1.2. Nacionales

Chiroque (2024), estudió la Capacidad de remediación de *Armatocereus cartwrightianus* y *Opuntia ficus-indica* en aguas de riego agrícola para fines de uso doméstico Piura 2022, evaluó la presencia de metales pesados en función del pH. Aunque las concentraciones no superaron los estándares del MINAM, se observó que el pH influyó en la movilidad de los metales. El cadmio presentó 0.0000303 mg/L a pH 7.27, mientras que el plomo mostró una concentración constante de 0.000590 mg/L en los valores de pH 6.14, 6.28 y 7.27. El estudio concluyó que las especies utilizadas modifican el comportamiento de los metales pesados, aun cuando sus concentraciones estén por debajo de los ECAs.

Tejada et al., (2021), evaluaron la capacidad de adsorción de iones Pb (II) utilizando cáscara de *Opuntia ficus indica* (tuna) como biosorbente. Los análisis FTIR evidenciaron la presencia de grupos funcionales hidroxilo, carbonilo y alcohol, los cuales son responsables de la interacción con los iones metálicos. El análisis SEM mostró una superficie mesoporosa, y el análisis de EDS confirmó un alto contenido de plomo en la superficie del material después de la adsorción. Bajo condiciones óptimas de 0,1 g y concentración inicial de 90 mg/L, logrando una capacidad máxima de remoción de 40,97 mg/g. El modelo de Langmuir, lo que indico que el metal se adsorbió en la superficie del metal en una monocapa. Se demostró el potencial de la cáscara de *Opuntia ficus indica* como un adsorbente económico y eficiente para eliminar metales pesados de efluentes industriales y mineros.

Lavado et al. (2020), publicaron el artículo en Lima, titulado “Biosorción de plomo (II) en solución acuosa con biomasa de los cladodios de la tuna (*Opuntia ficus indica*)”; evaluaron la remoción de plomo en soluciones acuosas con biomasa de cladodios de tuna (BCT), identificando grupos funcionales –OH, CO–C, C=O y –NH₂ relacionados con la biosorción. El mejor rendimiento se obtuvo con 4 g/L, pH 4.5 y 1 hora de contacto, logrando una capacidad máxima de 50.25 mg/g, ajustándose al modelo de Langmuir ($R^2 = 0.994$). La cinética siguió un modelo de pseudo segundo orden ($X^2 = 0.02$). Se concluye que la tuna es un biosorbente eficiente, económico y ecológico para tratar aguas contaminadas con plomo.

Arones & Perez, (2024), evaluaron la eficiencia de los adsorbentes naturales *Opuntia ficus-indica* (tuna) y *Selenicereus megalanthus* (pitahaya) en la remoción de plomo (Pb) de las aguas del río Rímac, mediante pruebas de jarras y análisis fisicoquímicos e inorgánicos (ICP-OES). Los resultados demostraron que ambos adsorbentes son eficaces, alcanzando porcentajes de remoción entre 69,73 % y 93,63 %, con una dosis óptima de 200 ppm (0,2 g/L) para cada especie. Además, se observó una disminución significativa en la turbidez y concentración de plomo, manteniéndose los parámetros de pH y conductividad dentro de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA). En conjunto, la pitahaya mostró mayor eficacia que la tuna en la remoción de plomo del agua.

Según Cabrera, (2018), evaluó el uso del tallo de rosas como material bioadsorbente para la remoción de plomo (II) en soluciones acuosas, el contenido de humedad del 56.06% y un punto de carga cero (PCZ) a pH 6.64, lo cual sugiere un comportamiento ligeramente ácido. El tratamiento secuencial con hidrólisis ácida y alcalina (TRHS) mejoró notablemente la eficiencia del biosorbente, alcanzando hasta un 99.72% de remoción de Pb (II) bajo condiciones óptimas (pH 4, 0.05 g de biomasa, 10 mg/L de concentración inicial y 180 min). El proceso fue mejor descrito por el modelo de isoterma de Langmuir $R^2 = 0.9854$, lo que posiciona al tallo de rosa como un biosorbente altamente eficiente frente a contaminantes metálicos.

2.1.3. Locales

Leon (2023), evaluó la eficacia de la biomasa RHC-06 (*E. coli*) y Waraqqo (*Echinopsis maximiliana*) en la remoción de metales pesados de aguas residuales. La metodología fue experimental, se ejecutaron varias pruebas de biosorción a pH 6,4 utilizando 0,3 g de biomasa en 150 mL de agua residual, analizando la remoción de metales como Pb, Zn y Ni. Los resultados, fueron que se logró una remoción del 96,84 % de Pb, 99,85 % de Zn y 94,48% de Ni, evidenciando la alta eficiencia de la biomasa. Se concluye que la biomasa utilizada es efectiva para la biosorción de metales pesados.

Quispe (2023), evaluó la bioremediación de cobre y plomo mediante las *Mougeotia sp.* y *Spirogyra sp.* en condiciones de laboratorio. Durante cinco días de ensayo con concentraciones de hasta 30 mg/L, se determinó que ambas especies presentaron alta eficiencia en la remoción de plomo, destacando *Mougeotia sp.* con 94.73% y *Spirogyra sp.* con 87.53% al tratamiento de 15 mg/L. Asimismo, se observó una reducción del contenido de clorofila a mayor concentración de plomo. El estudio concluyó que estas algas poseen un notable potencial para ser aplicadas en la remoción de metales pesados en ecosistemas acuáticos contaminados.

Rodriguez (2021), Se realizó una revisión documental sobre el uso de biomazas para la remoción de metales pesados en aguas contaminadas mediante adsorción, identificándose que biomazas de origen vegetal y animal, especialmente residuos vegetales, presentan alto potencial de biosorción. El estudio concluye que estas biomazas constituyen una alternativa eficaz y sostenible para la descontaminación de aguas y la protección de la salud ambiental.

Shabbirahmed et al. (2025) evaluaron la capacidad de remoción de metales pesados (As, Pb, Fe y Zn) en aguas del río Calera, Portovelo (Ecuador), utilizando biomasa seca de banano, arroz y coco como biosorbentes naturales. Aplicaron una metodología experimental con 12 tratamientos, variando la biomasa 20–100 g, tiempo 4 y 8 h, tamaño de partícula 0.43–2 mm, volumen de muestra 500–1000g y pH 5. Los resultados mostraron que 7 tratamientos lograron una remoción del 100 % y otros alcanzaron entre 80 % y 24 %. Se concluye que estos residuos agroindustriales son una solución ecológica, económica y eficiente para la depuración de efluentes mineros.

2.2. Marco teórico

2.2.1. Biomasa

Es toda materia de origen vegetal o animal, ya sea en estado natural o como resultado de su transformación, incluyendo derivados, subproductos y residuos tanto si provienen de procesos naturales como de intervención humana, ya sean materiales biodegradables generados en actividades agrícolas, forestales, acuícolas, industriales o municipales, lo que permite aprovecharlos como fuente energética sustancial y sostenible (Luque, 2024).

2.2.2. Sankayo

El Sankayo (*Echinopsis maximiliana*) es una especie de cactácea, con tallos cilíndricos, esféricos verdes o cortos, con brotes de 5 cm de diámetro y alcanzan alturas de hasta 20 cm, con 12 a 20 rectas costillas presentes, presenta areolas con 2 cm de distancia, donde surgen 11 a 56 espinas, las espinas son curvas, irregulares, color marrón amarillento y de 3 a 5 cm de largo (Pari & Taype, 2020). Las flores tienen forma de embudo y surgen en los brotes superiores, son de color rojo con una garganta de color naranja-amarillo o de color púrpura, los frutos son de color rojizo verdes y con presencia de pubescencia con diámetro de hasta 1.2 cm (Alva, 2022).

a. Distribución

Esta especie es de amplia distribución en el ámbito de la cuenca del lago Titicaca, en altitudes de entre 3500 a 4000 msnm, es resistente a las bajas temperaturas, así como a sequías.

b. Taxonomía

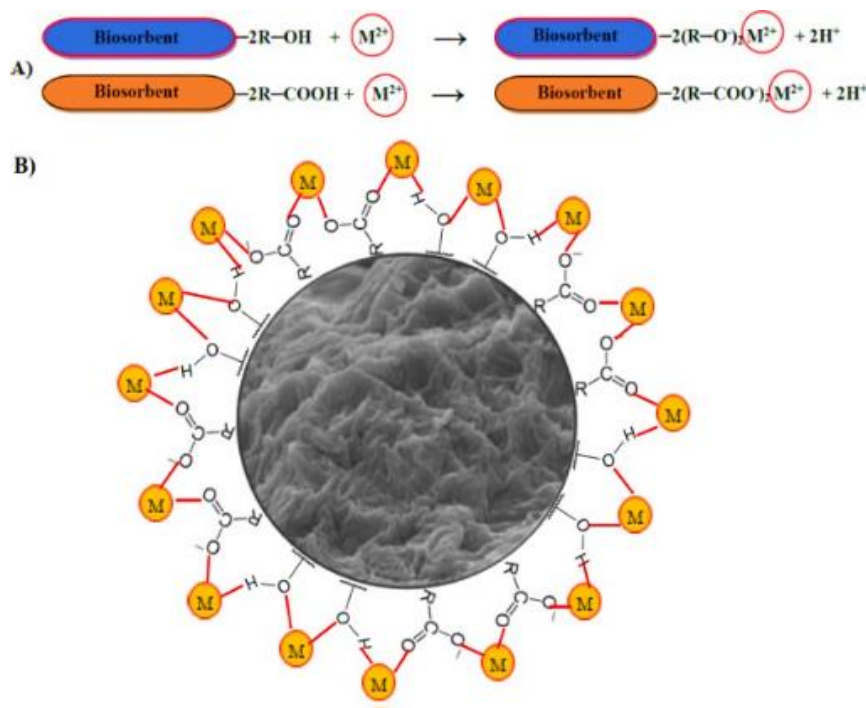
- División: Magnoliophyta
- Clase: Magnoliopsidae
- Subclase: Caryophyllidae
- Orden: Caryophyllales
- Familia: Cactaceae
- Género: *Echinopsis*.
- Especie: *Echinopsis maximiliana*

2.2.3. Mecanismo de adsorción

El proceso de adsorción depende de la naturaleza, tipos y características del adsorbente y del adsorbato, del adsorbato se considera el peso molecular, la estructura, el tamaño, la carga y la concentración de la solución, mientras que del adsorbente son el tamaño de las partículas, el área superficial, la carga superficial, la accesibilidad de los poros, la difusión intrapartícula, y los grupos funcionales de la superficie (Gouda & Taha, 2023). Además también las características adsorbente-adsorbato, muchos parámetros fisicoquímicos del proceso, como la concentración inicial de iones metálicos, la dosis de adsorbente, el tiempo de contacto, el pH de la solución y la temperatura, afectan significativamente el proceso de adsorción ya que pueden mejorar o debilitar la eficiencia de eliminación al afectar también la solubilidad de los iones metálicos, la cinética y comportamiento isotérmico (Aguilar et al., 2022). Según Na et al., (2020) los heteropolisacáridos compuestos por azúcares como arabinosa, galactosa, ácido galacturónico, ramnosa y xilosa poseen grupos funcionales que favorecen la adsorción de metales pesados, debido a su capacidad para interactuar con iones metálicos presentes en solución.

Figura 1

Interacción de los iones metálicos de Pb^{2+} y Cd^{2+}



Nota. El gráfico representa el mecanismo de adsorción de metales tomado de *Local fruit peel biosorbents for lead (II) and cadmium (II) ion removal from waste aqueous solution*, (p. 310) por Wattanakornsiri et al., (2022), *South African Journal of Chemical Engineering*.

2.2.4. Adsorción en medio acuoso

Es un proceso fisicoquímico mediante el cual moléculas o iones disueltos en agua se adhieren a la superficie de un sólido llamado adsorbente, este fenómeno ocurre debido a interacciones entre la superficie del sólido y las especies químicas presentes en la solución, que pueden ser fuerzas físicas (fisisorción) o químicas (quimisorción) (Demirbas, 2008) En sistemas acuosos, este proceso se aplica ampliamente para eliminar contaminantes del agua, tales como metales pesados (Pb^{2+} , Cd^{2+} , Cr^{6+}), colorantes, compuestos orgánicos, fármacos, y nutrientes como nitratos o fosfatos, es una técnica eficaz y de bajo costo dentro del tratamiento de aguas residuales (Foo & Hameed, 2010).

2.2.5. Metales pesados

Se considera que un metal es pesado si su densidad supera los 5 g/cm^3 en estado elemental, y representa menos del 0,10 % de la corteza terrestre (Alotaibi, 2023). Entre estos metales, la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (USEPA)

incluye como contaminantes prioritarios a: arsénico, cromo, cobalto, níquel, cobre, zinc, plata, cadmio, mercurio, titanio, selenio y plomo (Gao et al., 2024) (Choque, 2024). A la vez, se distinguen dos grupos: los que actúan como oligoelementos o micronutrientes y aquellos cuya función biológica no está clara, como el plomo (Pb) y el cadmio (Cd)(Gao et al., 2024). Además, estos metales son implicados en la toxicidad potencial (Elmatsani et al., 2024) y no se degradan química ni biológicamente, lo que les permite permanecer en el medio ambiente durante tiempos prolongados, incluso siglos (Abdelkarim et al., 2025) (Loya, 2022).

Cuando los metales pesados se disuelven en ecosistemas acuáticos como ríos o lagos, se vuelven altamente biodisponibles: los organismos pueden absorberlos con facilidad, y esta transferencia se intensifica a través de la cadena trófica, acumulándose progresivamente en los niveles superiores (Tellez, 2021). Estos son peligrosos que afectan al fitoplancton y al zooplancton en sus primeras etapas perjudicando la fotosíntesis y detienen el crecimiento (Llanos et al., 2024). Además de provocar cambios físicos, químicos y biológicos que degradan la calidad del agua, y no resulta segura para el medio acuático ni consumo humano (Etchegoyen et al., 2020).

2.2.6. Contaminación de agua por metales pesados

El problema de contaminación se da cuando dichos metales exceden ciertos valores considerados como permisibles, y desencadenan el proceso de biomagnificación por su persistencia (James & Zimmerman, 2023). Según, Mena & Perez, (2021) y (Abdelkarim et al., 2025) provienen tanto de las actividades antrópicas (industria, agricultura, minería) como de forma natural (la lixiviación de rocas y suelos, las erupciones de volcanes), ambas causan alteraciones importantes del agua y a la biota que reside en ella, generando riesgos para la salud humana.

2.2.7. La bioacumulación de metales pesados y factores intervinientes

Los factores bióticos son aquellos que influyen en el comportamiento de los metales, puesto que dependen de factores físico, químicos y biológicos, entre ellos al proceso solubilización de los elementos inorgánicos, formación de depósitos y alteraciones de minerales, la toxicidad de los metales pesados es condicionada por el grado de bioasimilación, la actividad metabólica de los microorganismos juega un papel

importante en la movilidad de los elementos tóxicos en el medio ambiente (Pabón et al., 2020).

2.2.8. El plomo (Pb)

El plomo es un metal pesado gris azulado, de alta densidad y con puntos de fusión y ebullición relativamente bajos (Birgili et al., 2024). Las principales fuentes de exposición incluyen actividades industriales (Tellez et al., 2020), productos domésticos con plomo inorgánico (Nascimento et al., 2024) y emisiones vehiculares (Correa et al., 2021). El metal ingresa al organismo por vía oral, respiratoria o por absorción cutánea cuando hay contacto con compuestos orgánicos contaminados (Bala, 2025). Una vez absorbido, se distribuye a distintos órganos, incluido el sistema nervioso central, donde altera funciones celulares y genera efectos neurológicos, hematológicos, endocrinos, renales, reproductivos e incluso cancerígenos (Revathi et al., 2024) y (Abdelkarim et al., 2025). Su toxicidad depende de la dosis y la exposición prolongada puede causar daños crónicos (Ticlia, 2021). Los límites máximos de plomo en agua potable son 10 µg/L según la OMS y 5 µg/L según la Comisión Europea (Vizcaíno et al., 2017).

2.2.9. El Cadmio (Cd)

El cadmio es un metal pesado de alta toxicidad, de color blanco azulado, dúctil y maleable, con un punto de fusión de 321 °C y un punto de ebullición de 767 °C. Es poco común en estado puro debido a la escasez de yacimientos en el mundo (Abdelkarim et al., 2025). por lo que su manipulación inadecuada puede causar intoxicaciones graves, se utiliza principalmente en recubrimientos anticorrosivos, en la fabricación de baterías, cinescopios y celdas solares (Alotaibi, 2023).

El Cd puede ingresar al organismo por inhalación o ingestión de alimentos y bebidas contaminados (Bala, 2025). Una vez absorbido, tiende a acumularse en los riñones, lo que favorece la aparición de enfermedad renal, además de producir daño pulmonar y fragilidad ósea en exposiciones prolongadas (Baird & Cann, 2021). En cuanto a su potencial cancerígeno, tanto el DHHS como la IARC clasifican al cadmio y a sus compuestos como carcinogénicos para los seres humanos (Vásquez et al., 2021).

2.2.10. El proceso de adsorción

La adsorción es un fenómeno fisicoquímico, por el que las moléculas de una sustancia en estado gaseoso o en solución, se acumulan en la superficie de un sólido denominado adsorbente (Chan-Keb et al., 2021). Este fenómeno presenta una connotación práctica para trabajos industriales y ambientales, entre los principales a la purificación de agua, captura de contaminantes o catálisis, se debe distinguir la adsorción de la absorción, que implica la penetración del soluto en el volumen del material y no solo en la superficie (Birgili et al., 2024).

- a. **Fisorción:** Caracterizado por la acción de interacciones débiles, como son las fuerzas de Van der Waals, la cual se produce entre el adsorbato y el adsorbente, este fenómeno se caracteriza por ser reversible y de baja energía, por lo general se presenta a bajas temperaturas, además que no implica cambios o alteraciones químicas en las moléculas que son adsorbidas (Etchegoyen et al., 2020).
- b. **Quimisorción:** Se produce cuando un enlace químico entre el adsorbato y el adsorbente, es un proceso específico y generalmente de naturaleza irreversible, para producirse se requiere una mayor energía de activación y como consecuencia es que puede provocar cambios en la estructura o producir reordenamientos atómicos en la parte superficial del adsorbente (Baird & Cann, 2021).

Así mismo otra clasificación, es la que indica una adsorción reversible, caracterizada porque las moléculas pueden desorberse de manera oportuna mediante cambios en la temperatura o la presión. Mientras que la adsorción irreversible, se produce cuando las moléculas adsorbidas tienden a formar fuertes enlaces y no pueden desorberse de manera fácil (Gonzaga et al., 2021).

2.2.11. Modelos de adsorción

En la actualidad se han desarrollado diversos modelos matemáticos para describir el proceso de adsorción, sin embargo, los más utilizados y que tienen un desarrollo pleno son los modelos de Freundlich y Langmuir, los cuales son descritos de manera suscita a continuación (Etchegoyen et al., 2020).

a. Modelo de Freundlich

Este modelo empírico describe la adsorción en superficies heterogéneas, sin asumir saturación del adsorbente. Permite explicar procesos que ocurren en múltiples capas y en sitios de adsorción no uniformes, donde un valor menor a uno indica adsorción

favorable (Tellez, 2021) y (Baird & Cann, 2021). Se aplica a la adsorción de gases y soluciones en sólidos, considerando diferentes tipos de sitios y energías de adsorción. Su principal limitación es que no establece una capacidad máxima de adsorción (León, 2024).

b. Modelo de Langmuir

Este modelo matemático asume que la adsorción ocurre formando una monocapa sobre una superficie homogénea, con sitios de adsorción equivalentes y sin interacción entre las moléculas adsorbidas. En este proceso, el adsorbato se fija en un número fijo de sitios, sin desplazamiento lateral, y todas las moléculas presentan igual entalpía y energía de activaciones (Etchegoyen et al., 2020) y (Phiri & Oh, 2024).

Tabla 1

Modelos de adsorción Freundlich y Langmuir

Modelos	Ecuación	Parámetros
Modelo de Freundlich	$q_e = K_F C_e^{\frac{1}{n}}$	q_e es la cantidad de soluto adsorbido, C_e es la concentración del soluto en equilibrio (mg/L), K_F es la constante de Freundlich, y la n es el parámetro empírico que indica la intensidad de la adsorción (Tellez, 2021).
Modelo de Langmuir	$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e}$	q_m es la capacidad máxima de adsorción (mg/g), K_L es la constante de Langmuir (L/mg), que representa la afinidad del adsorbato por el adsorbente (Etchegoyen et al., 2020).

Nota. Representa los modelos matemáticos de Freundlich y Langmuir considerados.

Fuente: Elaboración propia

2.2.12. Factores que afectan la adsorción

La eficiencia del proceso de adsorción está influenciada por diversos factores, entre los que destacan la naturaleza del adsorbente, la temperatura, la concentración del adsorbato, el pH del medio y el tiempo de contacto. Los materiales con alta área superficial y porosidad, como el carbón activado y las zeolitas, presentan mayor capacidad de adsorción. En cuanto a la temperatura, un aumento puede disminuir la fisisorción, pero favorecer la quimisorción. Una mayor concentración inicial del soluto incrementa la adsorción hasta la saturación del adsorbente. El pH afecta la carga superficial y la ionización del adsorbato, influyendo en la eficiencia del proceso, mientras que el tiempo de contacto determina el momento en que se alcanza

el equilibrio de adsorción (Tellez, 2021). El conocimiento de modelos como Freundlich y Langmuir, junto con el control de factores como temperatura, pH y tipo de adsorbente, permite optimizar su eficiencia. Además, la investigación en nuevos materiales adsorbentes y en la mejora de las condiciones operativas busca potenciar el uso de esta tecnología en el futuro (Gao et al., 2024).

2.2.13. Aplicaciones de la adsorción

La adsorción es utilizada en diversas aplicaciones, sobre todo en tecnologías para retener diferentes sustancias, entre las cuales se incluye a los metales pesados (Vásquez et al., 2021):

Eliminación de metales pesados y colorantes: El uso de adsorbentes como arcillas modificadas y biosorbentes se ha generalizado para eliminar compuestos tóxicos que derivan de efluentes industriales.

Separación de gases y su purificación: En la industria química, la adsorción tiene aplicaciones en las técnicas de captura de CO₂ y en la separación de mezclas de gases atmosféricos mediante adsorbentes selectivos.

Catálisis heterogénea: En el caso de las reacciones catalíticas, la adsorción de reactivos en la superficie del catalizador es un paso determinante a la vez que decisivo para la eficiencia de la reacción, proceso que es común en la industria farmacéutica, en cuyos procesos los adsorbentes tienen un importante lugar en la purificación de principios activos y en la formulación de fármacos con liberación controlada (Vásquez et al., 2021).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

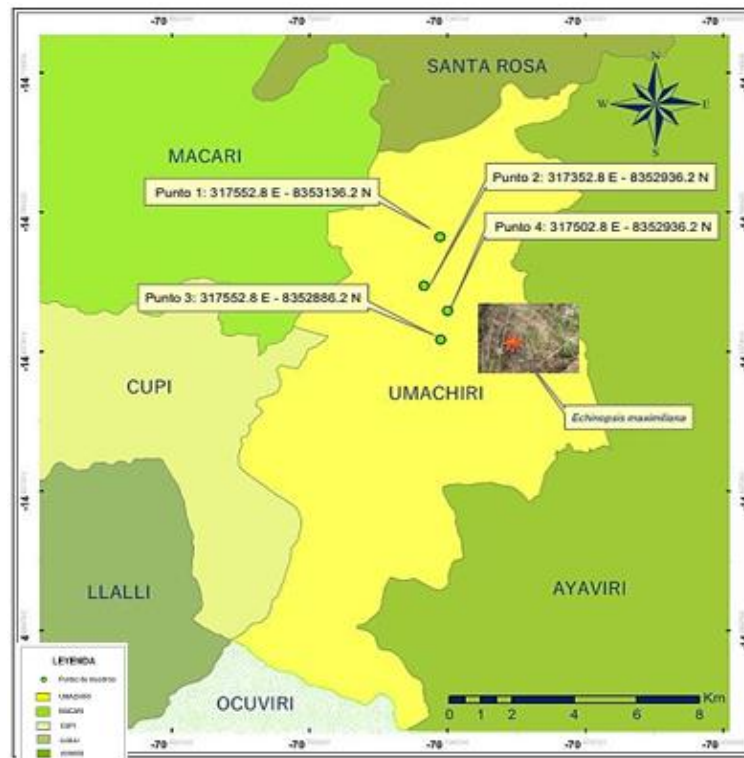
2.1. Ámbito de estudio

El presente estudio se desarrolló en los laboratorios de la Universidad Nacional de Juliaca, específicamente en la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Forestal. En este espacio se realizaron la elaboración de la biomasa de Sankayo (*Echinopsis maximiliana*), como los experimentos destinados a evaluar la eficiencia de remoción de plomo (Pb) y cadmio (Cd) en agua contaminada artificialmente a nivel de laboratorio. De la Universidad Nacional de Juliaca, ubicada en el distrito de Juliaca, provincia de San Román, región Puno, en el sur del Perú.

La materia prima, Sankayo (*Echinopsis maximiliana*), fue recolectada en el distrito de Umachiri, de la provincia de Melgar, también en el departamento de Puno. Los cuatro puntos de muestreo en coordenadas UTM fueron los siguientes: punto 1: 317552.8 E – 8353136.2 N, punto 2: 317352.8 E – 8352936.2 N, punto 3: 317552.8 E – 8352886.2 N, y punto 4: 317502.8 E – 8352936.2 N.

Figura 2

Lugar de ubicación de la recolección de plantas de sankayo (Echinopsis maximiliana).



Nota. Mapa de ubicación del lugar de obtención del sankayo (*Echinopsis maximiliana*). Fuente: Elaboración propia

2.2. Tipo de investigación

La presente investigación es diseño experimental unifactorial, dado que se manipula deliberadamente la variable independiente la cantidad de biomasa para evaluar su efecto sobre el porcentaje de remoción de Pb y Cd (Marhasova et al., 2022), de nivel explicativo de la investigación radica en que busca identificar y analizar la influencia de la biomasa de Sankayo (*Echinopsis maximiliana*) en la remoción de los metales pesados plomo (Pb) y cadmio (Cd) en un medio acuoso artificial. Este tipo de estudios tiene como propósito establecer relaciones de causa y efecto entre variables, permitiendo comprender los mecanismos mediante los cuales ocurre un fenómeno (Hernández - Sampieri et al., 2014), En esta investigación, el trabajo se desarrolló bajo condiciones controladas en los laboratorios de la Universidad Nacional de Juliaca. Asimismo, es de corte transversal, ya que los datos se recolectaron en un solo momento y el muestreo fue no probabilístico por conveniencia (Ahmed, 2022).

2.2.1. Variables dependientes e independientes del objetivo general

O.G. Evaluar la eficiencia de la biomasa del Sankayo (*Echinopsis maximiliana*) en la remoción de plomo (Pb) y cadmio (Cd).

V.D. Eficiencia de remoción de plomo (Pb) y cadmio (Cd).

V.I. Biomasa de Sankayo (*Echinopsis maximiliana*).

2.2.2. Variables dependientes e independientes de los objetivos específicos

O.1. Caracterizar las propiedades fisicoquímicas de la biomasa del sankayo (*Echinopsis maximiliana*).

V.I. Biomasa de sankayo (*Echinopsis maximiliana*).

V.D. Propiedades fisicoquímicas de la biomasa del sankayo (*Echinopsis maximiliana*).

O.2. Evaluar la eficiencia de remoción de plomo (Pb) con biomasa de Sankayo (*Echinopsis maximiliana*) con variación independiente del pH, la concentración inicial y el tiempo de contacto.

V.I. Condiciones del proceso de biosorción (pH, concentración inicial de plomo, y tiempo de contacto).

V.D. Eficiencia de remoción de plomo (Pb).

O.3. Evaluar la eficiencia de remoción de cadmio (Cd) con biomasa de Sankayo (*Echinopsis maximiliana*) con variación independiente del pH, la concentración inicial y el tiempo de contacto.

V.I. Condiciones del proceso de biosorción (pH, concentración inicial de plomo, y tiempo de contacto).

V.D. Eficiencia de remoción de cadmio (Cd).

2.3. Población y/o muestra

La población estuvo constituida por la especie cactácea sankayo (*Echinopsis maximiliana*), y la muestra correspondió a la cantidad de biomasa de dicha especie preparada en el laboratorio de Ingeniería Ambiental y Forestal de la Universidad Nacional de Juliaca.

2.4. Descripción de métodos

a. Materiales e insumos

Biomasa de sankayo (*Echinopsis maximiliana*), recipientes, fiolas (500 mL, 250 mL, 100 mL, 50 mL), matraces erlenmeyer (250 mL), vasos precipitados (100 mL, 250 mL), varillas, goteros, puntas de micropipetas, picetas, pipetas, filtros Whatman (N°4), materiales de escritorio.

b. Equipos

Molino de Cuchillas, Tamizador (WS TYLER RX-29-16), Estufa (ECOCELL 111 ECO line), Mufla (DAIHAN FHX-12), Balanza Analítica (OHAUS -PIONEER PX224), Espectroscopía Infrarroja (FT-IR/NIR), Micrografía SEM/ ADX (SU 8230Evo15), Espectrofotómetro de absorción atómica (Analytik Jena GmbH - novAA 400 P), Turbidímetro (LOVIBOND Wáter Testing), pHmetro (HANNA - edge), Agitador Orbital (LABNET), Sistema de agua ultrapura (Evoqua LaboStar).

c. Reactivos

Agua destilada, agua ultrapura, solución estándar de plomo (500 mg/L), solución estándar de cadmio (500 mg/L), ácido nítrico (HNO₃), hidróxido de sodio (NaOH 0.1N).

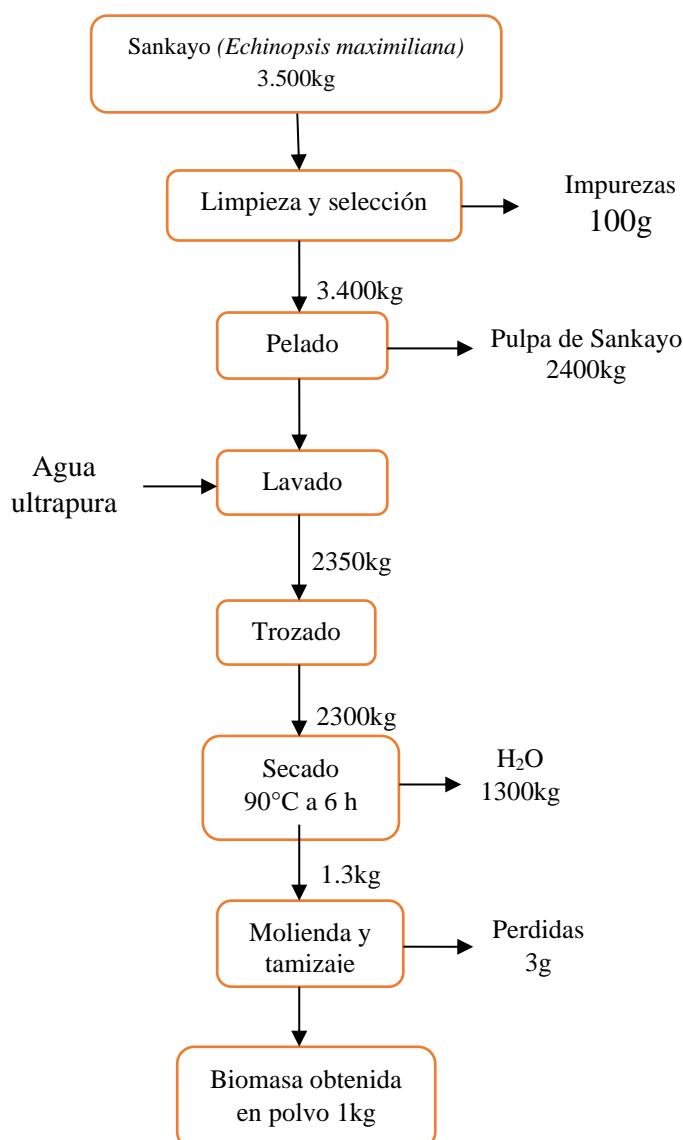
2.4.1. Caracterización de las propiedades fisicoquímicas de la biomasa.

a. Obtención de biomasa de sankayo (*Echinopsis maximiliana*)

Para obtener la biomasa se realizaron en la zona rural del distrito de Umachiri, de la provincia de Melgar, del departamento de Puno. Posteriormente a la recolección de Sankayo (*Echinopsis maximiliana*) se siguieron los siguientes pasos:

Figura 3

Diagrama del proceso de obtención de biomasa de sankayo (*Echinopsis maximiliana*)



Nota. Representa el proceso de obtención de la biomasa de sankayo (*Echinopsis maximiliana*), tomado de *Uso de cáscaras de Colocasia esculenta para la biosorción de plomo en aguas subterráneas del Distrito de Mórrope*. Por García, (2020). Universidad César Vallejo.

b. Parámetros básicos de sankayo (*Echinopsis maximiliana*)

- Contenido de humedad: Se tomó una muestra de 10 g y se pesó junto con un recipiente tarado para obtener el peso húmedo (FAO, 1990). Luego, se secó la muestra en horno a $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta que el peso sea constante, luego se enfrió la muestra en un desecador y se volvió a pesar para obtener el peso seco (Garcia, 2020). El contenido de humedad se calcula con la fórmula:

$$H(\%): \frac{(P_{mh} - P_{ms})}{P_{mh}} * 100 \quad (1)$$

Donde P_{mh} es el peso de la muestra húmeda y P_{ms} es el peso de la muestra seca.

- Contenido de cenizas: De una muestra seca se pesó una cantidad conocida 5 g en un crisol previamente tarado, posteriormente, el crisol se colocó en una mufla y se incineró a una temperatura de $575\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante un periodo de 4 a 6 horas, evidenciada por la obtención de cenizas de color gris claro (FAO, 1990). Después del enfriamiento en desecador, se pesa nuevamente el crisol con las cenizas. El contenido de cenizas se calcula con la fórmula:

$$\text{Cenizas } (\%) = \frac{P_c - P_t}{P_m} * 100 \quad (2)$$

Donde P_c es el peso del crisol con las cenizas, P_t es el peso del crisol vacío, y P_m es el peso de la muestra seca antes de la incineración.

- Análisis elemental: El análisis morfológico y la determinación de la composición elemental del biosorbente se llevaron a cabo en un microscopio electrónico de barrido, que tiene acoplado el sistema de dispersión de energía de rayos X (ETD/EDX-Ultra Dry) (Lavado et al., 2020). Realizadas en el Centro de Microscopía Electrónica de la Universidad Nacional San Agustín de Arequipa.
- Composición química: Se determinaron en el Laboratorio de Medio Ambiente, Investigación y Servicios, los grupos funcionales que se encuentran presentes en el biosorbente sankayo (*Echinopsis maximiliana*), fueron analizadas con espectroscopía infrarroja, con transformadas de Fourier (FTIR), dichos grupos desempeñan un rol importante en la remoción de muchos contaminantes orgánicos e inorgánicos (Lavado et al., 2020). Según Barbera et al., (2023) los grupos funcionales hidroxilo y carbonilo confieren al biosorbente propiedades hidrofílicas, porque incrementan la interacción específica ion-dipolo y dipolo-dipolo

2.4.2. Eficiencia de la remoción de plomos (Pb) con biomasa de sankayo (*Echinopsis maximiliana*), con variación independiente del pH, la concentración inicial y el tiempo de contacto.

a. Preparación de soluciones para plomo (Pb)

La solución de plomo (Pb) fueron preparadas a partir de la solución madre de Plomo 1000 mg/L Pb (NO₃)₂ de grado analítico, para ser utilizado en procesos de absorción atómica (Garcia, 2020).

Preparación del agua sintética: Se diluyeron las soluciones estándar de plomo (Standard for Atomic Absortion) de grado analítico con agua ultrapura, hasta llegar a concentraciones de 5 mg/L, 10 mg/L, 50 mg/L, 25 mg/L, 50 mg/L, 100 mg/L, y 250 mg/L, para un volumen de 500 mL de cada solución de Pb (Cabrera, 2018). Para determinar las concentraciones iniciales (*C_i*) de plomo en el agua se utilizó la siguiente ecuación:

$$C_1 \times V_1 = C_2 \times V_2$$

(3)

Donde:

C₁: concentración de la disolución.

V₁: volumen de la alícuota por tomar de la disolución.

C₂: concentración de la disolución diluida.

V₂: volumen de la disolución diluida.

b. Determinación del pH óptimo para la adsorción

En vasos precipitados de 250 mL Se colocaron 50 mL de una solución de 10 mg/L de plomo, se ajustó el pH de las soluciones a valores entre 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 6.5, 7, y 7.5, usando HNO₃ 0.1N y NaOH 0.1N. A cada vaso se añadió de 0.25 g de biomasa constante de sankayo (*Echinopsis maximiliana*) y las mezclas fueron agitadas a 150 rpm durante un tiempo de contacto constante de 60 min. Luego se filtraron con papel Whatman N°4. Luego se almacenaron hasta su análisis por espectrofotometría de absorción atómica. Los ensayos fueron realizados por triplicado (Rodriguez 2021).

c. Determinación de biomasa óptimo para la adsorción de plomo (Pb)

En esta etapa se aplicó el pH optimo ya determinado se colocaron solución de plomo de 50 mL con concentraciones de 5, 10, 50 y 100 mg/L en vasos precipitados de 250

mL, agregando a cada una diferentes cantidades de biomasa de sankayo: 0.05, 0.1, 0.25, 0.50 y 1.0 g. El pH óptimo constante se ajustó utilizando soluciones de HNO₃ 0.1N y NaOH 0.1N, manteniendo la mezcla en agitación a 150 rpm durante 60 min de tiempo de contacto constante. Finalizado el ensayo, se filtró con papel Whatman N°4. Luego se almacenaron hasta su análisis por espectrofotometría de absorción atómica. Los ensayos fueron realizados por triplicado (Cabrera, 2018).

d. Determinación de la concentración inicial de plomo (Pb)

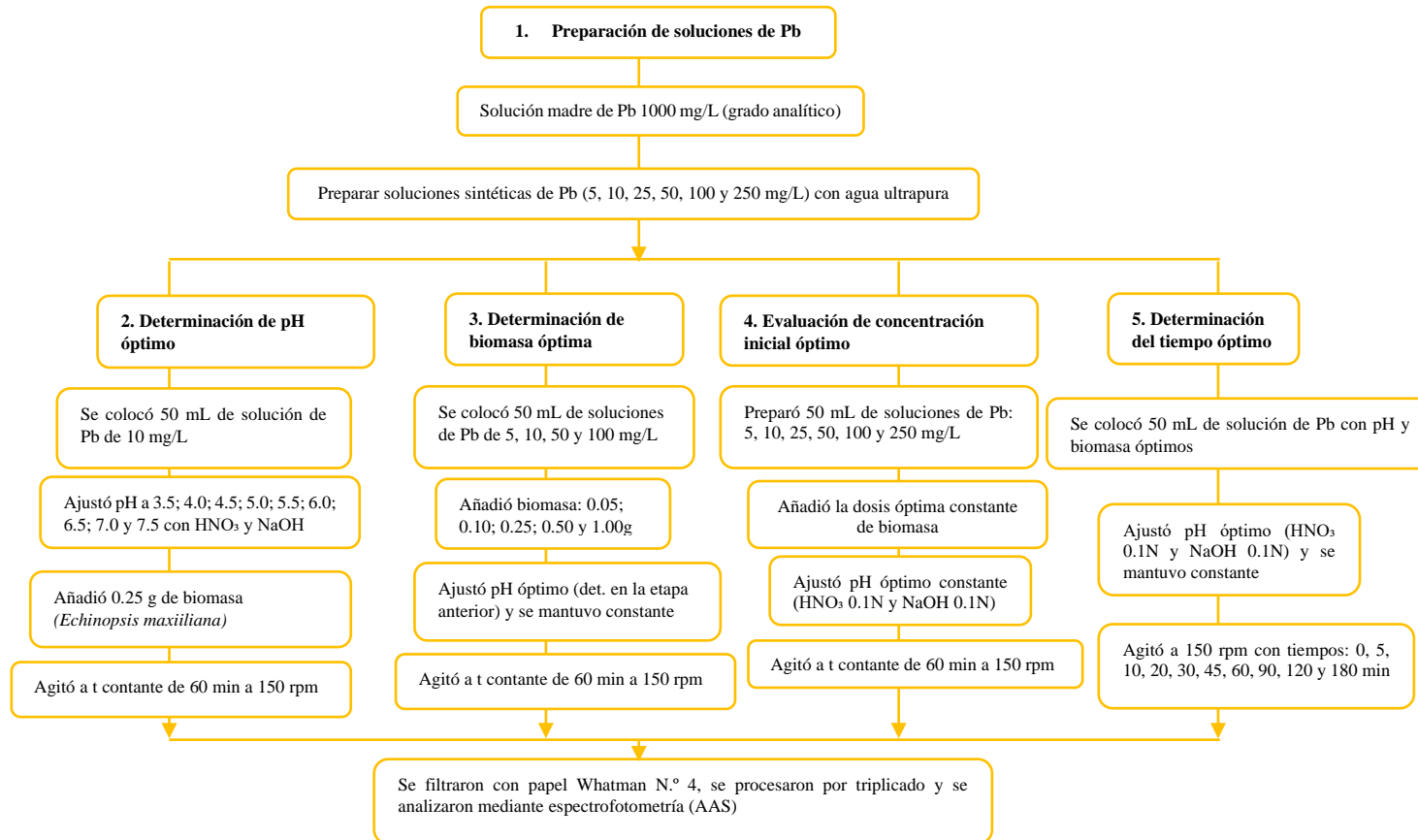
En vasos precipitados de 250mL, se adicionaron 50 mL de una solución de Pb con concentraciones de 5, 10, 25, 50, 100, 250mg/L, ajustando la cantidad de biomasa a la dosis óptima previamente determinada. El pH óptimo se mantuvo constante y se ajustó utilizando soluciones HNO₃ 0.1N y NaOH 0.1N, y la mezcla fue agitada a 150 rpm durante 60 min de tiempo de contacto constante. Finalizado el proceso, se filtró utilizando papel filtro Whatman N°4 (Gao et al., 2024), se reservaron en fiolas para determinar la concentración de Pb. Además, cada ensayo de adsorción se realizó por triplicado. Las muestras fueron almacenadas a 5 °C hasta su lectura final mediante espectrofotometría de absorción atómica (Chan-Keb et al., 2021).

e. Determinar el tiempo óptimo de contacto para la adsorción de plomo (Pb)

En vasos precipitados con capacidad de 250 mL, se colocaron 50 mL de solución de Pb, ajustando previamente la cantidad óptima de biomasa. El pH se mantuvo constante y se ajustó al valor óptimo con soluciones HNO₃ 0.1N y NaOH 0.1N. La mezcla se mantuvo en agitación constante a 150 rpm, y el sistema fue sometido a diferentes tiempos de contacto: 0, 5, 10, 20, 30, 45, 60, 90, 120, y 180 min. Al finalizar cada ensayo, se realizó la filtración con papel filtro Whatman N°4. Los ensayos fueron realizados por triplicado y almacenadas para su análisis mediante espectrofotometría de absorción atómica.

Figura 4

Diagrama del proceso de remoción de plomo (Pb) con biomasa de sankayo (Echinopsis maximiliana)



Nota. Proceso de remoción y preparación de la solución de plomo (Pb). *Uso de cáscaras de Colocasia esculenta para la biosorción de plomo en aguas subterráneas del Distrito de Mórrope.* Por Garcia, (2020). Universidad César Vallejo.

2.4.3. Eficiencia de remoción de cadmio (Cd) con la biomasa de sankayo (*Echinopsis maximiliana*), con variación independiente del pH, la concentración inicial y el tiempo de contacto.

a. Preparación de soluciones para cadmio (Cd)

La solución de cadmio (Cd) fueron preparadas a partir de la solución madre de cadmio (Standard for Atomic Absorption) de 1000 mg/L de grado analítico, certificado para ser utilizado en procesos de absorción atómica (Garcia, 2020). Preparación del agua sintética: Se diluyeron las soluciones estándar de plomo de grado analítico con agua ultrapura, hasta llegar a concentraciones de 5 mg/L, 10 mg/L, 50 mg/L, 25 mg/L, 50 mg/L, 100 mg/L, y 250 mg/L, para un volumen de 500 ml de cada solución de Cd (Cabrera, 2018). Para determinar las concentraciones iniciales (C_i) de plomo en el agua se utilizó la misma ecuación N° (1).

b. Determinación del pH óptimo para la adsorción

Se colocaron 50 mL de una solución de 10 mg/L de plomo en vasos precipitados de 250 mL. Se ajustó el pH de las soluciones a valores entre 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 6.5, 7, y 7.5, usando HNO_3 0.1N y NaOH 0.1N. A cada vaso se añadió 0.25 g de biomasa constante de sankayo (*Echinopsis maximiliana*), y las mezclas fueron agitadas a 150 rpm durante un tiempo de contacto constante de 60 min. Luego se filtraron con papel Whatman N°4. Luego se almacenaron hasta su análisis por espectrofotometría de absorción atómica. Los ensayos fueron realizados por triplicado (Rodríguez, 2021).

c. Determinación de la cantidad de biomasa óptimo para la adsorción de cadmio (Cd)

En vasos precipitados de 250 mL se colocaron solución de plomo de 50 mL con concentraciones de 5, 10, 50 y 100 mg/L en, agregando a cada una diferentes cantidades de biomasa de Sankayo: 0.05, 0.1, 0.25, 0.50 y 1.0 g. El pH óptimo se ajustó utilizando soluciones de HNO_3 0.1N y NaOH 0.1N, manteniendo la mezcla en agitación a 150 rpm durante 60 min de tiempo de contacto constante. Finalizado el ensayo, se filtró con papel Whatman N°4. Luego se almacenaron hasta su análisis por espectrofotometría de absorción atómica. Los ensayos fueron realizados por triplicado (Cabrera, 2018).

d. Determinación de la concentración inicial de cadmio (Cd)

En vasos precipitados de 250mL, se adicionaron 50 mL de una solución de Cd con concentraciones de 5, 10, 25, 50, 100, 250mg/L ajustando la cantidad de biomasa a la dosis óptima previamente determinada. El pH óptimo se mantuvo constante y se ajustó utilizando soluciones de ácido nítrico (HNO₃ 0.1N) e hidróxido de sodio (NaOH 0.1N), y la mezcla fue agitada a 150 rpm durante 60 min de tiempo de contacto constante. Finalizado el proceso, se filtró utilizando papel filtro Whatman N°4 (Gao et al., 2024). Del filtrado final, se reservaron en fioles para determinar la concentración de Pb. Además, cada ensayo de adsorción se realizó por triplicado. Las muestras fueron almacenadas a 5 °C hasta su lectura final mediante espectrofotometría de absorción atómica (Chan-Keb et al., 2021).

e. Determinar el tiempo óptimo de contacto para la adsorción de cadmio (Cd)

Según Cabrera, (2018), se colocaron 50 mL de solución de Pb en vasos de precipitado con capacidad de 250 mL, ajustando previamente la cantidad óptima de biomasa considerada constante. El pH se mantuvo contante y la mezcla se ajustó al valor óptimo utilizando soluciones de HNO₃ 0.1N y NaOH 0.1N. La mezcla se mantuvo en agitación constante a 150 rpm, y el sistema fue sometido a diferentes tiempos de contacto: 0, 5, 10, 20, 30, 45, 60, 90, 120, y 180 min. Al finalizar cada ensayo, se realizó la filtración con papel filtro Whatman N°4. Los ensayos fueron realizados por triplicado y almacenadas para su análisis mediante espectrofotometría de absorción atómica.

2.5. Recolección de datos

Los datos se recolectaron mediante la observación directa, puesto que básicamente los análisis se realizaron con la utilización de equipos, tales como balanzas, probetas, espectrofotómetro de absorción atómica entre otros, el termino de error viene especificado por cada fabricante del equipo (Muñoz, 2021). Se utilizó una ficha de registro para la anotación de los valores de las lecturas de los equipos de laboratorio.

2.6. Procesamientos de Datos

Adicionalmente se calculó la eficiencia de remoción del metal plomo y cadmio, como medida para evaluar la eficacia del proceso de absorción, este % indica qué proporción del contaminante ha sido eliminada o disminuida después de pasar por un tratamiento

o proceso de remoción (Carvajal & Marulanda, 2020). Eficiencia de remoción (%) fue calculado mediante la siguiente fórmula (Gonzaga et al., 2021):

$$\text{Eficiencia de remoción (\%)} = \frac{[C_i - C_f]}{C_i} \times 100 \quad (4)$$

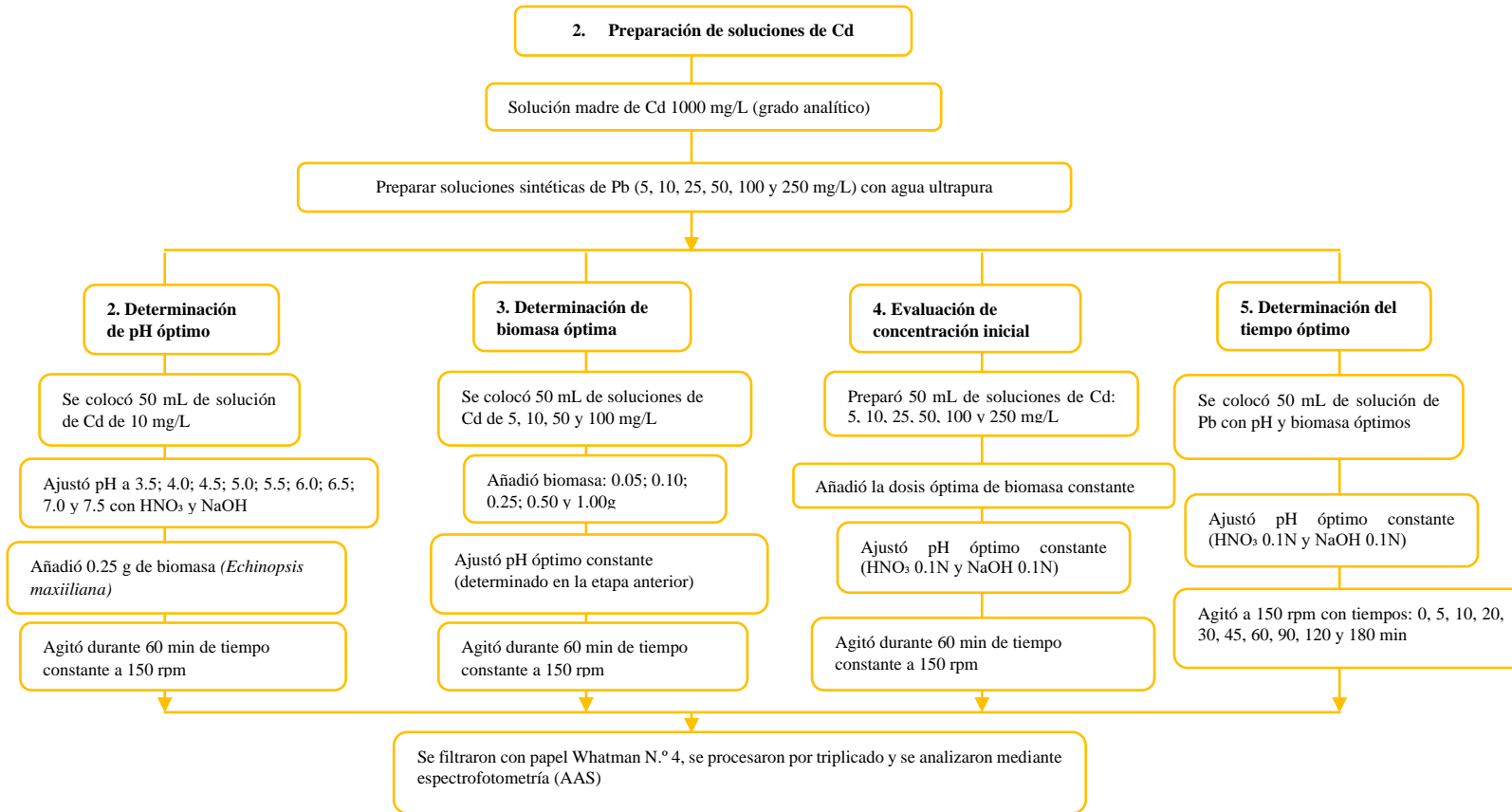
Donde: C_i es la concentración inicial de (Pb y Cd) antes de aplicar el tratamiento y C_f es la concentración final del contaminante después de aplicar el tratamiento.

2.7. Análisis estadístico

Se empleó estadística descriptiva para la recolección, organización y síntesis de los datos experimentales, utilizando medidas de tendencia central y de dispersión para describir el comportamiento de las variables estudiadas. Posteriormente, en la fase inferencial, se aplicó el análisis de varianza (ANOVA) con la finalidad de identificar diferencias significativas entre los tratamientos evaluados; cuando estas diferencias fueron detectadas, se utilizó la prueba de rango múltiple de Tukey para establecer la formación de grupos homogéneos y determinar comparaciones significativas entre ellos. Todos los análisis se realizaron con un nivel de confianza del 95 % ($\alpha = 0,05$). Adicionalmente, para describir y analizar el proceso de adsorción, los datos experimentales se ajustaron a modelos matemáticos de isothermas de adsorción, específicamente a los modelos de Langmuir y Freundlich, con el propósito de evaluar la capacidad de adsorción, la afinidad del adsorbente por los metales, el grado de ajuste de los modelos se evaluó mediante el coeficiente de determinación R^2 (Muñoz, 2021).

Figura 5

Diagrama del proceso de remoción de cadmio (Cd) con biomasa de sankayo (Echinopsis maximiliana)



Nota. Proceso de remoción y preparación de la solución de cadmio (Cd), tomado de *Uso de cáscaras de Colocasia esculenta para la biosorción de plomo en aguas subterráneas del Distrito de Mórrope*. Por Garcia, (2020). Universidad César Vallejo.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.8. Propiedades fisicoquímicas de la biomasa del sankayo (*Echinopsis maximiliana*)

Tabla 2

Contenido de humedad y cenizas en biomasa del sankayo (Echinopsis maximiliana)

Muestra N°	Humedad (%)	Cenizas (%)
1	91.24	1.52
2	93.02	1.61
3	91.37	1.33
Promedio	91.88	1.49

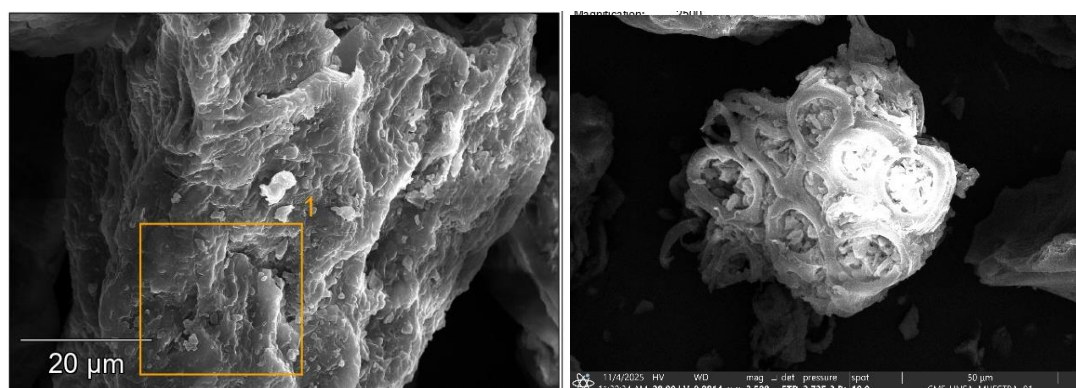
Nota. Promedio de humedad y cenizas de la biomasa de sankayo (*Echinopsis maximiliana*), Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 2 se muestran los resultados del análisis físico de la biomasa de sankayo (*Echinopsis maximiliana*), indican que la humedad promedio fue de 91.88%, mientras que las cenizas representaron el 1.49%.

En cuanto a la composición química de *Echinopsis maximiliana* (sank'ayu) se ha descrito la composición para la pulpa humedad 95.7% y Cenizas 0.38% (Chambi,2028), según (Pari & Taype, 2020), dado que se trata de una especie perteneciente a la familia de las cactáceas, caracterizada por su elevada capacidad de almacenamiento de agua en sus tejidos, el valor obtenido resulta coherente con lo reportado para este grupo vegetal, en el cual el contenido de humedad puede oscilar aproximadamente entre el 74 % y el 94 % del peso total. Esta notable capacidad de retención hídrica constituye una adaptación fisiológica clave al ambiente árido del altiplano, permitiendo a la especie funcionar como un reservorio natural de agua y asegurar su supervivencia durante prolongados periodos de sequía (Acuña, 2020). Asimismo, estudios realizados en el mucílago de *Opuntia* spp. reportan contenidos de humedad comprendidos entre 75,50 % y hasta 100 %, lo que refuerza la similitud estructural y funcional entre estas cactáceas y respalda su elevada afinidad por el agua, atribuida a la presencia de polisacáridos hidrofílicos y tejidos parenquimatosos especializados(Trachtenberg & Mayer, 1981).

Figura 6

Microscopio Electrónico de Barrido ETD de sankayo (Echinopsis maximiliana) antes de tratamiento.

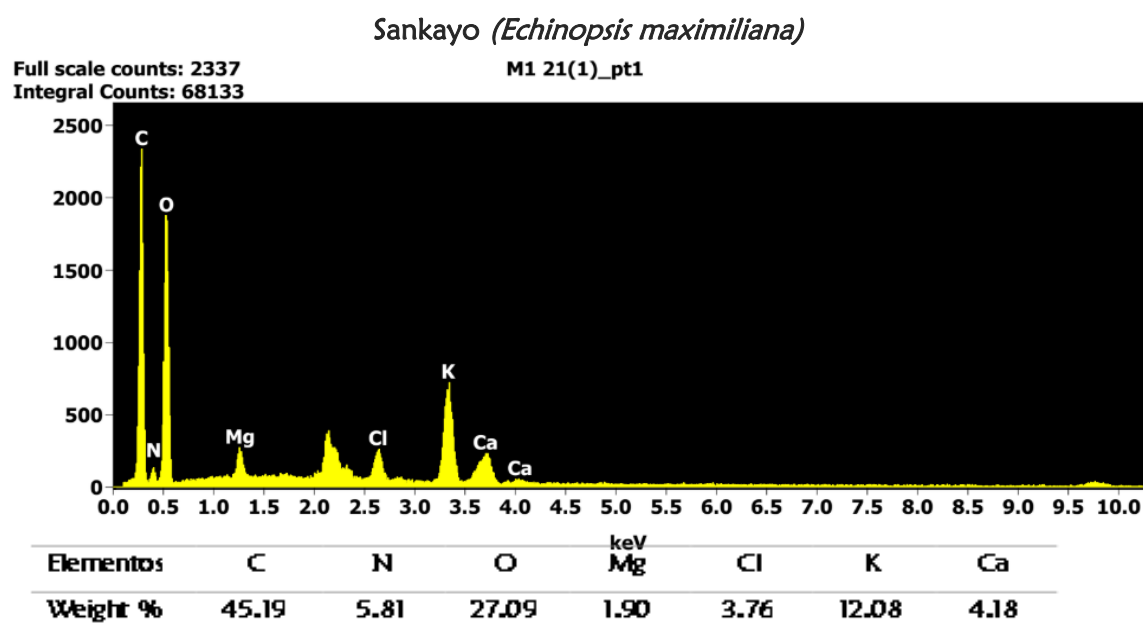


Nota. Imagen de la biomasa se sankayo (*Echinopsis maximiliana*) analizado por el equipo Microscopio Electrónico de Barrido ETD

El análisis DS-Ultra Dry / EDT presentado en la Figura 6, realizado en la Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, reveló que la biomasa posee una morfología superficial irregular, porosa y láminas agrupadas que generan cavidades heterogéneas. Estas características estructurales evidencian una superficie altamente porosa, capaz de facilitar la retención de iones metálicos como Pb^{2+} y Cd^{2+} , mediante interacciones electrostáticas y fuerzas de Van der Waals, lo que sugiere un potencial significativo para su uso como biosorbente en procesos de remoción de metales pesados.

Figura 7

Microscopio Electrónico de Barrido EDS-Ultra Dry de sankayo (Echinopsis maximiliana) antes de tratamiento



Nota. Presencia del nivel de porcentaje de elementos encontrados en la biomasa de sankayo (*Echinopsis maximiliana*) analizadas por EDS-Ultra Dry.

En cuanto a la composición elemental en la Figura 7, el análisis EDS-Ultra Dry. mostró la presencia de carbono 45.19%, nitrógeno 5.81%, oxígeno 27.09%, magnesio 1.09%, cloro 3.76% y potasio 12.05%. Estos valores coinciden parcialmente con los reportados por Lavado et al., (2020), aunque se observa una mayor proporción de carbono y potasio, lo que podría atribuirse a las diferencias en las condiciones de secado y preparación de la biomasa. La alta presencia de carbono y oxígeno sugiere una abundancia de grupos funcionales como hidroxilos, carboxilos y carbonilos, los cuales son responsables de los procesos de adsorción de metales pesados. En conjunto, la morfología porosa y la composición elemental observadas respaldan el potencial de la biomasa de cáscara de tuna como un biosorbente eficiente para la remoción de Pb^{2+} y Cd^{2+} en soluciones acuosas

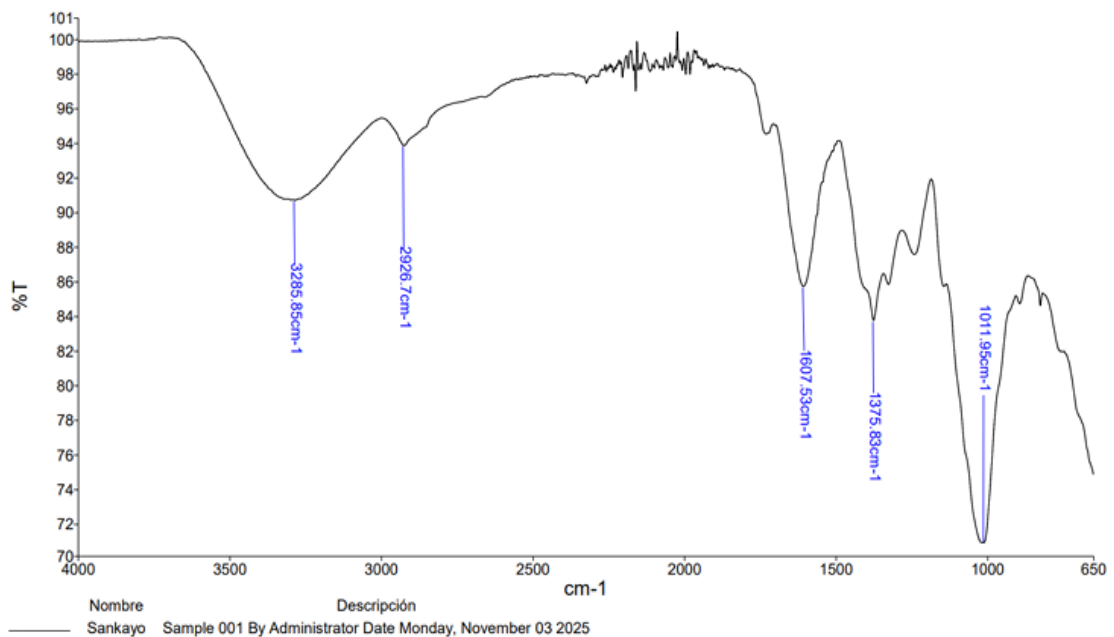
De manera similar, en la investigación el estudio, Lavado et al. (2020) mencionan que la biomasa de cáscara de tuna (*Opuntia ficus-indica*, BCT) presenta una morfología superficial caracterizada por una composición elemental constituida por 31.71% de carbono, 49.39% de oxígeno, 5.09% de calcio, 7.30% de potasio y 1.34% de magnesio.

Además, estos autores describen una superficie con porosidad adecuada para los procesos de biosorción, con una morfología irregular y agrupaciones de láminas que generan cavidades de tamaño heterogéneo, lo cual favorece la retención de iones metálicos, especialmente. Así como también Kumar et al., (2024), señala que el valor del análisis elemental, son comparables con la composición general de otros vegetales, puesto que en las mismas el carbono constituye aproximadamente el 45% de su composición, mientras que el oxígeno el 42%, el hidrógeno el 6.50% y el nitrógeno el 1.50% de la materia seca. Según Pari & Taype, (2020), además, se debe señalar que la ligera variación en el contenido de hidrógeno podría estar relacionada con adaptaciones específicas del sankayo a su entorno ambiental, como suelo, aire y agua.

En el proceso de adsorción de plomo (Pb^{2+}) y cadmio (Cd^{2+}), los elementos carbono, hidrógeno y oxígeno presentes en la biomasa desempeñan funciones complementarias que facilitan la retención de estos iones metálicos. El carbono constituye la estructura base de los compuestos orgánicos principales, como la lignina y la celulosa, proporcionando una matriz porosa y estable que favorece la adsorción física mediante interacciones de Van der Waals (García, 2021). También Volpe et al., (2025), mencionan que la adsorción química es facilitada principalmente por la presencia de grupos carboxilo (-COOH) e hidroxilo (-OH), los cuales participan activamente en la formación de enlaces de coordinación con los iones metálicos. Estos grupos funcionales se originan a partir de los elementos carbono, oxígeno e hidrógeno presentes en la biomasa, coincidiendo con la composición elemental reportada en este estudio. Dichas funcionalidades incrementan la densidad de sitios activos en la superficie del material, promoviendo interacciones específicas con los iones Pb^{2+} y Cd^{2+} . De esta manera, la biomasa de cáscara de tuna demuestra un alto potencial para la adsorción química, complementando el proceso de adsorción física atribuido a su estructura porosa y heterogénea.

Figura 8

Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier FTIR de la biomasa de sankayo (Echinopsis maximiliana)



Nota. Vibración atómica de los grupos funcionales analizadas por el equipo FTIR

Así mismo en la Figura 8 representan los resultados del espectro FTIR de la biomasa de sankayo (*Echinopsis maximiliana*) sin activación química muestra bandas características en 3285 cm^{-1} , atribuida al estiramiento de los grupos hidroxilo O–H presentes en alcoholes, fenoles y grupos carboxílicos; en 2926 cm^{-1} , correspondiente a las vibraciones C–H de cadenas alifáticas; en 1375 cm^{-1} y 1607 cm^{-1} , asociadas a grupos carbonilo (C=O) de ésteres y carboxilatos y a enlaces C=C de estructuras aromáticas propias de la lignina; y en 1011 cm^{-1} , relacionada con las vibraciones C–O–C, de polisacáridos como la celulosa y hemicelulosa.

En espectros FTIR, las bandas de absorción de la región de grupos funcionales se distribuyen según el tipo de vibración atómica, entre 4000 y 2500 cm^{-1} se observan principalmente estiramientos de enlaces con hidrógeno como O–H y N–H (≈ 3700 – 3000 cm^{-1}) y estiramientos C–H (≈ 3300 – 2800 cm^{-1}) asociados a enlaces alifáticos y aromáticos. Entre 2500 y 2000 cm^{-1} pueden aparecer absorciones por enlaces triples como C≡C y C≡N, aunque suelen ser débiles. En la zona de 2000 – 1500 cm^{-1} predomina el estiramiento de dobles enlaces, destacando el carbonilo (C=O). Por debajo de 1500 cm^{-1} , se encuentran vibraciones de estiramiento C–O y C–C, típicas de polisacáridos y estructuras moleculares compleja (LibreTexts, 2022).

Por su parte, el oxígeno y el hidrógeno se asocian con grupos funcionales como hidroxilos (-OH), carbonilos (C=O) y carboxilos (-COOH), los cuales actúan como sitios activos capaces de establecer enlaces iónicos o de coordinación con los metales pesados. De acuerdo con lo señalado por Tejada-Tovar et al. (2019), Nouri et al. (2021) y Barbera et al. (2023), la combinación de características estructurales y grupos funcionales activos contribuye de forma decisiva al mecanismo global de biosorción, donde la interacción fisicoquímica entre la superficie de la biomasa y los iones metálicos determina la eficiencia de remoción (Tejada et al., 2021), (Nouri et al., 2021).

Así como también Barbera et al., (2023) caracterizaron el *Opuntia ficus indica* (OFI) mediante FT-IR, donde confirman que los grupos funcionales están involucrados en la interacción entre la biomasa y los diferentes metales pesados, estudiados, donde se muestra la banda de absorción este espectro muestra varios picos de absorción que indican la naturaleza compleja de la biomasa analizada. menciona que los desplazamientos de los grupos funcionales de *Opuntia ficus indica* fueron evidentes y, en particular, se observaron variaciones relativas en la intensidad de la banda en el rango de 1720–1530 cm^{-1} , atribuida a los grupos C=O carboxílicos y amídicos, así como a los grupos NH amídicos, lo que sugiere la formación de complejos. El tipo de coordinación de los grupos carboxilato a los metales se ha deducido frecuentemente a partir del desplazamiento de frecuencia, cuales interactuar con los iones de plomo. Lavado et al. (2020) los análisis mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) confirmaron que la biomasa de cladodios de tuna (*Opuntia ficus indica*) (BCT) posee grupos funcionales amino, hidroxilo y carboxilo en su superficie, los cuales participan en la formación de complejos con los iones Pb (II). Tejada et al., (2021), confirman mediante el análisis FTIR la presencia de grupos funcionales clave para la biosorción. El pico cercano a 3438 cm^{-1} evidencia grupos hidroxilo –OH propios de la matriz lignocelulósica, mientras que la banda en 1735 cm^{-1} corresponde a grupos carboxilo C=O, ambos esenciales para la interacción con Pb (II). Asimismo, los picos en 1407 cm^{-1} C–H y en 1359–1056 cm^{-1} C–O, asociados a componentes lignocelulósicos que actúan como sitios activos, refuerzan la presencia de estructuras orgánicas capaces de participar en la captación de iones metálicos.

2.9. Eficiencia de remoción de plomo (Pb) con biomasa de sankayo (*Echinopsis maximiliana*), con variación independiente del pH, la concentración inicial y el tiempo.

2.9.1. Eficiencia de remoción de plomo (Pb) con biomasa de sankayo (*Echinopsis maximiliana*) con variación del pH.

Tabla 3

*Determinación del pH óptimo para la biosorción de plomo mediante biomasa del Sankayo (*Echinopsis maximiliana*)*

Prueba N°	Biomasa (g)	Concentración inicial de Pb (mg/L)	pH	Concentración final (mg/L)	Eficiencia de Remoción de Pb (%)
1	0.25	10.32	3.5	0.4143	97.74*
2	0.25	10.32	4	0.3532	98.07
3	0.25	10.32	4.5	0.2509	98.63
4	0.25	10.32	5	0.3038	98.34
5	0.25	10.32	5.5	0.0201	99.89 **
6	0.25	10.32	6	0.2626	98.57
7	0.25	10.32	6.5	0.2938	98.40
8	0.25	10.32	7	0.3056	98.33
9	0.25	10.32	7.5	0.1685	99.08

Nota. *: valor mínimo obtenido, **: valor máximo obtenido. Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 3 se presentan los resultados de la determinación del pH óptimo para la biosorción de plomo (Pb), a un tiempo constante de 60 min y concentración inicial constante de 10.32 mg/L. El rango evaluado fue de 3.5 a 7.5 unidades, obteniéndose la mayor remoción a un pH de 5.5, con un 99.89% de eficiencia. En cambio, la menor remoción se registró a pH 3.5, alcanzando un 97.74% de remoción, la biomasa, la concentración inicial y el tiempo de contacto se mantuvieron constantes.

Según Barbera et al., (2023) la *Opuntia ficus-indica* (OFI) sin tratamiento previo presenta una alta capacidad de adsorción a pH 5, donde 0.5 g de biomasa son capaces de adsorber 114 mg/g de Pb. Estos valores resultan comparables e incluso superiores a los obtenidos con materiales adsorbentes modificados. Asimismo, la OFI puede considerarse un adsorbente de bajo costo, ya que no requiere tratamientos químicos o físicos para mejorar su rendimiento. En concordancia, Nouri et al., (2021). reportan que el cladodio de cactus tunecino seco, también sin pretratamiento y evaluado en un rango de pH de 2.0 a 10, alcanza una capacidad máxima de biosorción de aproximadamente 166 mg/g para Pb(II), superando a numerosos biosorbentes tratados.

Las diferencias en el pH óptimo en comparación con el valor de 5.5 unidades encontrado, se atribuye a variaciones en la preparación de la biomasa, las condiciones experimentales o la concentración inicial de plomo en las soluciones tratadas. Así también según Lavado et al., (2020), señala un valor de pH óptimo para cladodios de tuna (*Opuntia ficus indica*) para remover plomo (Pb II) en valor de 4.5 unidades cercano al reportado en el presente, alcanzando una capacidad máxima de adsorción de 50.25 mg/g, por tanto, una vez más, se resalta que los pH ácidos favorecen este proceso como ha sido demostrado también en el presente estudio. Así mismo, otras investigaciones, reportan que en su trabajo de investigación la más eficiente fue las cáscaras de pitahaya (DFP), para remover plomo (Pb²⁺) y cadmio (Cd²⁺) de aguas residuales. Bajo condiciones óptimas (0.25 g de adsorbente, pH 4, 180 min de contacto y 100 mg/L de concentración inicial), se alcanzaron porcentajes de remoción de hasta 97.87 % para Pb²⁺ y 97.10 % para Cd²⁺, siendo la cáscara de pitahaya familia de las cactáceas (Wattanakornsiri et al., 2022), se menciona que los valores de pH ácidos son los que permiten un proceso de adsorción más efectivo en diferentes tipos de biomasa, incluido la del presente estudio.

Tabla 4

Prueba de rango múltiple de Tukey para determinación de pH óptimo para la biosorción de plomo con biomasa del Sankayo (Echinopsis maximiliana)

pH	Eficiencia de remoción de Pb (%)	Grupos Tukey		
5.5	99.89	A		
7.5	99.08	B		
4.5	98.63	C		
6	98.57	C	D	
6.5	98.40	C	D	
5	98.34		D	E
7	98.33		D	E
4	98.07			E
3.5	97.74			F

Nota. Medias con diferente letra son estadísticamente diferentes ($p < 0.05$). Fuente:

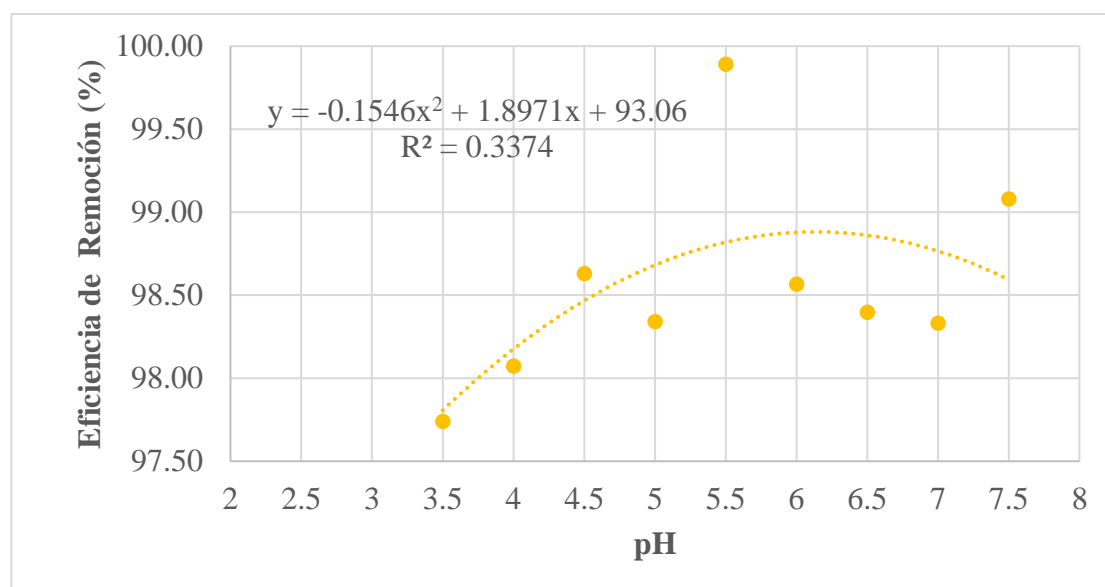
Elaboración propia

Tabla 4, muestra la prueba de comparación múltiple de Tukey permitió determinar diferencias significativas ($p < 0,05$) en la eficiencia de remoción de plomo (Pb²⁺) por la biomasa de sankayo en función del pH (anexos). Los resultados muestran que la mayor eficiencia se alcanzó a pH 5,5 con un 99,08 %, perteneciente al grupo estadístico

“A”, lo que indica una diferencia significativa respecto a los demás tratamientos. A medida que el pH disminuyó, la eficiencia también se redujo progresivamente, alcanzando valores mínimos de 97,14 % a pH 3,5 (grupo “F”). Esto sugiere que el pH influye notablemente en la capacidad biosorbente de la biomasa, siendo el pH 5,5 el nivel óptimo para la adsorción de Pb^{2+} , debido probablemente a la menor protonación de los grupos funcionales superficiales, lo que favorece la interacción con los iones metálicos

Figura 9

Determinación de pH óptimo para la biosorción de plomo mediante biomasa del *Sankayo* (*Echinopsis maximiliana*).



Nota. Comportamiento de la remoción de plomo porcentual respecto a diferentes valores de pH. Fuente Elaboración propia.

En la Figura 9, se muestra la tendencia del comportamiento de la remoción de plomo porcentual respecto a diferentes valores de pH, se observa que la tendencia se ajusta a un modelo cuadrático o de segundo orden, donde valores bajos de pH obtienen un valor menor de remoción, así como valores muy elevados de pH también manifiestan menores porcentajes de remoción, siendo el valor óptimo valores intermedios, en este caso específico de 5.5 unidades de pH.

Al respecto se conoce que la biosorción de metales pesados, utilizando diferentes tipos de biomasa, es influenciada por el valor del pH, ya que el pH influye en la ionización de los grupos funcionales presentes en la superficie del adsorbente. Weldu et al., (2018), también significativamente en la capacidad de adsorción de metales pesados

por parte de la biomasa, se tiene que a valores de pH bajos, la alta concentración de iones H^+ puede competir con los iones metálicos por los sitios de unión en la superficie de la biomasa, reduciendo de manera significativa la eficiencia de adsorción (Nascimento et al., 2024).

Mientras que, Phiri & Oh (2024) indican que a medida que el pH aumenta, la disminución de la concentración de iones H^+ tiende a favorecer la ionización de grupos funcionales en la biomasa, como carboxilos y fosfatos, mejorando de esta forma la adsorción de cationes metálicos. Sin embargo, como indica Rahman (2024), a valores de pH elevados, también existe el riesgo de precipitación de metales en forma de hidróxidos, lo que complica la interpretación de los resultados de adsorción, sin embargo en el presente estudio el pH de 5.5 unidades indica que el medio ligeramente ácido tiende a favorecer el proceso de adsorción de plomo.

2.9.2. Eficiencia de remoción de plomo (Pb) con biomasa de sankayo (*Echinopsis maximiliana*).

Tabla 5

Determinación de la cantidad de biomasa óptimo para la biosorción de plomo con biomasa del Sankayo (Echinopsis maximiliana)

Prueba N°	Biomasa (g)	Concentración inicial de Pb (mg/L)	Concentración final (mg/L)	Eficiencia de Remoción de Pb (%)
1	0.05	4.77	0.1164	75.60
2	0.10	4.77	0.0883	81.49
3	0.25	4.77	0.0989	79.27
4	0.5	4.77	0.0983	79.39
5	1	4.77	0.072	84.91
6	0.05	11.56	0.6796	68.45*
7	0.10	11.56	0.151	86.94
8	0.25	11.56	0.0872	92.46
9	0.5	11.56	0.065	94.38
10	1	11.56	0.157	86.42
11	0.05	51.35	0.8922	82.63
12	0.10	51.35	0.5733	88.84
13	0.25	51.35	0.1557	96.97
14	0.5	51.35	0.0855	98.33**
15	1	51.35	0.3732	92.73
16	0.05	94.83	2.431	74.36
17	0.10	94.83	1.105	88.35
18	0.25	94.83	0.6132	93.53
19	0.5	94.83	0.2857	96.99
20	1	94.83	0.2503	97.36

Nota. * valor mínimo obtenido, ** valor máximo obtenido. Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 5, se exponen los resultados de biomasa óptimo para el proceso de biosorción de plomo (Pb) con biomasa de sankayo (*Echinopsis maximiliana*), a un tiempo constante de 60 min, se utilizaron cantidades de biomasa desde 0.05 g hasta un máximo de 1 g, los valores de remoción de plomo más bajos se produjeron con una biomasa de 0.05 g con un promedio de 68.45%, mientras que la máxima remoción de dicho metal se produjo con 0.5 g de biomasa de Sankayo con una media de 98.33% de remoción.

Según Barbera et al., (2023) demuestran que la *Opuntia ficus indica* (OFI) sin tratar muestra una alta capacidad de adsorción. a 0,5 g de OFI son capaces de adsorber 45 mg/g de Cu, 87 mg/g de Cd, 42 mg/g de Ni y 114 mg/g de Pb. Estos valores son comparables con los de otros materiales adsorbentes y, en algunos casos, superiores a los de materiales modificados. Mientras que otras biomosas, indican que la cantidad óptima de la misma varía según el tipo de biosorbente y las condiciones experimentales, Tejada et al., (2021), par plomo (II) se determinaron a 0,1 g de adsorbente y 90 mg/L como las mejores condiciones para la adsorción, reportando una capacidad máxima de remoción de 40,97 mg/g. Mientras que en otro estudio, utilizando una especie similar en cladodios de tuna (*Opuntia ficus indica*), se emplearon 0.5 g de biomasa, logrando una capacidad de adsorción de 50.25 mg/g (Lavado et al., 2020), cuyos resultados indican que la eficiencia de remoción depende tanto de la cantidad de biomasa como de las propiedades específicas del biosorbente utilizado que confirman la afinidad de los materiales vegetales hacia el plomo. Asimismo, por tanto, en base a los resultados señalados y los del presente estudio, se desprende que es necesario estudios ulteriores para ajustar la dosificación de biomasa según las características específicas del biosorbente. Así mismo, Lascari et al., (2025), reportaron que los cladodios de *Opuntia ficus-indica* modificados alcanzaron una elevada eficiencia en la remoción de Pb^{2+} , con capacidades de adsorción de hasta 121 mg/g, mientras que el ajuste al modelo de Langmuir confirmó un proceso de monocapa. Estos resultados coinciden con lo descrito por Tejada et al., (2021), quienes también evidenciaron una adsorción eficiente del plomo mediante biomasa de tuna, reforzando el potencial de este tipo de biosorbentes para la depuración de aguas contaminadas. Así mismo otro estudio utilizando mucilago de *Opuntia ficus*, señala un 90.26 % de remoción de metales pesados (González et al., 2024).

Tabla 6

Prueba de rango múltiple de Tukey para determinar la cantidad de biomasa óptimo para la biosorción de plomo

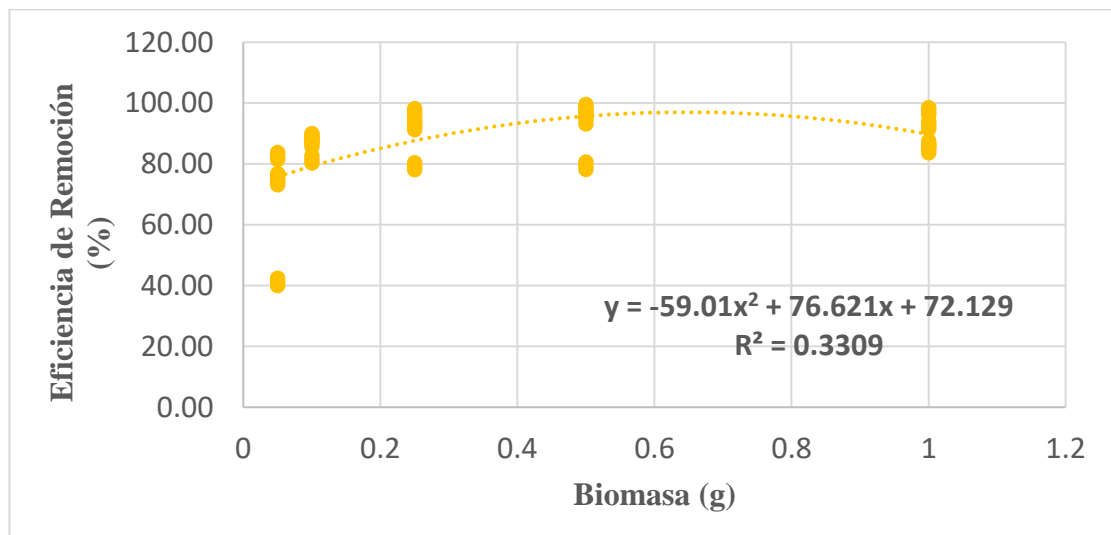
Biomasa	Eficiencia de Remoción de Pb (%)	Grupos Tukey
0.5	98.333	A
0.25	90.556	B
1	90.354	B
0.1	86.402	C
0.05	68.450	D

Nota. Medias con letras diferentes de comparación múltiple del test de Tukey estadísticamente ($p < 0.05$). Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos de los experimentos para la biomasa y la remoción de plomo se sometieron al respectivo análisis de varianza, donde se determinó que existía diferencia estadística significativa ($p < 0.05$), por tanto, el factor de biomasa fue sometido a la prueba de rango múltiple de Tukey, en donde se confirmó que la cantidad de 0.5 g de biomasa permitieron maximizar la remoción de plomo con 98.333%, mientras que la menor remoción se produjo con una biomasa de 0.05 g con 68.450%.

Figura 10

Determinación de biomasa óptima para la biosorción de plomo mediante biomasa del Sankayo (Echinopsis maximiliana).



Nota. se muestra el comportamiento de la remoción de plomo frente a diferentes cantidades de biomasa. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 10 se muestra el comportamiento de la remoción de plomo frente a diferentes cantidades de biomasa de sankayo (*Echinopsis maximiliana*). Se observa que las dosis más bajas 0.05 y 0.10 g presentan menores porcentajes de remoción, al igual que la dosis más alta a 1 g. En contraste, la mayor eficiencia se alcanzó con una cantidad intermedia de 0.5 g, obteniéndose un 98.333% de remoción. El ajuste a un modelo cuadrático describe adecuadamente esta tendencia bajo las diferentes dosis evaluadas. Cabe señalar que las demás variables del proceso de pH, concentración inicial y tiempo de contacto se mantuvieron constantes durante los experimentos.

En concordancia con lo observado en este estudio, Tejada et al., (2021), señalan que el incremento en la cantidad de biomasa aumenta la disponibilidad de sitios de adsorción; sin embargo, advierten que dosis excesivas pueden provocar aglomeración o saturación, disminuyendo la eficiencia del proceso. De manera complementaria, Nouri et al., (2021), destacan que la dosis de adsorbente es un factor determinante para optimizar la remoción de Pb (II), ya que influye directamente en la capacidad de captación del metal. Por su parte, Barbera et al., (2023) demuestran que la masa de *Opuntia ficus-indica* tiene un impacto significativo en la adsorción de metales, evidenciando que la cantidad de biomasa es un parámetro crítico en el rendimiento de la biosorción. En conjunto, estos estudios coinciden en que la eficiencia del proceso depende de un equilibrio adecuado en la dosis del adsorbente.

2.9.3. Eficiencia de remoción de plomo (Pb) con biomasa de sankayo (*Echinopsis maximiliana*) con variación de la concentración inicial

Tabla 7

*Determinación de la concentración inicial de Pb óptimo para la biosorción de plomo mediante biomasa del Sankayo (*Echinopsis maximiliana*)*

Prueba N°	Biomasa (g)	Concentración inicial Pb (mg/L)	Tiempo (min)	pH	Concentración final	Eficiencia de Remoción (%)
1	0.05	4.77	60	5.5	0.0254	94.68**
2	0.05	11.56	60	5.5	0.0769	93.35
3	0.05	21.5	60	5.5	0.1873	91.29
4	0.05	51.35	60	5.5	0.5419	89.45
5	0.05	94.83	60	5.5	1.835	80.65
6	0.05	253.9	60	5.5	7.645	69.89*

Nota. * valor mínimo obtenido, ** valor máximo obtenido. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 7 se presentan los resultados correspondientes a la evaluación de la concentración inicial óptima en la remoción de plomo utilizando biomasa de sankayo (*Echinopsis maximiliana*). Las concentraciones variaron entre 4.77 mg/L y 253 mg/L. El menor porcentaje de remoción se registró en la concentración más elevada 253 mg/L, con un 69.89 %, mientras que la mayor eficiencia se obtuvo a 4.77 mg/L, alcanzándose una remoción de 94.68 %. Estos resultados evidencian que concentraciones iniciales bajas favorecen el rendimiento del proceso de biosorción.

Así mismo, otro estudio con cladodios de tuna, se emplearon concentraciones iniciales de 100 mg/L, logrando una capacidad de adsorción de 50.25 mg/g (Lavado et al., 2020), cuyos resultados indican que la eficiencia de remoción depende tanto de la concentración inicial de iones metálicos como de las propiedades específicas del biosorbente que se utiliza. Tejada et al., (2021) destacan la importancia de la concentración inicial de Pb (II) en la eficiencia de biosorción, señalando que un valor más alto favorece el gradiente de difusión hacia los sitios activos del biosorbente, aumentando la remoción hasta alcanzar el equilibrio, como lo evidenciaron al emplear 90 mg/L, logrando una capacidad máxima de 40.97 mg/g. Complementando con lo reportado por Nouri et al., (2021), señalan que además de la concentración inicial, la cantidad de biomasa y las características funcionales y estructurales de la *Opuntia ficus-indica* son determinantes para maximizar la eficiencia del proceso. También Nascimento et al., (2024), confirma que una concentración inicial de 5 mg/L, es probable que los iones Pb^{2+} estén presentes en una cantidad que permite una adsorción eficiente sin saturar rápidamente los sitios activos de la biomasa de Sankayo, por tanto el resultado hallado como óptimo facilita un equilibrio adecuado entre la disponibilidad de iones metálicos y la capacidad adsorbente de la biomasa, lo que resulta en una alta eficiencia de remoción reportada. Según (Barbera et al., 2023) demuestran que la *Opuntia ficus indica* (OFI) sin tratar muestra una alta capacidad de adsorción en 10mL. a un pH de 5, 0,5 g de OFI son capaces de adsorber 45 mg/g de Cu, 87 mg/g de Cd, 42 mg/g de Ni y 114 mg/g de Pb. Estos valores son comparables con los de otros materiales adsorbentes y, en algunos casos, superiores a los de materiales modificados.

Tabla 8

Prueba de rango múltiple de Tukey para determinar la concentración inicial óptima para la biosorción de plomo

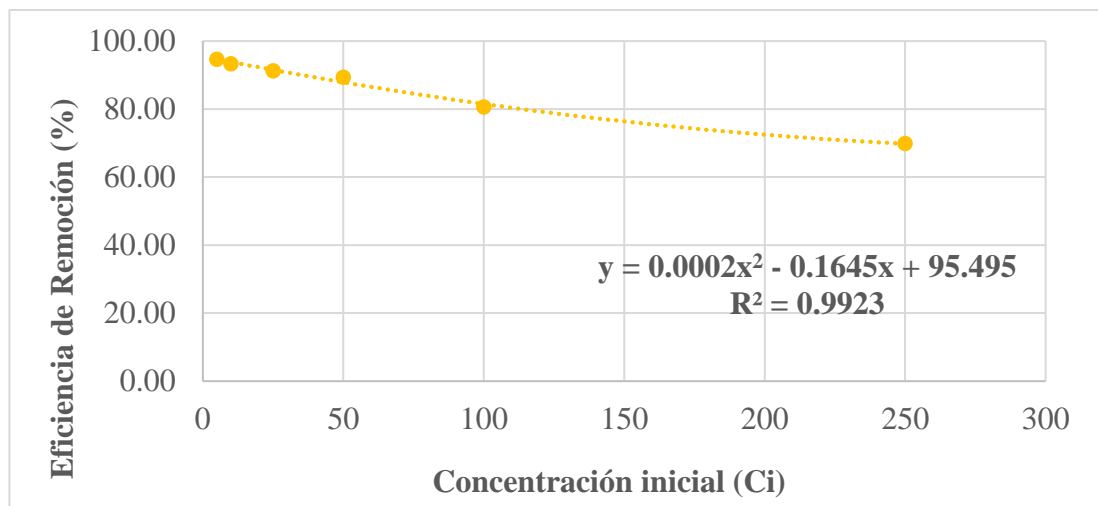
Concentración inicial Pb (mg/L)	Eficiencia de Remoción (%)	Grupos Tukey		
5	94.675	A		
10	93.348	A	B	
25	91.288		B	C
50	89.447			C
100	80.650			D
250	69.890			E

Nota. Medias con diferente letra son estadísticamente diferentes ($p < 0.05$). Fuente: Elaboración propia.

Al someter los resultados al análisis estadístico mediante ANOVA, se determinó como se muestra en la Tabla 8, la existencia de diferencias significativas entre los tratamientos $p < 0.05$. Posteriormente, la prueba de rango múltiple de Tukey confirmó que la mayor remoción de plomo se alcanzó con una concentración inicial de 5 mg/L, aunque la concentración de 10 mg/L también presentó un valor de remoción elevado.

Figura 11

Determinación de concentración inicial óptima para la biosorción de plomo mediante biomasa del Sankayo (Echinopsis maximiliana).



Nota. Muestra la tendencia de la remoción de plomo respecto a la concentración inicial del mismo. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 11, se muestra la tendencia de la remoción de plomo respecto a la concentración inicial del mismo, se observa que con las concentraciones iniciales más bajas se obtiene los valores de remoción de mayor magnitud, mientras que las

concentraciones iniciales más altas el porcentaje de remoción tiende a disminuir, evidenciando una relación inversa, puesto que a una mayor concentración de soluto la remoción se reduce.

Según Tejada et al., (2021), concentraciones bajas de Pb (II) reducen la remoción debido a la limitada disponibilidad de iones para ocupar los sitios activos del biosorbente, mientras que concentraciones elevadas pueden saturar rápidamente dichos sitios, limitando también la eficiencia del proceso. Por su parte, Nouri et al., (2021), reportaron que el aumento de la concentración inicial de Pb (II) incrementa la capacidad de adsorción hasta un punto de saturación, reforzando la necesidad de identificar un valor óptimo de concentración inicial para equilibrar la disponibilidad de iones y la ocupación de sitios activos, maximizando así la eficiencia del proceso de biosorción, logrando una remoción del 87 % y una capacidad de adsorción de 166 mg/g, evidenciando que tanto la masa de biomasa como la concentración inicial de iones metálicos son factores determinantes en la eficiencia de biosorción. La alta eficiencia de remoción reportada sugiere que el sankayo (*Echinopsis maximiliana*) posee una capacidad significativa para adsorber plomo.

2.9.4. Eficiencia de remoción de plomo (Pb) con biomasa de sankayo (*Echinopsis maximiliana*) con variación del tiempo de contacto

Tabla 9

Determinación del tiempo óptimo de contacto para la biosorción de Pb mediante biomasa del Sankayo (Echinopsis maximiliana)

Prueba N°	Biomasa (g)	Concentración inicial Pb (mg/L)	Tiempo (min)	pH	Concentración final (mg/L)	Eficiencia de remoción de Pb (%)
1	0.05	253.9	0	5.5	12.94	49.04*
2	0.05	253.9	5	5.5	7.573	51.35
3	0.05	253.9	10	5.5	9.164	63.91
4	0.05	253.9	20	5.5	10.01	60.58
5	0.05	253.9	30	5.5	10.21	59.79
6	0.05	253.9	45	5.5	9.26	63.53
7	0.05	253.9	60	5.5	10.89	68.25**
8	0.05	253.9	90	5.5	29.61	58.23
9	0.05	253.9	120	5.5	9.309	63.34
10	0.05	253.9	180	5.5	8.441	66.75

Nota. * valor mínimo obtenido, ** valor máximo obtenido. Fuente: Elaboración propia.

Mientras que en la Tabla 9, se exponen los resultados obtenidos por espectrofotometría de absorción atómica por flama, para identificar el tiempo de contacto óptimo para el proceso de biosorción de plomo utilizando biomasa de Sankayo (*Echinopsis maximiliana*), se utilizaron tiempos desde 0 min hasta 180 min, el menor valor porcentual de remoción 49.04% se obtuvo con el menor tiempo de contacto, mientras que el máximo valor de remoción de 68.25% se obtuvo al aplicar un tiempo de contacto de 60 min, se debe señalar con los restantes parámetros se mantuvieron constantes.

Así como menciona Barbera et al., (2023) que la *Opuntia ficus indica* (OFI) sin tratar muestra una alta capacidad de adsorción. En 30 min a un pH de 5 son capaces de adsorber 114 mg/g de Pb. Estos valores son comparables con los de otros materiales adsorbentes y, en algunos casos, superiores a los de materiales modificados. Mientras que Leon, (2023), indica que con 0.3 g de biomasa en 150 mL de agua residual, lograron una remoción de plomo del 96.84%, lo cual se logró en un tiempo de contacto de 60 min, con la biomasa de sankayo (*Echinopsis maximiliana*), cuyo tiempo coincide con el reportado como óptimo para el presente estudio. Mientras que, mediante la utilización de otras fuentes de biomasa, se tiene que por ejem. Así mismo en otro estudio mediante el uso de cladodios de tuna (*Opuntia ficus indica*), la retención de plomo se produjo de forma muy rápida durante los primeros 10 min, alcanzándose el equilibrio a los 120 min de tiempo de contacto (Lavado et al., 2020), en el presente estudio se identificó 60 min como óptimo.

Weldu et al., (2018), señalaron que la biosorción de plomo (Pb^{2+}) por polvo de *Opuntia* muestra un incremento marcado durante los primeros minutos y alcanza su equilibrio aproximadamente a los 120 min, debido a que los sitios activos disponibles en la superficie se ocupan rápidamente y se saturan conforme avanza el tiempo. De manera similar, González et al. (2024), observaron que el mucílago de *Opuntia ficus-indica* presenta una fase inicial rápida de adsorción de Pb^{2+} , atribuida a interacciones electrostáticas entre el metal y los grupos funcionales del material, seguida de un periodo de estabilización en el que la remoción del plomo deja de incrementarse de forma significativa aun cuando el tiempo de contacto aumenta.

Tabla 10

Prueba de rango múltiple de Tukey para determinar el tiempo de contacto óptimo para la biosorción de plomo

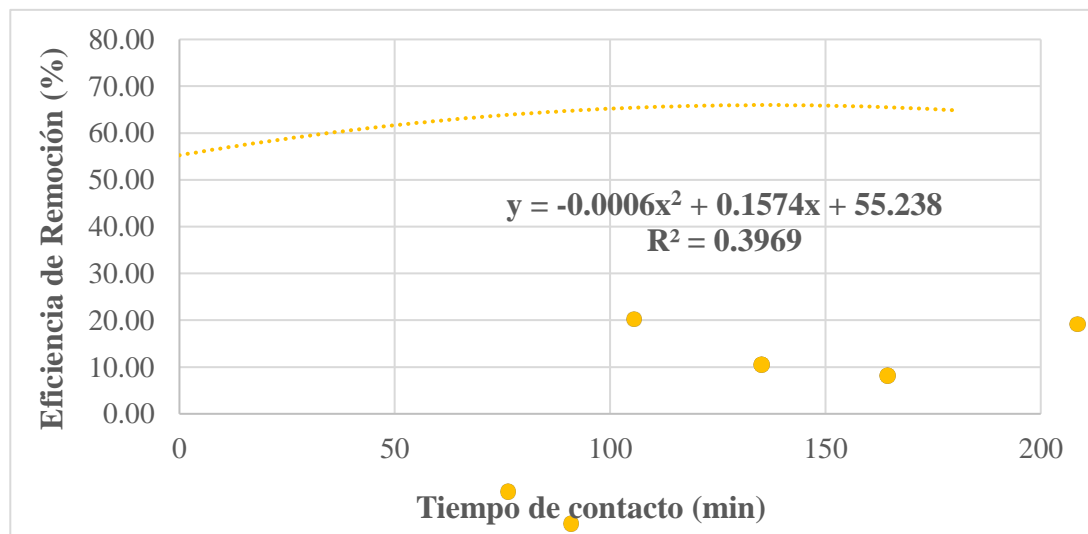
Tiempo de contacto (min)	Eficiencia de Remoción de Pb (%)	Grupos		
60	68.250	A		
180	66.755	A		
10	63.907	A	B	
45	63.529	A	B	
120	63.336	A	B	
20	60.575		B	C
30	59.787		B	C
90	58.230			C
0	51.350			D
5	49.035			D

Nota. Muestra el resultado del análisis estadístico aplicado para identificar el tiempo de contacto óptimo para la biosorción de plomo. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 10, se muestra el resultado del análisis estadístico aplicado para identificar el tiempo de contacto óptimo para la biosorción de plomo, el valor más bajo fue de entre 0 a 5 min, mientras que la máxima remoción se obtuvo con el tratamiento de 60 min que alcanzó un 68.25%. Promedios con letra diferente se consideran estadísticamente diferentes ($p < 0.05$).

Figura 12

Determinación del tiempo de contacto óptimo para la biosorción de plomo mediante biomasa del sankayo (Echinopsis maximiliana)



Nota. Muestra la distribución de los datos de remoción porcentual respecto al factor de tiempo de contacto. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 12, se muestra la distribución de los datos de remoción porcentual respecto al factor de tiempo de contacto, se observa que el modelo cuadrático ajustado, permite señalar que con tiempos menores de contacto como 0 y 5 min se obtienen menores porcentajes de remoción, mientras que con un tiempo mayor a 60 min no se obtienen mejoras en la remoción.

Respecto al tiempo de contacto entre la biomasa y la solución contaminada, es un factor relevante en los procesos de biosorción, así un tiempo adecuado permite que los iones metálicos interactúen eficazmente con los sitios activos de la biomasa, alcanzando el equilibrio de adsorción (Rahman, 2024). Mientras que un estudio previo, utilizando la biomasa de Sankayo para la remoción de metales pesados en aguas residuales, utilizaron 0.3 g de biomasa en 150 mL de agua residual, lograron una remoción de plomo del 96.84%, lo cual se logró en un tiempo de contacto de 60 min (Leon, 2023), cuyo tiempo coincide con el reportado como óptimo para el presente estudio. Así mismo en otro estudio mediante el uso de cladodios de tuna (*Opuntia ficus*) indica, la retención de plomo se produjo de forma muy rápida durante los primeros 10 min, alcanzándose el equilibrio a los 120 min de tiempo de contacto (Lavado et al., 2020), en el presente estudio se identificó 60 min como óptimo.

2.9.5. Isotermas de adsorción para plomo

Una vez culminada la etapa de optimización de los parámetros que maximizan el proceso de biosorción de plomo, utilizando biomasa de Sankayo, se procedió al ajuste de los modelos estadísticos para explicar el comportamiento, tanto de la solución de plomo y el soluto formado por la biomasa de sankayo (*Echinopsis maximiliana*).

a. Langmuir

Este modelo de la cinética de adsorción, se caracteriza por ser un proceso homogéneo en el que el adsorbato (solución de plomo) se adsorbe en forma de una monocapa (el espesor de la capa es del orden de una molécula) sobre el adsorbente (biomasa de sankayo) y la adsorción tiene lugar en un número fijo de sitios de adsorción, sin interacción lateral ni transmigración de la molécula de adsorbato en el plano del adsorbente, donde todas las moléculas de adsorbato poseen entalpías y energías de activación iguales

Tabla 11

Valores para ajustar la educación bajo el modelo de Langmuir para la biosorción de plomo utilizando biomasa de sankayo (Echinopsis maximiliana)

C_o	C_e	q	C_e/q
5	0.03	4.97	0.01
10	0.08	9.92	0.01
25	0.19	24.81	0.01
50	0.54	49.46	0.01
100	1.84	98.17	0.02
250	7.65	242.36	0.03

Nota. Los valores que permiten calcular los parámetros de la ecuación del modelo de Langmuir. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 11, se presenta los valores que permiten calcular los parámetros de la ecuación del modelo de Langmuir, se tiene la concentración inicial (C_o) y final (C_e) de la solución de plomo, además del valor de q es la cantidad adsorbida por la biomasa.

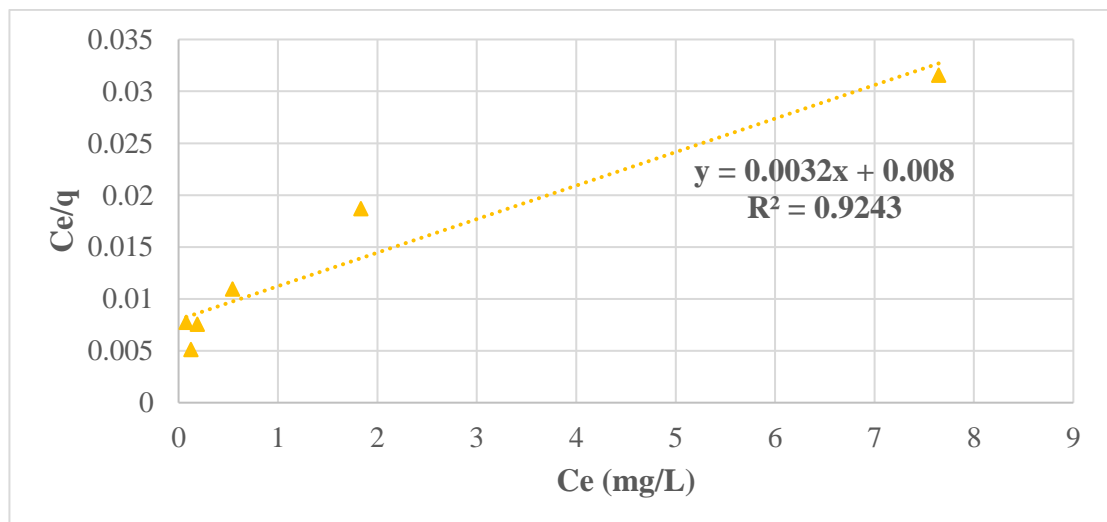
El modelo matemático es el siguiente:

$$\frac{C}{q} = \frac{1}{b} C + \frac{1}{k \cdot b} \tag{5}$$

Donde: k fuerza de unión, b es la cantidad máxima adsorbida, C cantidad en la solución q cantidad adsorbida.

Figura 13

Modelo de adsorción de Langmuir para la biosorción de plomo mediante biomasa del Sankayo (Echinopsis maximiliana).



Nota. Coeficiente de determinación para el modelo de Langmuir. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 13, se tiene que el coeficiente de determinación para el modelo de Langmuir es $R^2=0.9243$, sugiere un ajuste aceptable, aunque podría haber alguna desviación debido a otros procesos de adsorción (como adsorción en múltiples capas o interacciones no consideradas en este modelo).

Tabla 12

Valores de los parámetros del modelo de Langmuir para la biosorción de plomo utilizando biomasa de Sankayo

$(C_e/q = 0.0032 C_e + 0.008)$				
1/b	1/(kb)	b (mg/g)	K	R²
0.0032	0.008	312.5	0.40	0.9243

Nota. Ajuste al modelo de Langmuir. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 12 se presenta el ajuste al modelo de Langmuir y los parámetros obtenidos. El valor elevado del coeficiente b refleja una alta afinidad entre la biomasa de *Sankayo* (*Echinopsis maximiliana*) y los iones Pb^{2+} , lo que indica que el material posee sitios activos capaces de retener eficazmente el metal. Por su parte, la constante k, que representa la capacidad máxima de adsorción, muestra que la biomasa puede alcanzar una adsorción de hasta 0.40 mg de Pb por gramo en condiciones óptimas, evidenciando un desempeño adecuado en procesos de monocapa y superficies homogéneas, tal como describe el modelo de Langmuir. Por tanto, se tiene que la biomasa de *sankayo* (*Echinopsis maximiliana*). muestra buena capacidad de adsorción para el plomo, con una alta afinidad (b elevado) pero una capacidad de adsorción moderada ($K=0.40$ mg/g), de lo cual se interpreta que el modelo de Langmuir, este comportamiento es consistente con estudios previos, donde la adsorción de plomo en biomazas como *Opuntia ficus-indica* también mostró una marcada afinidad bajo este modelo (Lavado et al., 2020; Tejada et al., 2021).

b. Freundlich

Este es un modelo empírico utilizado en la adsorción de gases y soluciones en superficies sólidas. Fue propuesto por Herbert Freundlich en 1906 y describe cómo un soluto se adsorbe en un adsorbente heterogéneo con distintos tipos de sitios de adsorción y energías de adsorción. Este modelo es útil cuando la adsorción no sigue una distribución uniforme de energía, pero tiene limitaciones, ya que no define una capacidad máxima de adsorción.

Tabla 13

Valores para ajustar la educación bajo el modelo de Freundlich para la biosorción de plomo utilizando biomasa de Sankayo

C _o	C _e	Q	C _e /q	Log C	Log q
5	0.03	4.97	0.01	-1.523	0.696
10	0.08	9.92	0.01	-1.097	0.997
25	0.19	24.81	0.01	-0.721	1.395
50	0.54	49.46	0.01	-0.268	1.694
100	1.84	98.17	0.02	0.265	1.992
250	7.65	242.36	0.03	0.884	2.384

Nota. Valores numéricos necesarios para ajustar los resultados en un modelo de adsorción de Freundlich. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 17 se exponen los valores numéricos necesarios para ajustar los resultados en un modelo de adsorción de Freundlich, se nota que se realiza una transformación logarítmica, lo cual linealiza el modelo, siendo la fórmula matemática la siguiente:

$$\log q = \frac{1}{n} \log C + \log K_d \tag{6}$$

Donde:

q: Cantidad de soluto adsorbido por unidad de masa del adsorbente (mg/g)

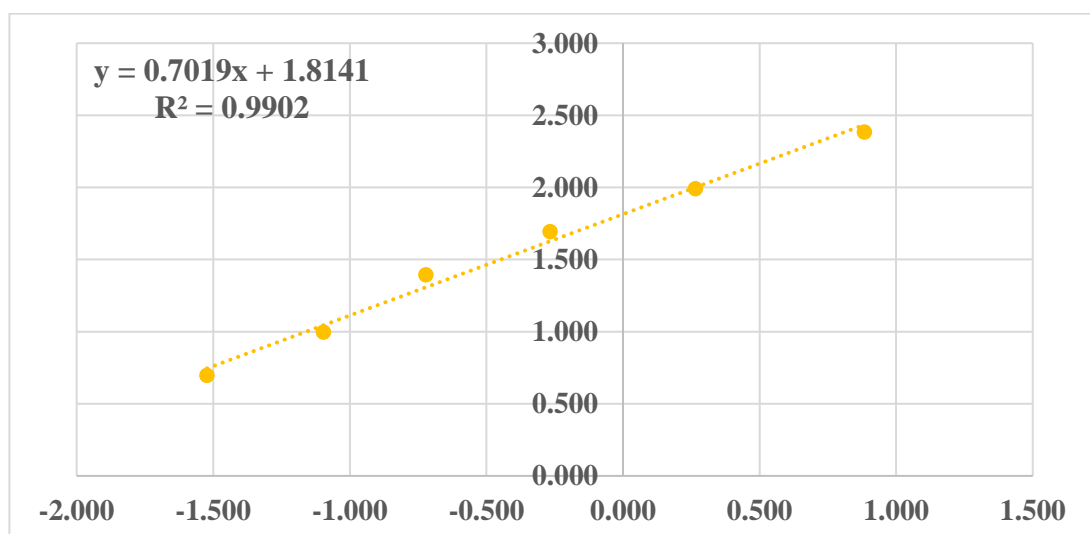
C: Concentración del soluto en equilibrio en la fase líquida (mg/L)

Kd: constante de Freundlich relacionada con la capacidad de adsorción

1/n: constante empírica relacionada con la intensidad de la adsorción

Figura 14

Modelo de adsorción de Freundlich para la biosorción de plomo mediante biomasa del sankayo (*Echinopsis maximiliana*).



Nota. Modelo ajustado a Freundlich. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 14, se observa el modelo ajustado a Freundlich, se tiene como principal característica que el coeficiente de determinación es $R^2=0.9902$, el cual supera ligeramente al reportado para el modelo previo.

Tabla 14

Valores de los parámetros del modelo de Freundlich para la biosorción de plomo utilizando biomasa de sankayo

Ecuación $\text{Log } q = 0.7019 \text{ Log } C_e + 1.8141$				
$\frac{1}{n}$	n	$\text{Log } K_d$	K_d	R^2
0.7019	1.425	1.8141	65.178	0.9902

Nota. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 14 se observa que el valor de $1/n = 0.7019$, dentro del rango $0 < 1/n < 1$, confirma que la adsorción de Pb^{2+} sobre la biomasa de sankayo (*Echinopsis maximiliana*) es favorable. Asimismo, el coeficiente $n = 1.425$, ubicado entre 1 y 10, indica una adsorción eficiente, caracterizada por interacciones moderadas entre el adsorbato y los sitios activos del adsorbente. La constante de Freundlich $K_d = 65.178$ refleja una alta capacidad de adsorción, lo que sugiere que la biomasa posee una abundante cantidad de sitios funcionales o fuertes interacciones con los iones Pb^{2+} .

En conjunto, los resultados confirman que la biomasa de sankayo (*Echinopsis maximiliana*), actúa como un adsorbente altamente eficiente para la remoción de plomo en solución acuosa, mostrando una adsorción favorable, una capacidad notable de retención y un ajuste adecuado al modelo de Freundlich. Esto posiciona a este material como una alternativa viable para el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados, en concordancia con lo encontrado por Arones y Pérez (2024) en sistemas similares basados en *Opuntia ficus-indica*.

Weldu et al., (2018), encontraron que el polvo de *Opuntia* ajusta adecuadamente al modelo de Freundlich para la remoción de Pb^{2+} , mostrando una alta afinidad por el metal y sitios activos heterogéneos. De manera similar, González et al. (2024), reportaron que la adsorción de plomo en *Opuntia ficus-indica* y mucílago de la misma especie se ajusta al modelo de Freundlich, evidenciando una adsorción favorable y la presencia de múltiples sitios de interacción. Por tanto, este modelo

cinético explica de manera satisfactoria los resultados obtenidos en el presente estudio con biomasa de *sankayo* (*Echinopsis maximiliana*).

Un estudio similar, utilizando la biomasa de *sankayo* (*Echinopsis maximiliana*) para la remoción de metales pesados en aguas residuales. emplearon 0.3 g de biomasa en 150 mL de agua residual, logrando una remoción de plomo del 96.84% en un tiempo de contacto de 60 min (Leon, 2023), si bien este estudio no especifica el modelo de isoterma utilizado, la alta eficiencia de remoción sugiere que dicha biomasa posee una capacidad significativa para adsorber el plomo.

2.10. Eficiencia de remoción de cadmio (Cd) con biomasa de *sankayo* (*Echinopsis maximiliana*), con variación independiente del pH, la concentración inicial y el tiempo de contacto.

2.10.1. Eficiencia de remoción de cadmio (Cd) con biomasa de *sankayo* (*Echinopsis maximiliana*) con variación del pH.

Tabla 15

*Determinación del pH óptimo para la biosorción de cadmio mediante biomasa del *sankayo* (*Echinopsis maximiliana*)*

Prueba N°	Biomasa (g)	Concentración inicial Cd (mg/L)	pH	Concentración final (Cf)	Eficiencia de remoción de Cd (%)
1	0.25	5.25	3.5	0.0413	99.21**
2	0.25	5.25	4	0.0267	99.49
3	0.25	5.25	4.5	0.0169	99.68
4	0.25	5.25	5	0.0123	99.77**
5	0.25	5.25	5.5	0.0260	99.50
6	0.25	5.25	6	0.0141	99.73
7	0.25	5.25	6.5	0.0215	99.59
8	0.25	5.25	7	0.0173	99.67
9	0.25	5.25	7.5	0.0184	99.65

Nota. * valor mínimo obtenido, ** valor máximo obtenido. Fuente: Elaboración Propia.

En la Tabla 15 se presentan los resultados del experimento realizado para determinar el pH óptimo en el proceso de adsorción de cadmio empleando biomasa de *sankayo* (*Echinopsis maximiliana*). Se observó que el mayor porcentaje de remoción se alcanzó a pH 5, mientras que el valor más bajo correspondió a pH 4.

Coinciden ampliamente con lo reportado en investigaciones previas sobre biomazas de origen cactáceo. Prieto et al. (2024) señalaron que las semillas de *Opuntia* presentan su mayor capacidad de adsorción de Cd²⁺ en pH 5, logrando eficiencias cercanas al 80–85%, atribuidas a la ionización óptima de grupos funcionales superficiales. De

manera similar, Maaoui et al., (2023) demostraron que biomásas de cactus alcanzan remociones superiores al 78% en este mismo rango, donde la superficie del material adquiere una mayor carga negativa que favorece la atracción de iones cadmio. Asimismo, Volpe et al. (2025) reportaron que los derivados de *Opuntia ficus-indica* muestran valores de remoción entre 75% y 82% en pH 5, consolidando este valor como el punto crítico para maximizar la adsorción. En conjunto, estos antecedentes respaldan la tendencia observada en esta investigación, confirmando que el pH ligeramente ácido (5) promueve la máxima eficiencia de adsorción de Cd²⁺ en biomásas lignocelulósicas, incluida la biomasa de sankayo (*Echinopsis maximiliana*).

Así, como también menciona Wattanakornsiri et al., (2022) una dosis de adsorbente de 0,25 g, un pH de 4, un tiempo de contacto de 180 min y una concentración inicial de 100 mg/L resultaron ser las condiciones óptimas para la biosorción de iones Pb(II) y Cd(II), similar al hallado para este estudio, por tanto, un pH ligeramente ácido favorece el proceso de adsorción.

Tabla 16

Prueba de rango múltiple de Tukey para determinar el pH óptimo para la biosorción de Cadmio

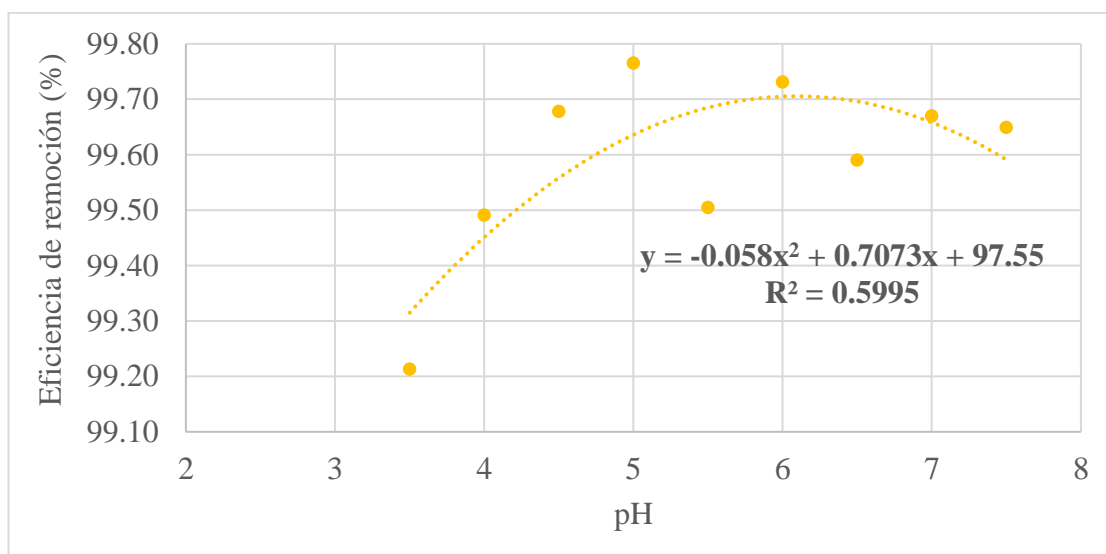
pH	Eficiencia de remoción de Cd (%)	Grupos Tukey
5	99.766	A
6	99.731	A
4.5	99.678	A
7	99.670	A
7.5	99.650	A
6.5	99.590	A
5.5	99.505	A
4	99.491	A B
3.5	99.213	B

Nota. Medias de letra con comparación múltiple son estadísticamente diferentes (p<0.05). Fuente: Elaboración propia.

Culminado el experimento se procedió a someter los resultados al análisis de varianza, en donde se obtuvo una diferencia estadística significativa (p<0.05), posteriormente se prosiguió el análisis con la prueba de rango múltiple de Tukey, en la Tabla 16 se observa que los porcentajes de remoción fueron elevados con los diferentes niveles de pH, sin embargo, el pH de 5 unidades permitió el mayor valor de remoción de Cadmio con 99.76%.

Figura 15

Determinación del pH óptimo para la biosorción de cadmio mediante biomasa del Sankayo (Echinopsis maximiliana).



Nota. Valores de remoción porcentual de cadmio en función del pH. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 15, se expone la distribución de los valores de remoción porcentual de cadmio en función del pH, con valores de 3.5 y 4 unidades se obtuvo un menor porcentaje de remoción, mientras que con los de 5 y 6 se evidenció una mayor remoción, con valores mayores de pH a los señalados se observa una leve reducción de la remoción, el modelo cuadrático de regresión representa dicha distribución, si bien el coeficiente de determinación es relativamente bajo (0.5995).

Al respecto se tiene que en estudios previos, se ha observado que la capacidad de adsorción de cadmio por diferentes biomásas, incrementa con el aumento del pH hasta alcanzar un valor óptimo, después del cual la eficiencia de remoción puede disminuir (Acuña, 2020).

2.10.2. Eficiencia de remoción de cadmio (Cd) con biomasa de sankayo (*Echinopsis maximiliana*)

Tabla 17

*Determinación de la cantidad de biomasa óptimo para la biosorción de Cadmio mediante biomasa del Sankayo (*Echinopsis maximiliana*).*

Prueba N°	Biomasa (g)	Concentración inicial Cd (mg/L)	Concentración final (mg/L)	Eficiencia de remoción de Cd (%)
1	0.05	4.71	0.0405	91.40*
2	0.10	4.71	0.0149	96.84
3	0.25	4.71	0.0155	96.71
4	0.5	4.71	0.0173	96.33
5	1	4.71	0.0155	96.71
6	0.05	9.12	0.0316	96.54
7	0.10	9.12	0.0202	97.79
8	0.25	9.12	0.0249	97.27
9	0.5	9.12	0.021	97.70
10	1	9.12	0.0496	94.56
11	0.05	58.23	0.1823	96.87
12	0.10	58.23	0.1718	97.05
13	0.25	58.23	0.127	97.82
14	0.5	58.23	0.0732	98.74
15	1	58.23	0.0444	99.24**
16	0.05	98.22	0.3732	96.20
17	0.10	98.22	0.3457	96.48
18	0.25	98.22	0.2983	96.96
19	0.5	98.22	0.1964	98.00
20	1	98.22	0.1196	98.78

Nota. * valor mínimo obtenido, ** valor máximo obtenido. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 21, se presentan los resultados para la optimización de la biomasa de Sankayo en el proceso de biosorción de Cadmio, la menor remoción se obtuvo con el uso de biomasa de 0.05 g con el 95.25%, mientras que la máxima remoción se obtuvo con 0.5 g con el 97.69% de remoción, en este experimento se mantuvieron constantes el resto de los parámetros.

Barbera et al., (2023), confirman que 0,5 g de *Opuntia ficus-indica* sin tratar son capaces de adsorber 87 mg/g de Cd²⁺, demostrando un desempeño comparable o superior a biomásas modificadas químicamente. Prieto et al. (2024), evaluaron semillas de *Opuntia* y reportaron que cantidades similares de biomasa permiten

remociones de Cd entre 51,8% y 66,3%, siendo *O. matudae* la más efectiva. Maaoui et al., (2023), encontraron que la alta porosidad y la presencia de grupos funcionales activos en los cladodios de *O. ficus-indica* permiten la adsorción eficiente de cadmio con 0,3–0,5 g de biomasa, mientras que Volpe et al. (2025) demostraron que biocarbones derivados de la misma especie removieron entre 75% y 82% de Cd²⁺ utilizando 0,5 g de material. Adicionalmente, Wattanakornsiri et al. (2022), lograron remover más del 97% de Cd²⁺ aplicando 0,25 g de cáscaras frutales modificadas químicamente. En conjunto, estos antecedentes confirman que la biomasa vegetal, incluida la de *Echinopsis maximiliana* (Sankayo), presenta una alta capacidad de adsorción de cadmio, donde cantidades intermedias de 0,3 a 0,5 g suelen ser suficientes para alcanzar remociones elevadas, sugiriendo que la disponibilidad de sitios activos y la interacción con los grupos funcionales determinan la eficiencia del proceso.

Tabla 18

Prueba de rango múltiple de Tukey para determinar la biomasa óptima para la biosorción de Cadmio

Biomasa (g)	Eficiencia de remoción (%)	Grupos
0.5	97.692	A
1	97.323	A
0.25	97.190	A
0.1	97.038	A
0.05	95.252	A

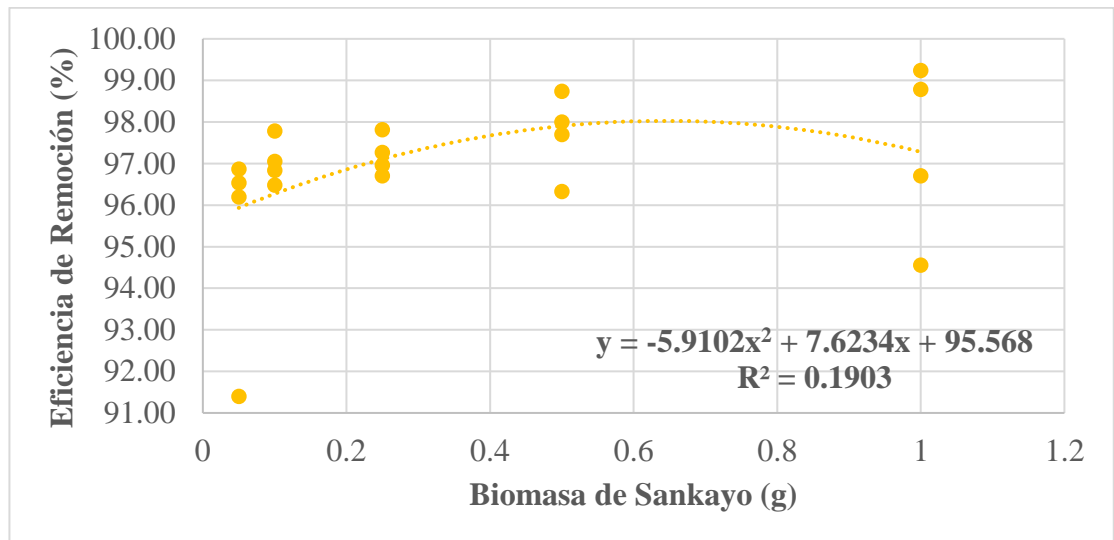
Nota. Medias con diferente letra son estadísticamente diferentes ($p < 0.05$). Fuente:

Elaboración propia.

Una vez culminado el experimento para obtener el óptimo de la biomasa, se procedió al análisis estadístico de varianza, con el cual no se obtuvo la existencia de una diferencia significativa ($p > 0.05$), en la tabla 18, muestra la prueba de rango múltiple de Tukey, donde se halló que el máximo valor de remoción de 97.692% se produjo con el uso de 0.5 g de biomasa de sankayo (*Echinopsis maximiliana*), por tanto, se consideró este como el valor óptimo para este parámetro.

Figura 16

Determinación de la biomasa óptima para la biosorción de cadmio mediante biomasa del Sankayo (Echinopsis maximiliana).



Nota. Distribución de datos del porcentaje de remoción en función de la biomasa aplicada. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 16, se muestra la distribución de datos del porcentaje de remoción en función de la biomasa aplicada, se observa que para las cantidades iniciales de biomasa como 0.05 y 0.10 g el porcentaje de remoción es reducido, mientras que con 0.5 y 1 g se observa los mayores valores de remoción, así mismo el ajuste a la ecuación de segundo grado es bajo atribuible a cierta variación dentro de las unidades experimentales.

Al respecto, se conoce que la cantidad de biomasa utilizada en el proceso de biosorción, tiene un efecto directo sobre la disponibilidad de sitios activos para la adsorción de metales pesados, puesto que un aumento en la dosis de biomasa incrementa la cantidad de sitios disponibles, lo que puede mejorar la eficiencia de remoción de cadmio (Lavado et al., 2023).

2.10.3. Eficiencia de remoción de cadmio (Cd) con biomasa de sankayo (*Echinopsis maximiliana*) con variación de la concentración inicial.

Tabla 19

*Determinación de la concentración inicial óptima de cadmio para la biosorción mediante biomasa del Sankayo (*Echinopsis maximiliana*)*

Prueba N°	Biomasa (g)	Concentración inicial Cd (mg/L)	Tiempo (min)	p H	Concentración final (mg/L)	Eficiencia de remoción (%)
1	0.05	4.71	60	5.	0.0423	91.02
2	0.05	9.12	60	5	0.0279	96.94**
3	0.05	23.17	60	5	0.0944	95.93
4	0.05	58.23	60	5	0.2694	95.37
5	0.05	98.22	60	5	25.970	72.25
6	0.05	254.1	60	5	7.85	69.11*

Nota. * valor mínimo obtenido, ** valor máximo obtenido. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 19, se exponen los resultados respecto a la concentración inicial óptima de Cadmio en el proceso de su remoción mediante la utilización de biomasa de Sankayo, se tiene que la mayor remoción se presentó con la concentración inicial de 10 mg/L, mientras que la menor remoción fue observada con 254.1 mg/L, atribuible a una saturación del metal en la solución.

Así mismo, otra investigación, evaluó la remoción de cadmio y plomo aplicando biomasa vegetal, hallando una remoción máxima de cadmio del 97,11% a una concentración inicial de 0,496 mg/L (Shabbirahmed et al., 2025), si bien la concentración inicial en este caso es menor que 10 mg/L, el estudio destaca la alta eficiencia de la biomasa en la remoción de cadmio a bajas concentraciones. Maaoui et al., (2023), también indicaron que con 0,3–0,5 g de biomasa, la remoción de cadmio fue máxima 80% a concentraciones de 20–25 mg/L, y disminuyó significativamente a valores superiores a 150 mg/L por saturación de los sitios disponibles. Estos resultados sugieren que la biomasa de *Echinopsis maximiliana* muestra un comportamiento similar, con alta eficiencia de remoción a concentraciones iniciales moderadas 10–25 mg/L y reducción del porcentaje de remoción cuando la concentración de Cd alcanza niveles altos 250 mg/L, reflejando la limitación de la capacidad adsorbente de los sitios activos.

Tabla 20

Prueba de rango múltiple de Tukey para determinar la concentración inicial óptima para la biosorción de cadmio

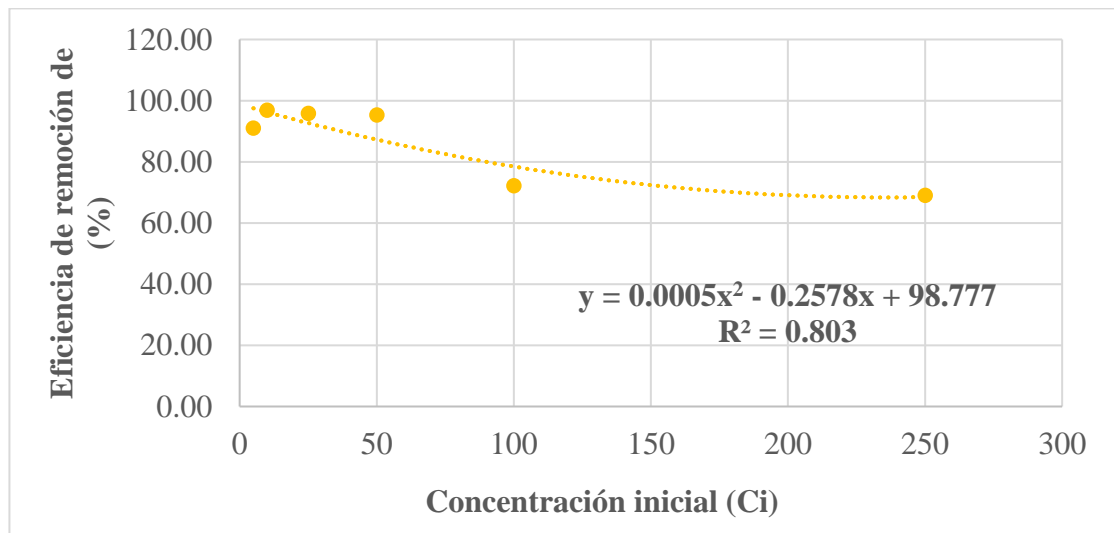
Concentración inicial (Ci)	Eficiencia de remoción (%)	Grupos Tukey
10	96.941	A
25	95.926	A B
50	95.374	B
5	91.019	C
100	72.250	D
250	69.107	E

Nota. Medias con diferente letra son estadísticamente diferentes ($p < 0.05$). Fuente: Elaboración propia.

Una vez aplicado el análisis estadístico de varianza, se determinó la existencia de diferencia estadística significativa para la fuente de variación de concentración inicial de Cadmio, en la Tabla 20 se muestra el resultado de la aplicación de la prueba de rango múltiple de Tukey, los mayores valores de remoción se obtuvieron para las concentraciones de 10 y 25 mg/L de Cadmio.

Figura 17

Determinación de la concentración inicial óptima para la biosorción de cadmio mediante biomasa del Sankayo (Echinopsis maximiliana)



Nota. Porcentajes de remoción de cadmio en función de las concentraciones iniciales. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 17, se expone la visualización de la tendencia de los porcentajes de remoción de cadmio en función de las concentraciones iniciales utilizadas, se observa que los mayores porcentajes de remoción se produjeron con las concentraciones

iniciales entre 10 y 25 mg/L, mientras que las mismas se redujeron a mayores concentraciones de Cadmio en la solución como 250 mg/L en donde se observó una saturación de Cadmio que redujo su remoción porcentual.

Lascari et al., (2025), reportaron que la *Opuntia ficus-indica* alcanza eficiencias de remoción de Cd de hasta 81,2% con concentraciones iniciales de 10 mg/L, pero esta eficiencia disminuye a 55–60% cuando la concentración inicial aumenta a 200 mg/L, debido a la saturación de los sitios activos. De manera similar, Prieto et al. (2024), observaron que las semillas de *Opuntia* removieron entre 51,8% y 66,3% de Cd²⁺ a concentraciones iniciales de 0,5 mg/L, pero la adsorción se redujo al superar 50 mg/L.

2.10.4. Eficiencia de remoción de cadmio (Cd) con biomasa de sankayo (*Echinopsis maximiliana*) con variación de tiempo de contacto.

Tabla 21

Determinación del tiempo de contacto óptimo para la biosorción de cadmio mediante biomasa del Sankayo (Echinopsis maximiliana)

Prueba N°	Biomasa (g)	Concentración inicial Cd (mg/L)	Tiempo (min)	pH	Concentración Final (mg/L)	Eficiencia de remoción (%)
1	0.05	254.1	0	5	1.881	92.60
2	0.05	254.1	5	5	1.972	92.24
3	0.05	254.1	10	5	1.861	92.68
4	0.05	254.1	20	5	1.792	92.95
5	0.05	254.1	30	5	2.035	91.99*
6	0.05	254.1	45	5	1.765	93.05
7	0.05	254.1	60	5	1.663	93.46
8	0.05	254.1	90	5	1.865	92.66
9	0.05	254.1	120	5	1.361	94.64**
10	0.05	254.1	180	5	1.574	93.81

Nota. * valor mínimo obtenido, ** valor máximo obtenido. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 21, se muestra la evaluación del tiempo óptimo de contacto para conseguir la remoción de Cadmio utilizando biomasa de Sankayo (*Echinopsis maximiliana*), se aplicaron tiempos desde cero min hasta los 180 min, la mayor remoción porcentual fue obtenida con 120 min de contacto, mientras que la menor se presentó al aplicar 5 y cero min.

Barbera et al., (2023) que la *Opuntia ficus indica* (OFI) sin tratar muestra una alta capacidad de adsorción. En 30 min a un pH de 5, 0,5 g de OFI son capaces de adsorber 87 mg/g de Cd. Estos valores son comparables con los de otros materiales adsorbentes

y, en algunos casos, superiores a los de materiales modificados. Así como también González et al. (2024), evaluaron la remoción de metales pesados, incluyendo cadmio, utilizando mucílago de *Opuntia ficus-indica* en agua contaminada del río Yautepec, México. Con 0,5 g de mucílago a pH 5 y un tiempo de contacto de 60 min, lograron remover hasta 85 % de Cd²⁺, destacando la efectividad de los grupos funcionales presentes en el mucílago para interactuar con los iones metálicos y su capacidad para actuar como un adsorbente natural eficiente y sostenible. Prieto et al. (2024), estudiaron la adsorción de cadmio utilizando semillas de *Opuntia ficus-indica* y otras especies de *Opuntia*. Con 0,5 g de biomasa y un tiempo de contacto de 60 min, lograron remover entre 51,8 % y 66,3 % de Cd²⁺, dependiendo de la especie utilizada, siendo *O. matudae* la de mejor desempeño para cadmio. Los resultados muestran que la biomasa de semillas de *Opuntia* presenta una capacidad de adsorción moderada a alta, atribuida a la disponibilidad de grupos funcionales y la superficie de contacto accesible para los iones metálicos.

Tabla 22

Prueba de rango múltiple de Tukey para determinar el tiempo de contacto óptimo para la biosorción de cadmio

Tiempo de contacto (min)	Eficiencia de remoción (%)	Grupos
120	94.644	A
180	93.806	A
60	93.455	A
45	93.054	A
20	92.948	A
10	92.676	A
90	92.660	A
0	92.597	A
5	92.239	A
30	91.991	A

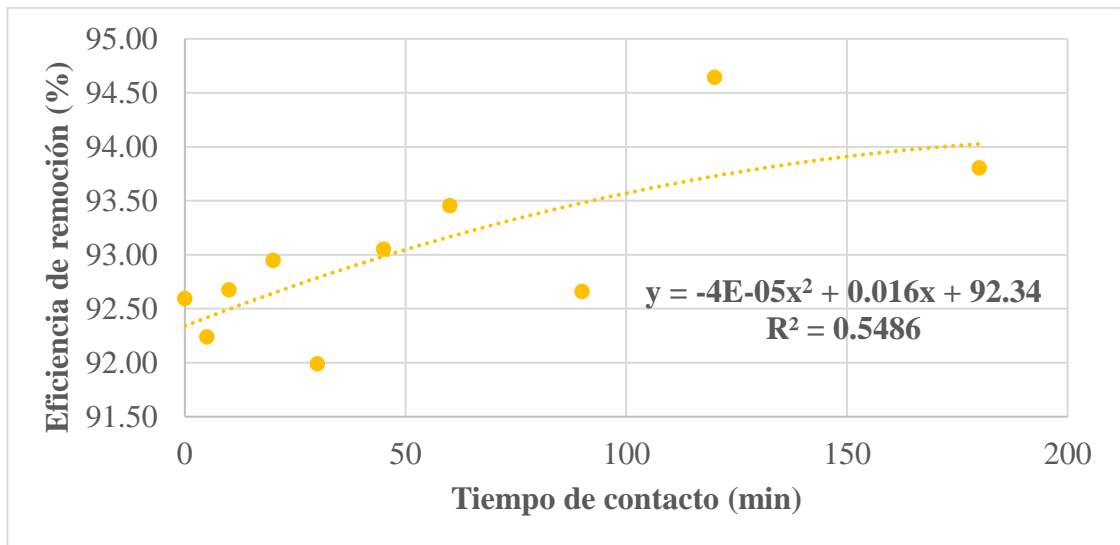
Nota. Medias con diferente letra son estadísticamente diferentes ($p < 0.05$). Fuente:

Elaboración propia.

Al ejecutar el análisis de varianza se obtuvo una significancia estadística ($p < 0.05$) para el tiempo de contacto, aplicando la prueba de rango múltiple de Tukey se obtuvo que, si bien todos los porcentajes de remoción son similares, el de mayor valor fue el obtenido con 120 min de contacto con el 94.64%, mientras que la menor remoción de 91.99% se presentó con el tiempo de contacto de entre cero a 30 min.

Figura 18

Determinación del tiempo de contacto óptimo para la biosorción de cadmio mediante biomasa del Sankayo (Echinopsis maximiliana).



Nota. porcentaje de remoción de cadmio respecto al tiempo de contacto de la biomasa.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 18, se muestra la tendencia del porcentaje de remoción de cadmio respecto al tiempo de contacto de la biomasa de sankayo (*Echinopsis maximiliana*)., a mayor tiempo de contacto se tiene una mayor remoción, si bien se observa una asíntota superior con 120 min, respecto al ajuste de un modelo cuadrático se observa que el mismo es regular con un coeficiente de determinación de 0.5480.

Al respecto, se tiene que el tiempo de contacto es fundamental en los procesos de biosorción, puesto que determina la duración necesaria para que los sitios activos de la biomasa interactúen eficazmente con los iones metálicos presentes en la solución (Alotaibi, 2023), además un tiempo de contacto adecuado asegura una máxima eficiencia de remoción, mientras que tiempos insuficientes pueden resultar en una adsorción incompleta, y tiempos excesivamente prolongados podrían no ofrecer beneficios adicionales significativos (García, 2021).

2.10.5. Isotermas de adsorción para cadmio

Una vez finalizada la etapa de optimización de los parámetros que maximizan el proceso de biosorción de cadmio utilizando biomasa de sankayo, se procedió al ajuste de los modelos estadísticos para explicar el comportamiento, tanto de la solución de plomo y el soluto formado por la biomasa vegetal.

a. Langmuir

Este modelo de la cinética de adsorción se caracteriza por ser un proceso homogéneo en el que el adsorbato (solución de cadmio) se adsorbe en forma de una monocapa (el espesor de la capa es del orden de una molécula) sobre el adsorbente (biomasa de Sankayo).

Tabla 23

Valores para ajustar la educación bajo el modelo de Langmuir para la biosorción de cadmio utilizando biomasa de sankayo (Echinopsis maximiliana)

C_o	C_e	Q	C_e/q
5	0.04	4.958	0.009
10	0.03	9.972	0.003
25	0.09	24.906	0.004
50	0.27	49.731	0.005
100	1.92	98.083	0.020
250	7.85	242.150	0.032

Nota. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 23, se presenta los valores que permiten calcular los parámetros de la ecuación bajo el modelo de Langmuir, se tiene la concentración inicial (C_o) y final (C_e) de la solución de cadmio, además del valor de q es la cantidad adsorbida por la biomasa. El modelo matemático fue el siguiente:

$$\frac{C}{q} = \frac{1}{b} C + \frac{1}{k.b} \quad (7)$$

Donde:

k : Fuerza de unión

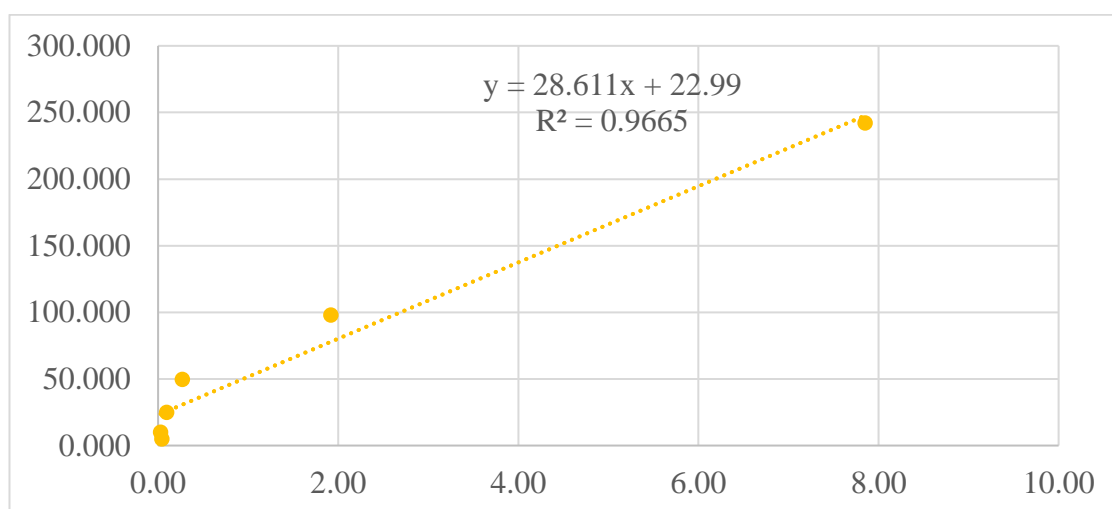
b : Cantidad máxima adsorbida

C : Cantidad en la solución

q : Cantidad adsorbida

Figura 19

Modelo de adsorción de Langmuir para la biosorción de cadmio mediante biomasa del Sankayo (Echinopsis maximiliana).



Nota. coeficiente de determinación para el modelo de Langmuir. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 19, se tiene que el coeficiente de determinación para el modelo de Langmuir es $R^2 = 0.9665$, sugiere un ajuste aceptable, aunque podría haber alguna desviación debido a otros procesos de adsorción (como adsorción en múltiples capas o interacciones no consideradas en este modelo).

En el contexto de la discusión, los resultados del presente estudio muestran un buen ajuste al modelo de Langmuir para la adsorción de cadmio sobre la biomasa de sankayo (*Echinopsis maximiliana*), con un $R^2 = 0.9665$, lo que indica que gran parte de la adsorción ocurre en sitios específicos de la superficie del biosorbente. Este comportamiento es consistente con lo reportado por Barbera et al., (2023), quienes observaron que 0,5 g de *Opuntia ficus-indica* alcanzan una capacidad de adsorción de 87 mg/g de Cd en 30 minutos, ajustándose al modelo de Langmuir con un $R^2 = 0.9975$, lo que sugiere que la adsorción se desarrolla principalmente en una monocapa sobre sitios bien definidos.

De manera similar, Prieto et al. (2024), observaron que la adsorción de Cd por semillas de *Opuntia* mostró una relación casi lineal con la concentración inicial hasta alcanzar un equilibrio, lo que respalda la hipótesis de una saturación gradual de los sitios activos.

Tabla 24

Valores para ajustar la ecuación bajo el modelo de Freundlich para la biosorción de cadmio utilizando biomasa de Sankayo (*Echinopsis maximiliana*)

C_o	C_e	q	C_e/q	$\text{Log } C$	$\text{Log } q$
5	0.03	4.97	0.01	-1.523	0.696
10	0.08	9.92	0.01	-1.097	0.997
25	0.19	24.81	0.01	-0.721	1.395
50	0.54	49.46	0.01	-0.268	1.694
100	1.84	98.17	0.02	0.265	1.992
250	7.65	242.36	0.03	0.884	2.384

En la Tabla 24 se exponen los valores numéricos necesarios para ajustar los resultados en un modelo de adsorción de Freundlich, se nota que se realiza una transformación logarítmica, lo cual linealiza el modelo, siendo la fórmula matemática la siguiente:

$$\log q = \frac{1}{n} \log C + \log K_d \quad (8)$$

Donde:

q : Cantidad de soluto adsorbido por unidad de masa del adsorbente (mg/g)

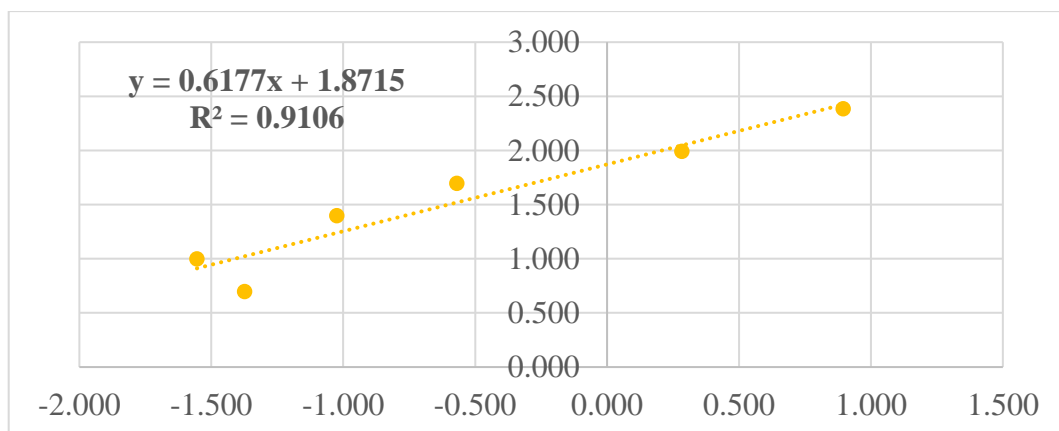
C : Concentración del soluto en equilibrio en la fase líquida (mg/L)

K_d : constante de Freundlich relacionada con la capacidad de adsorción

$1/n$: constante empírica relacionada con la intensidad de la adsorción

Figura 20

Modelo de adsorción de Freundlich para la biosorción de cadmio mediante biomasa del Sankayo (*Echinopsis maximiliana*).



Nota. Modelo ajustado a Freundlich. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 20, se observa el modelo ajustado a Freundlich, se tiene como principal característica que el coeficiente de determinación es $R^2=0.9106$, es menor ligeramente al reportado para el modelo previo.

Tabla 25

Valores de los parámetros del modelo de Freundlich para la biosorción de cadmio utilizando biomasa de Sankayo (Echinopsis maximiliana)

Ecuación $\text{Log } q = 0.6177 \text{ Log } C_e + 1.8715$				
$1/n$	n	$\text{Log } Kd$	Kd	R^2
0.6177	1.619	1.8715	74.388	0.9106

Nota. Valores para el modelo de Freundlich. Fuente: Elaboración propia.

La adsorción es favorable según los valores de $1/n = 0.6177$, $n = 1.619$, el coeficiente de distribución Kd es relativamente alto 74.388, lo que indica una buena capacidad de adsorción. El modelo de Freundlich tiene un buen ajuste a los datos experimentales $R^2=0.9106$, lo que sugiere que la adsorción ocurre en superficies heterogéneas con diferentes niveles de energía de adsorción.

Barbera et al., (2023), quienes señalaron que 0,5 g de *Opuntia ficus-indica* pueden adsorber hasta 87 mg/g de Cd en 30 min, mostrando un ajuste satisfactorio al modelo de Langmuir. Asimismo, Prieto et al. (2024), encontraron que las semillas de *Opuntia* presentan una alta afinidad por metales pesados como Cd, logrando eficiencias de adsorción superiores al 60% bajo condiciones similares. En conjunto, estos resultados confirman que la biomasa de sankayo (*Echinopsis maximiliana*) actúa como un adsorbente eficiente para cadmio, con un comportamiento típico de superficies heterogéneas y una buena capacidad de retención, coincidiendo con las tendencias observadas en otros estudios con especies de *Opuntia* y biomásas vegetales. En contraste Wattanakornsiri et al. (2022), lograron valores de remoción superiores al 97 % con cáscaras de frutas modificadas, evidenciando que los tratamientos químicos pueden incrementar el rendimiento.

Por lo cual se evidencia que la biomasa de *Echinopsis maximiliana* tiene un potencial comparable o incluso superior al de otros biosorbentes en la remoción de Cadmio, respaldando su aplicación en tratamientos de aguas contaminadas con metales pesados.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

2.1. Conclusiones

La caracterización fisicoquímica de la biomasa de Sankayo (*Echinopsis maximiliana*) evidenció un alto contenido de humedad 91,88 % y una composición elemental adecuada, determinada sin activación química mediante análisis EDS-Ultra Dry/ETD. El análisis FTIR permitió identificar grupos funcionales hidroxilo, carbonilo, carboxilo y enlaces C–O–C, y una matriz lignocelulósica, que actúan como sitios activos para la interacción con metales pesados. El análisis morfológico mostró una superficie irregular y porosa que incrementa el área disponible para la adsorción. En conjunto, estas características estructurales y químicas favorecen la retención de iones Pb^{2+} y Cd^{2+} mediante interacciones electrostáticas y fuerzas de Van der Waals, confirmando el potencial de la biomasa de Sankayo como un biosorbente eficiente.

La biomasa de Sankayo (*Echinopsis maximiliana*) mostró una alta eficiencia en la remoción de plomo (Pb) bajo condiciones óptimas de operación a un pH 5.5, a 0.5 g de biomasa, concentración inicial de 5 mg/L y un tiempo de contacto de 60 min. El ajuste de los datos experimentales al modelo de isoterma de Freundlich presentó un coeficiente de determinación elevado ($R^2 = 0.9902$), lo que confirma un proceso de adsorción favorable sobre superficies heterogéneas. En conjunto, estos resultados demuestran que el Sankayo constituye una alternativa natural, eficiente y sostenible para el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados.

La biomasa de Sankayo (*Echinopsis maximiliana*) presentó un alto desempeño en la remoción de cadmio (Cd) cuando se trabajó bajo condiciones óptimas, correspondientes a un pH de 5, una dosificación de 0.5 g de biomasa, una concentración inicial de 10 mg/L y un tiempo de contacto de 120 min. El análisis de los datos experimentales mostró un buen ajuste al modelo de isoterma de Langmuir, con un coeficiente de determinación elevado $R^2 = 0.9665$, lo que indica un mecanismo de adsorción principalmente monocapa, asociado a sitios activos homogéneos con marcada afinidad por el ion cadmio. Los resultados confirman que la biomasa de sankayo posee propiedades fisicoquímicas favorables para la remoción de metales pesados, consolidándose como una alternativa natural, económica y eficiente para la remediación de aguas contaminadas con cadmio.

2.2. Recomendaciones

- Se recomienda realizar investigaciones orientadas a optimizar el proceso de preparación y acondicionamiento de la biomasa de Sankayo (*Echinopsis maximiliana*), considerando otros factores que no fueron evaluados en el presente estudio, tales como el tamaño de partícula, métodos de pretratamiento químico o térmico, y condiciones de secado, con la finalidad de mejorar su capacidad de adsorción.
- Se recomienda realizar investigaciones que permitan mejorar la adsorción de metales pesados y otros contaminantes presentes en el agua, utilizando biomasa de Sankayo (*Echinopsis maximiliana*) y/o biosorbentes de características similares o superiores, con la finalidad de ampliar su eficiencia y aplicabilidad en procesos de tratamiento de aguas contaminadas con metales.
- Se recomienda que futuras investigaciones evalúen el efecto de la temperatura en la remoción de metales mediante biomasa de Sankayo (*Echinopsis maximiliana*), a fin de comprender el comportamiento del proceso bajo diferentes condiciones térmicas y optimizar su aplicación en el tratamiento de aguas contaminadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Abdelkarim, M. S., Ali, M. H. H., & Kassem, D. A. (2025). Ecofriendly remediation of cadmium, lead, and zinc using dead cells of *Microcystis aeruginosa*. *Scientific Reports*, 15(1), 3677. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-86884-1>
- Acuña, C. (2020). *Estudio comparativo bibliográfico de tres adsorbentes naturales, utilizados para biorremediar aguas contaminadas con mercurio en la explotación aurífera*. Universidad Nacional de Chimborazo.
- Aguilar, J., Urbina, M., Rodríguez, B., León, S., Luna, I., & Cárdenas, D. (2022). *applied sciences Development and Characterization of Bioadsorbents Derived from Different Agricultural Wastes for Water Reclamation* : <https://doi.org/10.3390/app12052740>
- Aguilar, M., & Pereda, J. (2020). *Influencia del pH, el tipo y dosis de biosorbente en la biosorción de metales pesados de un efluente minero, usando Saccharomyces sp y Penicillium sp* (Vol. 1). Universidad Nacional de Trujillo.
- Ahmed, M. (2022). Methodology of scientific research and its modern divisions. *International Journal of Cultural Inheritance & Social Sciences (IJCISS)*, 4(March).
- Al, I., Horváth, M., Alkilani, A., Al-Ma'abreh, A., Bashir, M., Keshta, B., Hanbali, G., Al Zoubi, W., Abukhadra, M., & Alqhtani, H. (2025). Simultaneous Adsorptive Removal of Pb^{2+} , Cd^{2+} , Cu^{2+} , and Zn^{2+} Using Raw Norway Spruce Biomass: A Low-Cost and Eco-Friendly Solution for Wastewater Treatment. *Frontiers in Water*, 7(July), 1612232. <https://doi.org/10.3389/frwa.2025.1612232>
- Alotaibi, M. O. (2023). Effect of cadmium and lead on the morphology and protein profile of *Calligonum comosum* seeds. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 11(January), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1308943>
- Alva, I. (2022). *Etnobotánica de plantas silvestres alimenticias de la comunidad campesina Janac Chuquibamba, provincia de Calca, departamento de Cusco*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Arones, C., & Perez, K. (2024). *Eficiencia de los adsorbentes naturales de opuntia ficus-indica (tuna) y selenicereus megalanthus (pitahaya) en la remoción de plomo (pb) en aguas del río Rímac, Lurigancho - Chosica , Lima*. <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/44229?locale-attribute=en>
- Baird, C., & Cann, M. (2021). *Química ambiental* (Primera). Reverté.
- Bala, K. N. (2025). Biosorption of Cadmium from Freshwater Cultured with (Nile Tilapia) using Neem Leaf Aqueous Extract (NLAE). A Review. *Open Journal Environmental Biology*, 10(1), 1–6.

- Barbera, M., Indelicato, S., Bongiorno, D., Censi, V., Saiano, F., & Piazzese, D. (2023). *Untreated Opuntia ficus indica for the Efficient Adsorption of Ni(II), Pb(II), Cu(II) and Cd(II) Ions from Water*. <https://doi.org/10.3390/molecules28093953>
- Birgili, B., Haykiri-Acma, H., & Yaman, S. (2024). Biosorption of lead, hexavalent chrome and cadmium from aqueous solution by torrefied biomass. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 21(12), 8049–8062. <https://doi.org/10.1007/s13762-024-05507-w>
- Cabrera, D. (2018). *Evaluación de la capacidad de biosorción de plomo (II) empleando biomasa vegetal inerte (tallo de rosas) como adsorbente*. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Cabrera, Daysy. (2018). *Evaluación de la capacidad de biosorción de plomo (II) empleando biomasa vegetal inerte (tallo de rosas) como adsorbente empleando biomasa vegetal inerte (tallo de rosas) como adsorbente*. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/8217>
- Canales, H., Cabrera, C., & Arana, J. (2022). Aquatic macroinvertebrates and water quality in the Ventanilla Wetlands Regional Conservation Area, Callao. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 25(49), 295–301. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v25i49.23013>
- Carvajal, E., & Marulanda, L. (2020). Uso de residuos de café como biosorbente para la remoción de metales pesados en aguas residuales. *Ingenierías USBMed*, 11(1), 44–55. <https://doi.org/10.21500/20275846.4477>
- Chan-Keb, C. A., Agraz, C. M., & Pérez, R. A. (2021). *Química Ambiental* (Primera). ECORFAN.
- Chiroque, R. (2024). Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. *Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo*, 15. <http://repositorio.unprg.edu.pe/handle/UNPRG/8414>
- Choque, M. (2024). *Contaminación ambiental por metales pesados en el río Piñog Condesuyos - Arequipa, 2022* (Vol. 15, Issue 1). Universidad Tecnológica del Perú.
- Correa, O., Fuentes, F., & Coral, R. (2021). Contaminación por metales pesados de la microcuenca agropecuaria del Río Huancaray– Perú. *Revista de La Sociedad Química Del Perú*, 87(1), 26–38. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v87i1.320>
- Demirbas, A. (2008). *Heavy metal adsorption onto agro-based waste materials : A review*. 157, 220–229. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.01.024>
- Dong, X., Zhang, Y., Shao, S., & Li, H. (2025). *Application of Lignin-Derived Carbon Materials in Adsorption and Separation*. <https://doi.org/10.3390/separations12040088>

- Duany, S., Arias, T., Bessy, T., & Rodríguez, D. (2022). Bioadsorbentes no convencionales empleados en la remoción de metales pesados. Revisión. *Tecnología Química*, 42(1), 94–113.
- Elmatsani, H. M., Munarso, A. J., Rahardjo, Y. P., Benyamin, B. O., Sjafrina, N., Astuti, P., Arianto, A., Lukas, A., & Djafar, M. J. (2024). Reducing Cadmium and Lead Contamination in Cacao: A Bibliometric Analysis of 10 Years of Research Using Bibliometrics. *BIO Web of Conferences*, 101, 1–17. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202410101011>
- Etchegoyen, M. A., Marino, D., & Capparelli, A. (2020). *Tópicos de Química y Fisicoquímica Ambiental* (Primera). Universidad Nacional de la Plata. <https://doi.org/10.35537/10915/95979>
- FAO. (2021). *El estado de los recursos de tierra y agua del mundo para la alimentación y la agricultura*. <https://openknowledge.fao.org/items/2ca2dc78-4a70-4ae3-becc-454ce71a74b6>
- FAO. (2023). *Hacia un uso más eficiente del agua*. 4–7. <https://openknowledge.fao.org/items/05f0442b-0759-4e3d-8e39-b6b25668708b>
- Flores, M. M., Alvarado, J. B., Villaverde, S. I., Cauper, G. G., Saavedra, M. A., & Quispe, D. P. (2025). *Heavy metal content in peruvian fish : a systemic review*. 12, 131–141. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S2409-16182025000100131&script=sci_arttext&tlng=es
- Fonseca, A. (2021). Enfermedades por exposición ocupacional a plomo: revisión sistemática exploratoria de la evidencia cualitativa y cuantitativa. *Revista San Gregorio*, 47(1), 198–221.
- Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2010). *Insights into the modeling of adsorption isotherm systems*. 156, 2–10. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.013>
- GAHP. (2020). *La carga global de la enfermedad por contaminación de plomo* (pp. 7–8).
- Gao, M., Ling, N., Tian, H., Guo, C., & Wang, Q. (2024). Toxicity, physiological response, and biosorption mechanism of *Dunaliella salina* to copper, lead, and cadmium. *Frontiers in Microbiology*, 15(March), 1–19. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1374275>
- García, A. (2021). *Determinación de la capacidad de bioadsorción de metales pesados mediante el uso de la cáscara de maracuyá (Passiflora edulis) en aguas contaminadas*. Universidad Politécnica Salesiana.
- García, L. (2020). *Uso de cáscaras de Colocasia esculenta para la biosorción de plomo en*

- aguas subterráneas del Distrito de Mórrope*. Universidad César Vallejo.
- Gonzaga, A., Rimaycuna, J., Cruz, G. J. F., Herrera, E., Gómez, M., Solis, J., Cruz, J., & Keiski, R. (2021). Removal of lead present in aqueous solutions using biochar produced from corn cob. *Manglar*, 18(1), 35–43. <https://doi.org/10.17268/manglar.2021.005>
- González, E., Rodríguez, F., Vargas, S. V., Osorio, A., Jonathan, M. P., & Campos, L. E. (2024). Effect of the concentration of uronic acids in Opuntia mucilage on the removal of heavy metals and water quality of the Yautepec River, México. *Arabian Journal of Chemistry*, 17(3). <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2024.105636>
- Gouda, S. A., & Taha, A. (2023). *Biosorption of Heavy Metals as a New Alternative Method for Wastewater Treatment*. 27(2), 135–153. <https://doi.org/10.3390/app12052740>
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativas y mixta*. <https://bellasartes.upn.edu.co/wp-content/uploads/2024/11/METODOLOGIA-DE-LA-INVESTIGACION-Sampieri-Mendoza-2018.pdf>
- Hernández, S., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Medodologí de la investigación*. https://www.paginaspersonales.unam.mx/app/webroot/files/981/Investigacion_sampieri_6a_ED.pdf
- IPCC. (2023). *Informe de síntesis del AR6 Cambio climático 2023*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- Irfan, M. (2024). Biosorption of cadmium from industrial waste. *Journal of Biochemical Sciences*, 1(1), 16–23. <https://doi.org/10.61577/jbs.2024.100004>
- James, M., & Zimmerman, J. (2023). *Ingeniería ambiental Fundamentos, sustentabilidad, diseño* (Primera). Alfa Omega.
- Kumar, A., Mukherjee, G., Ahuja, V., Gupta, S., Tarighat, M. A., & Abdi, G. (2024). Biosorption and transformation of cadmium and lead by Staphylococcus epidermidis AS-1 isolated from industrial effluent. *BMC Microbiology*, 24(1), 12. <https://doi.org/10.1186/s12866-024-03568-y>
- Lascari, D., Lo, P., Geraci, G., Lo, R., Giovanni, S., Raccuia, M., Muratore, N., Cataldo, S., Lando, G., Madonia, E., Tolazzi, M., Melchior, A., & Pettignano, A. (2025). Journal of Environmental Chemical Engineering Insight into the adsorption of Pb 2 + ions onto Opuntia ficus indica cladodes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(5), 118686. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.118686>
- Lavado, C., De la Cruz, L., Lavado, C., Angeles, J., & Dávalos, J. (2023). Efficient lead

- Pb(ii) removal with chemically modified nostoc commune biomass. *Molecules*, 28(1), 1–16. <https://doi.org/10.3390/molecules28010268>
- Lavado, C., Sun-Kou, M., Castro, T., & Bonilla, H. (2020). Biosorción de plomo (II) en solución acuosa con biomasa de los cladodios de la tuna (*Opuntia ficus indica*). *Revista Colombiana de Química*, 49(3), 36–46. <https://doi.org/10.15446/rcq.v49n3.85823>
- Leon, D. (2023). *Biosorción de metales pesados totales de agua residual de la mina La Rinconada con biomasa de waraqqo (Echinopsis maximiliana)*. Universidad Nacional del Altiplano.
- León, D. (2024). Biosorción de metales pesados totales de agua residual de la mina la Rinconada con biomasa de Waraqqo (*echinopsis maximiliana*) 2022 – 2023. *Revista de Investigaciones*, 13, 77–90. <https://doi.org/10.26788/ri.v13i2.6195>
- LibreTexts. (2022). *Espectroscopia IR*. Obtenido de En Métodos físicos en química y nanociencia:https://espanol.libretexts.org/Bookshelves/Quimica/Qu%C3%ADmica_Anal%C3%ADtica/M%C3%A9todos_F%C3%ADsicos_en_Qu%C3%ADmica_y_Nano_Ciencia_%28Barron%29/04%3A_Especiacion%C3%B3n_qu%C3%ADmica/4.02%3A_Espectroscopia_IR.pdf
- Liu, S., Xu, X., He, C., Liu, Z., & Li, Y. (2024). Biosorption of Pb²⁺, Cd²⁺ and Zn²⁺ from aqueous solutions by *Agrobacterium tumefaciens* S12 isolated from acid mine drainage. *Sustainable Environment Research*, 34(1), 10. <https://doi.org/10.1186/s42834-024-00233-x>
- Llanos, M., Muñiz, A., Muñiz, M., Vílchez, G., & Cotrina, G. (2024). Contaminación por metales pesados de microcuenca del río Alto Huallaga y suelos agrícolas. *Revista Alfa*, 8(22), 41–48. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v8i22.246>
- López, S., Huertas, D., Jaramillo, A., Calderón, D., & Díaz, J. (2022). Macroinvertebrados acuáticos como indicadores de calidad del agua del río Teusacá (Cundinamarca, Colombia). *Ingeniería y Desarrollo*, 37(02), 269–288. <https://doi.org/10.14482/inde.37.2.6281>
- Loya, J. (2022). *Remoción de arsénico y cadmio en agua usando zeolitas como material adsorbente*. Centro de Investigación en Materiales Avanzados.
- Luque, D. (2024). *Estudio de biomasa leñosa para generación energética doméstica en la comunidad nativa mariscal castilla, provincia de requena, distrito de Saquena- 2024*. February, 4–6. <https://doi.org/http://hdl.handle.net/11056/26582>
- Maaoui, A., Ben, A., Trabelsi, H., Hamdi, M., Chagtmi, R., Jamaoui, F., Lopez, G., Cortazar, M., & Olazar, M. (2023). Towards local circular economy through *Opuntia Ficus Indica* cladodes conversion into renewable biofuels and biochars : Product

- distribution and kinetic modelling. *Fuel*, 332(P2), 126056.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126056>
- Mamani, J. R. (2024). *Adsorción del plomo (Pb) empleando biomasa de Musa paradisiaca, en aguas procedentes de la cuenca del río Ramis – Azángaro, 2023*. Tesis Ingeniero Ambiental y Forestal. Universidad Nacional de Juliaca.
- Marhasova, V., Garafonova, O., Derii, Z., & Rudenko, O. (2022). Scientific research methodology as a general approach and perspective of the research process. *Herald of Khmelnytskyi National University. Economic Sciences*, 312(6(2)), 328–334.
[https://doi.org/10.31891/2307-5740-2022-312-6\(2\)-55](https://doi.org/10.31891/2307-5740-2022-312-6(2)-55)
- Maza, J., Sánchez, A. W., Carmona, N. C., Poma, D. A., & Añazco, H. E. (2023). *Dry biomasses for biosorption of metals in mining wastewater*. 8(2), 133–145.
- Mena, M., & Perez, X. (2021). *Capacidad adsorbente de metales pesados utilizando materiales Lignocelulósicos en aguas contaminadas: Revisión sistemática*. Universidad César Vallejo.
- MIDAGRI. (2020). *Informe de monitoreo de la red de aguas superficiales lago Titicaca (Crucero Hidroquímico)* (p. 120). PELT.
- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2018). *Estudio de desempeño ambiental*.
- Muñoz, C. (2021). *Metodología de la investigación* (1st ed.). Oxford University Press.
- Na, Y., Lee, J., Lee, S. H., Kumar, P., & Kim, J. H. (2020). Removal of heavy metals by polysaccharide : a review Removal of heavy metals by polysaccharide : a review. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 00(00), 1–21.
<https://doi.org/10.1080/25740881.2020.1768545>
- Nascimento, T. L. S., Oliveira, K. F. S., Junior, J. O. D., Pimenta, A. S., Melo, D. M. A., Melo, M. A. F., & Braga, R. M. (2024). Biosorption of nickel and cadmium using *Pachira aquatica* Aubl. peel biochar. *Scientific Reports*, 14(1), 1–14.
<https://doi.org/10.1038/s41598-024-54442-w>
- Nouri, H., Abdedayem, A., Hamidi, I., Souissi, S., & Ouederni, A. (2021). *Biosorption of lead heavy metal on prickly pear cactus biomaterial : kinetic , thermodynamic and regeneration studies*.
https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Biosorption+of+lead+heavy+metal+on+prickly+pear+cactus+biomaterial:+Kinetic,+thermodynamic+and+regeneration+studies&author=Nouri,+H.&author=Abdedayem,+A.&author=Hamidi,+I.&author=Najjar,+S.S.&author=Ouederni,+A.&publication_year=2021&journal=Cellul.+Chem.+Technol.&volume=55&pages=919-

- OMS. (2024). *Saneamiento*. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/sanitation>
- Pabón, S., Benítez, R., Sarria, R., & Gallo, J. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. *Entre Ciencia e Ingeniería*, *14*(27), 9–18.
- Pari, J., & Taype, C. (2020). *Evaluación del efecto antioxidante in vitro y antidislipidémico in vivo de los extractos de Corryocactus brevistylus (Sancayo) y Echinopsis maximiliana (Sank'ayu) en animales de experimentación*. Universidad Católica Santa María.
- Parra, J., & Pérez, H. (2023). Estimación de materiales lignocelulósicos residuales como adsorbentes de cromo y plomo. *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, *21*(1), 18–27.
- Phiri, J. T., & Oh, S. (2024). Biosorption of Cd(II), Co(II), and Cu(II) onto Microalgae under Acidic and Neutral Conditions. *Sustainability (Switzerland)*, *16*(15), 15. <https://doi.org/10.3390/su16156342>
- Pillaca, K. (2023). *Capacidad de descontaminación de iones de Cadmio (Cd) mediante tallos de Scirpus californicus en aguas contaminadas*. [UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ]. https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/9344/T010_46186953_M.pdf?sequence=3
- Prieto, F., Trejo, N., & Prieto, J. (2024). *Semillas de opuntias como materiales en la bioadsorción de cadmio y manganeso* (pp. 26–40). <https://doi.org/10.29057/aactm.v1i1.9929>
- Quispe, E., & Torres, R. (2024). *Remoción de metales pesados utilizando mucílago de cactus en la laguna Smelter de Cerro de Pasco, Perú - 2023*. https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/14752/3/IV_FIN_110_TE_Quispe_Torres_2024.pdf
- Quispe, K. (2023). *Estimación de la efectividad de las Streptophyta Mougeotia sp. y Spirogyra sp. del Río San Juan, Pasco en la fitorremediación de aguas que contienen cobre y plomo*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Rahman, A. (2024). Promising and Environmentally Friendly Removal of Copper, Zinc, Cadmium, and Lead from Wastewater Using Modified Shrimp-Based Chitosan. *Water (Switzerland)*, *16*(1), 14. <https://doi.org/10.3390/w16010184>

- Revathi, K. B., Mimansa, Aishwarya, M., Madhlika, P. S., Apeksha, A., Rajeswari, N., & George, K. S. (2024). Cadmium biosorption: Lake waters in Bengaluru-mitigation of cadmium-induced oxidative stress by *Selaginella bryopteris*. *Water Science*, 38(1), 311–323. <https://doi.org/10.1080/23570008.2024.2343582>
- Riveros, R., & Huaman, J. (2022). *Concentración de metales pesados (Hg, As, Cd, Pb, Cu, Zn) en aguas del río escalera en el distrito de huachocolpa, Huancavelica, 2021*. <https://hdl.handle.net/20.500.14597/4619>
- Rodriguez, M. (2021). *Remoción de metales usando biomasas*. Universidad Nacional del Altiplano.
- Samimi, M. (2024). Efficient biosorption of cadmium by *Eucalyptus globulus* fruit biomass using process parameters optimization. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 10(1), 27–38. <https://doi.org/10.22034/gjesm.2024.01.03>
- Serra, J. De, Reséndiz, P. T., Susana, M., & Ramírez, D. (2024). *Presence of heavy metals in the Jalpan de Serra reservoir , Querétaro , México*. 52–58. <https://www.scielo.cl/pdf/riat/v20n1/0718-235X-riat-20-01-52.pdf>
- Shabbirahmed, A., Jacob, A., Dey, P., Somu, P., & Haldar, D. (2025). Biomass as eco-friendly adsorbents for the removal of emerging pollutants from wastewater: A review. *Shabbirahmed et Al. Discover Applied Sciences*, 7(7), 771.
- Tejada, C., Bonilla, H., Villabona, A., Ortega, R., & Licares, J. (2021). *Effect of the adsorbent dose and initial contaminant concentration on the removal of Pb(II) in a solution using Opuntia ficus Indica shell Efecto*. 8(3). <https://rmiq.org/iqfvp/Numbers/V20/No2/IA2134.pdf>
- Tellez, A. T. (2021). Química ambiental. In *Química Ambiental* (Prmera). Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua.
- Tellez, M., Bautista, L., Trejo, B., & Tamayo, M. (2020). Análisis de la distribución nacional de intoxicación por plomo en niños de 1 a 4 años. Implicaciones para la política pública en México. *Salud Publica de Mexico*, 62(6), 627–636. <https://doi.org/10.21149/11550>
- Ticlia, P. (2021). *Determinación de Plomo, Cadmio y Arsénico por espectrofotometría de absorción atómica en aguas del río grande distrito de Huamachuco - 2019*. Universidad Nacional de Trujillo.
- Torres, B. M., Garibaldi, A. F., Del Carmen Rizo, L., Puebla, A. M., Figuera, L. E., Zúñiga, G. M., Gómez, B. C., Gutiérrez, I. A., Scott, E. H., Vázquez, V., Gazcón, C. P., & Gallegos, M. P. (2025). *Lead Poisoning in the Americas : Sources , Regulations ,*

- Health Impacts , and Molecular Mechanisms*. 1–20. 10.3390/jox15040134.
- Trachtenberg, S., & Mayer, A. M. (1981). Composition and properties of *Opuntia ficus-indica* mucilage. *Phytochemistry*, 20(12), 2665–2668. [https://doi.org/10.1016/0031-9422\(81\)85263-6](https://doi.org/10.1016/0031-9422(81)85263-6)
- Usedo, P., Segura, R., Ccaza, M., & Almanza, W. (2025). *Efecto del mucílago de nopal y tiempo de agitación sobre los parámetros fisicoquímicos y remoción de arsénico (V) de agua contaminada, Moquegua, 2022.* 521–530. <https://doi.org/10.56469/rcti.v23i34.1760521>
- Vásquez, A. B., Valdez, E. C., & Fuentes, V. (2021). *Ingeniería ambiental* (Primera). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Venkadeshwaran, K., Bibhu, V., Rani, R., & Meher, D. K. (2025). *Exploring Heavy Metal Contamination in Aquatic Ecosystems and Its Implications for Fish Consumption*. 10(1), 231–243. <https://doi.org/10.28978/nesciences.1643512>
- Vizcaíno, L., Fuentes, N., & González, H. (2017). Adsorción de plomo (II) en solución acuosa con tallos y hojas de *Eichhornia crassipes*. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 20(2), 435–444. <https://doi.org/10.31910/rudca.v20.n2.2017.400>
- Volpe, M., Adair, J., & Gao, L. (2025). Sustainable treatment of naturally occurring heavy metals in sicilian water via hydrothermal carbonization, secondary biofuel extraction, and activation of *Opuntia ficus indica*. *Chemical Engineering Journal*, 505(4), 12. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894724105219>
- Wan, Y., Huang, Q., Wang, Q., Yu, Y., Su, D., Qiao, Y., & Li, H. (2020). Accumulation and bioavailability of heavy metals in an acid soil and their uptake by paddy rice under continuous application of chicken and swine manure. *Journal of Hazardous Materials*, September 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121293>
- Wattanakornsiri, A., Rattanawan, P., Sanmueng, T., Satchawan, S., Jamnongkan, T., & Phuengphai, P. (2022). Local fruit peel biosorbents for lead (II) and cadmium (II) ion removal from waste aqueous solution : A kinetic and equilibrium study. *South African Journal of Chemical Engineering*, 42(July), 306–317. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2022.09.008>
- Weldu, Y., Ahn, Y., Kye, H., Jung, Y., & Yoon, Y. (2018). Adsorption of Pb 2 + and Zn 2 + from aqueous solutions using dried powder of cactus *Opuntia* : characterization , adsorption capacity and kinetics. *Desalination and Water Treatment*, 135(November 2017), 330–340. <https://doi.org/10.5004/dwt.2018.22309>

ANEXOS

Anexo I. Operacionalización de variables

Variables	Dimensión	Nivel	Unidad	Instrumento
Variable independiente	Biomasa de Sankayo	Concentración de Sankayo	0.05, 0.10, 0.25, 0.50 y 1.00	g Gravimetría (Peso).
		Concentración de plomo y cadmio	Inicio: 5, 10, 25, 50, 100, 250, Final: Inicio: 5, 10, 25, 50, 100, 250 Final:	mg/L Espectrofotometría de absorción atómica.
Variable dependiente	Remoción de Plomo y Cadmio	pH	3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0, y 7.5	unidades pH-metro.
		Tiempo de exposición	0, 5, 10, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240, 300	min Cronometro.

Anexo II. Análisis estadístico

Prueba de Normalidad

pH	Shapiro-Wilk		Sig.
	Estadístico	gL	
3.5	1	3	1.00
4	1	3	1.00
4.5	1	3	1.00
5	1	3	1.00
5.5	1	3	1.00
6	1	3	1.00
6.5	1	3	1.00
7	1	3	1.00
7.5	1	3	1.00

Para el factor pH, se cuenta con solo tres repeticiones los resultados indica una probabilidad de 1, que se interpreta que no son diferentes a una distribución normal, sin embargo, las repeticiones son insuficientes para un análisis concluyente. Por lo que no se muestra dicho análisis para todos los factores.

ANOVA para determinación de pH óptimo para la biosorción de plomo

Fuente	GL	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F	Pr > F
pH	8	0.682	0.085	8.531	< 0.0001
Error	18	0.180	0.010		
Total, corregido	26	0.862			

ANOVA para determinación de cantidad de biomasa óptimo para la biosorción de plomo

Fuente	GL	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F	Pr > F
Biomasa	19	9357.843	492.518	342.026	< 0.0001
Error	40	57.600	1.440		
Total, corregido	59	9415.443			

ANOVA para determinación de concentración inicial óptima para la biosorción de plomo

Fuente	GL	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F	Pr > F
Concentración inicial	5	623.574	124.715	779.468	< 0.0001
Error	12	1.920	0.160		
Total, corregido	17	625.494			

ANOVA para determinación de tiempo de contacto óptimo para la biosorción de plomo

Fuente	GL	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F	Pr > F
Tiempo (min)	9	913.794	101.533	35.132	< 0.0001
Error	20	57.800	2.890		
Total, corregido	29	971.594			

ANOVA para determinación de pH óptimo para la biosorción de Cadmio

Fuente	GL	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F	Pr > F
pH	8	9.254	1.157	115.676	< 0.0001
Error	18	0.180	0.010		
Total, corregido	26	9.434			

ANOVA para determinación de cantidad de biomasa óptimo para la biosorción de Cadmio

Fuente	GL	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F	Pr > F
Modelo	4	14.506	3.626	1.415	0.277
Error	15	38.445	2.563		
Total, corregido	19	52.951			

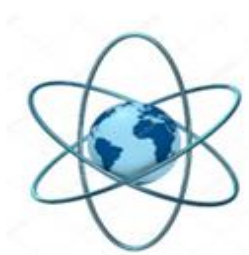
ANOVA para determinación de concentración inicial óptima para la biosorción de Cadmio

Fuente	GL	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F	Pr > F
Concentración inicial	5	87.786	17.557	109.732	< 0.0001
Error	12	1.920	0.160		
Total, corregido	17	89.706			

ANOVA para determinación de tiempo de contacto óptimo para la biosorción de Cadmio

Fuente	GL	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F	Pr > F
Tiempo (min)	9	913.794	101.533	35.132	< 0.0001
Error	20	57.800	2.890		
Total, corregido	29	971.594			

Anexo III. Ficha de compra de solución estándar



JF IMPORTACIONES
DE: JOSE FERNANDO PATAZCA GUTIERREZ
BIENES Y SERVICIOS
Telfs. 950108320
RUC 10073011685
jf-import@hotmail.com

Lima, 18 de Julio de 2025

Señores:
Yanet Martha MAMANI FLORE
PRESENTE.-

Estimados Señores:
Sirvanse tomar nota de lo sgte:

		<i>P.Unit</i>	<i>S/</i>	<i>P.Total</i>
1) 01 Fco	Solucion de Cadmio Standar para absorcion Atomica			220.00
	Fco x 500 MI EM SCIENCE			
2) 01 Fco	Solucion de Plomol Standar Para Abscorcion Atomica			220.00
	Fco x 500 MI EM SCIENCE			

Condiciones: *Contado Neto Previo abono en Cuenta Bancaria*
N 193-98218996-0-04; CCI N* 002-19319821899600418*
a nombre de: JOSE FERNANDO PATAZCA GUTIERREZ;
Banco de Credito del Peru (S/.)

Entrega: *02 dias Maximo, de recibida su confirmacion y entregada*
En Agencia por recoger

Oferta: *Valida por 30 dias.*

Garantía: *2 años*

Muy Atentamente

JOSE FERNANDO PATAZCA G
Representante

Anexo IV. Informe de análisis EDT/EDS de la biomasa de sankayo (*Echinopsis maximiliana*)

	CENTRO DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA	INFORME DE RESULTADOS N° 102- 2025-CME-UNSA	Código:	IR-MEB-088-25
			Fecha:	12/11/2025
			Versión:	1.1
			Página:	1 de 2

A:	Mamani Flores Yanet Marta	N° de Servicio:	088
De:	Dra. Daisy Margarita Gonzalez Diaz	N° boleta / factura:	B220-0000002
Asunto:	Caracterización morfológica y análisis químico elemental	Cod. de muestra:	(511)-MEB-2025

Tipo/ Muestra	Muestra orgánica	N° Muestras:	1
Equipo:	Microscopio Electrónico de Barrido, modelo Scios 2 Dual Beam, marca Thermo Scientific	Horas/ Trabajo:	0.5

Descripción de la muestra:

RECEPCIÓN DE MUESTRA: Se recibió 1 muestra (solidas) para analizar las características morfológicas y químico elemental, el material que se analizara son partículas solidas con variación de diámetro de grano (se tuvo documentación de referencia entregada virtualmente).

Preparación de la muestra:

PREPARACIÓN DE MUESTRA: Se procedió a habilitar Stup de aluminio (soporte) recubriéndolos con una cinta doble cara de carbono para fijar las muestras, luego se agregó la muestra que se analizara en la cinta de carbono del stup y finalmente recubrimos la muestra con oro por pulverización catódica con el equipo metalizador modelo Q150R ES Plus marca Quorum, durante el tiempo de 2 min. Esto se repite para cada muestra ensayada.

Análisis:

Se realizó el análisis morfológico, contraste Z y químico elemental en el microscopio electrónico de barrido del Centro de Microscopia Electrónica de la UNSA.

- **ANÁLISIS MORFOLÓGICO:** se realizó el ensayo con el detector ETD, a una distancia de trabajo de 8-12mm, el análisis se realizó a 20.00 Kv, las magnificaciones de realizaron de 150x – 20 000x según el interés del cliente, para mayor información revisar las micrografías.
- **ANÁLISIS QUIMICO ELEMENTAL:** se realizó el ensayo con el detector EDS-Ultra Dry, los análisis se realizaron por área y/o puntual. Los nombres de los documentos PDF exportados de los análisis EDS están directamente relacionados con el nombre de las micrografías morfológicas.

Conclusiones:

El análisis se realizó el 04 de noviembre del 2025. Durante el análisis de la muestra, se obtuvo: 25 micrografías y 4 análisis EDS. Para mayor información verificar el análisis puntual y de área de cada muestra. Se recomienda no tomar en cuenta los análisis EDS que tengan picos menores a 1000 señales o cuentas, debido que el área o punto analizado presenta inclinaciones o algún otro defecto que afecta los resultados.
 Link: https://drive.google.com/drive/folders/1ddhEs96DWRkw93meeMyktba-zhgC9nQ9?usp=drive_link
 La data recolectada durante el análisis fue extraída y almacenada en una carpeta drive propia del CME, el link será enviado por correo junto con este doc. (la data se eliminará dentro de 1 mes debido a espacio de la nube)

Realizado por:	Ing. Antonio Irvin Laura Quispe
Revisado por:	Dra. Daisy Margarita Gonzalez Diaz

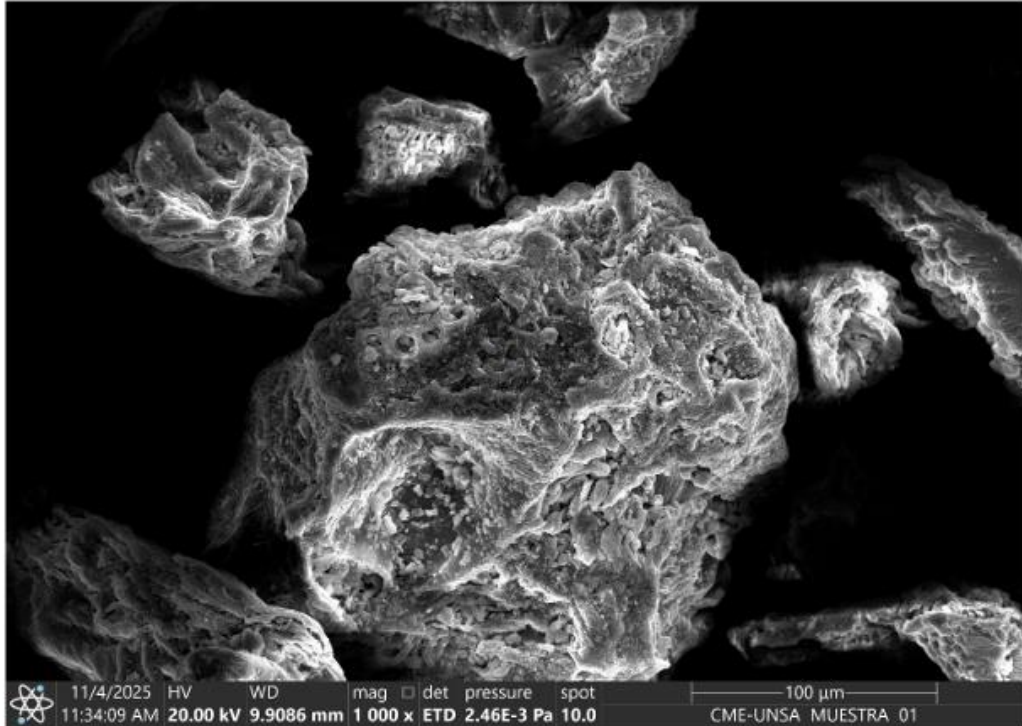



Dra. Daisy Margarita Gonzalez Diaz
 Directora Centro de Microscopía Electrónica

- Todo el proceso ha sido realizado con los estándares de calidad lo que asegura la correcta emisión de resultados.
 - Su información será manejada correctamente de acuerdo a la confidencialidad.
 - Los resultados y muestras serán almacenadas un plazo de 2 meses máximo.
 El original de este documento se encuentra en los archivos del CME, por lo que el adecuado o mal uso del mismo, es responsabilidad del cliente.

IMAGEN: MUESTRA 01 – Muestra Organica

Descripción: Se observa una micrografía a 1 000x con una distancia de trabajo de 9.90mm trabajando a 20KeV



Anexo v. Análisis por espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) de la biomasa de sankayo (Echinopsis maximiliana)



LABORATORIO DE MEDIO AMBIENTE, INVESTIGACIÓN Y SERVICIOS

INFORME DE ENSAYO

ANÁLISIS POR ESPECTROSCOPÍA INFRARROJA POR TRANSFORMADA DE FOURIER

Para: Yanet Mamani Flores

Aprobado por: Dra. Adriana Edith Larrea Valdivia

Analista: Lic. Dayam Mitchell Mamani Chuctaya

Informe de ensayo No: 356-25			
VERSIÓN	RECEPCIÓN DE MUESTRA	EJECUCIÓN DEL ANÁLISIS	EMISIÓN DE INFORME
1	03-Nov-2025	03-Nov-2025	03-Nov-2025
Descargo de Responsabilidad: Los resultados de los ensayos pertenecen solo a las muestras ensayadas y no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con Normas del Producto o como certificado del Sistema de Calidad de la entidad que lo produce. Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin la autorización del LABORATORIO DE MEDIO AMBIENTE, INVESTIGACIÓN Y SERVICIOS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.			

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción	3
2. Identificación de la investigadora	3
3. Método utilizado	3
4. Condiciones de análisis.....	3
5. Observaciones	4
6. Espectro	4

1. INTRODUCCIÓN

A solicitud de la investigadora Yanet Mamani Flores, se ha realizado el análisis por espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier, rango medio (MIR), de la siguiente muestra:

- Biomasa de sankayo

La muestra se recibió en consistencia sólida y en cantidad apropiada para el análisis a realizar. La lectura de la muestra fue directamente analizada sobre el accesorio de reflectancia total atenuada UATR.

2. IDENTIFICACIÓN DE LA INVESTIGADORA

Nombre	Yanet Mamani Flores	
	Teléfono	951176239
Contacto	Correo electrónico	

3. MÉTODO UTILIZADO

Para la realización del análisis se siguió los lineamientos de la norma ASTM E1252-98 (2021) "Standard Practice for General Techniques for Obtaining Infrared Spectra for Qualitative Analysis", con un rango de número de onda desde 650 cm^{-1} hasta 4000 cm^{-1} y accesorio de reflectancia total atenuada universal.

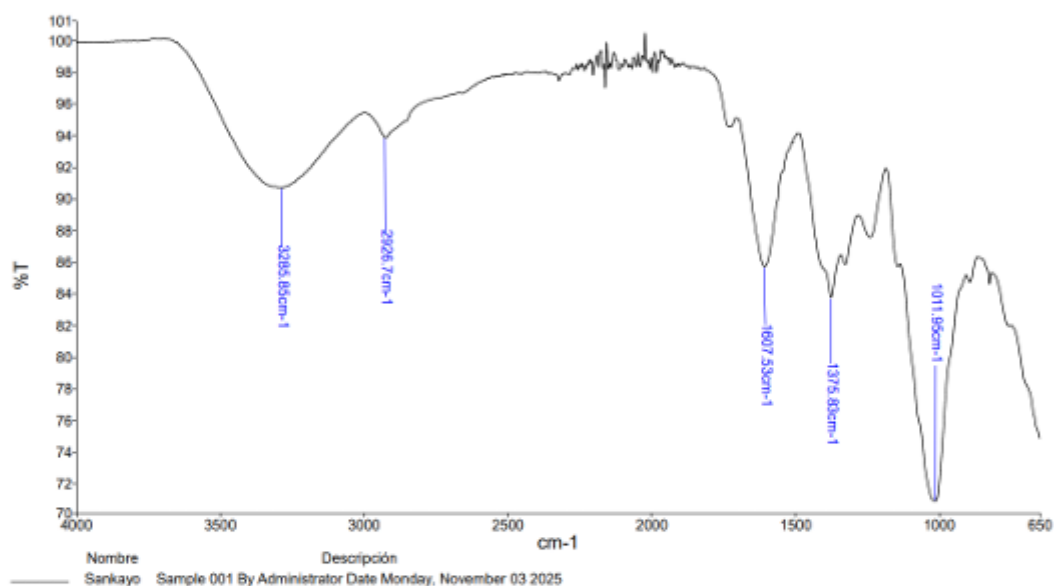
4. CONDICIONES DEL ANÁLISIS POR ESPECTROSCOPÍA INFRARROJA POR TRANSFORMADA DE FOURIER FT-IR

Equipo	Marca Perkin Elmer, modelo Frontier FT-IR/NIR
Rango de barrido	4000 cm^{-1} - 650 cm^{-1}
Tipo de accesorio	Universal ATR
Cristal UATR	Diamante/ZnSe
Saltos UATR	3

5. OBSERVACIONES

- ✓ Los resultados corresponden a la muestra proporcionada, la cual ha sido entregada en las instalaciones del laboratorio.
- ✓ Este documento va acompañado con la data del equipo, que consta del archivo .SP y archivo .CSV, que pueden ser manejados en Origin o Microsoft Excel, respectivamente.

6. ESPECTRO




Lc.Quim. Adriana Larrea Valdivia
C.Q.P.479

Anexo VI. Panel fotográfico

Figura 21

Recolección de sankayo (Echinopsis maximiliana).



Nota. Pelado de la muestra y sacado de impurezas. Fuente: Elaboración propia

Figura 22

Limpieza y selección de sankayo (Echinopsis maximiliana)



Nota. Limpieza de la muestra y selección de la muestra. Fuente: Elaboración propia

Figura 23

Trozado y secado de sankayo (Echinopsis maximiliana).



Nota. Trozado en rodajas y secado de la muestra a 90°C a 6 h. Fuente: Elaboración propia

Figura 24

Molido y tamizado de sankayo (Echinopsis maximiliana).



Nota. Molido y tamizado de la muestra. Fuente: Elaboración propia

Figura 25

Obtención de la humedad y cenizas



Nota. Determinación de la humedad y ceniza de la muestra. Fuente: Elaboración propia

Figura 26.

Biomasa de sankayo (Echinopsis maximiliana)



Nota. Pesado de muestra de la biomasa. Fuente: Elaboración propia

Figura 27

Curvas de calibración y soluciones de plomo y cadmio.



Nota. Preparación de curvas de calibración y solución de plomo y cadmio. Fuente: Elaboración propia

Figura 28

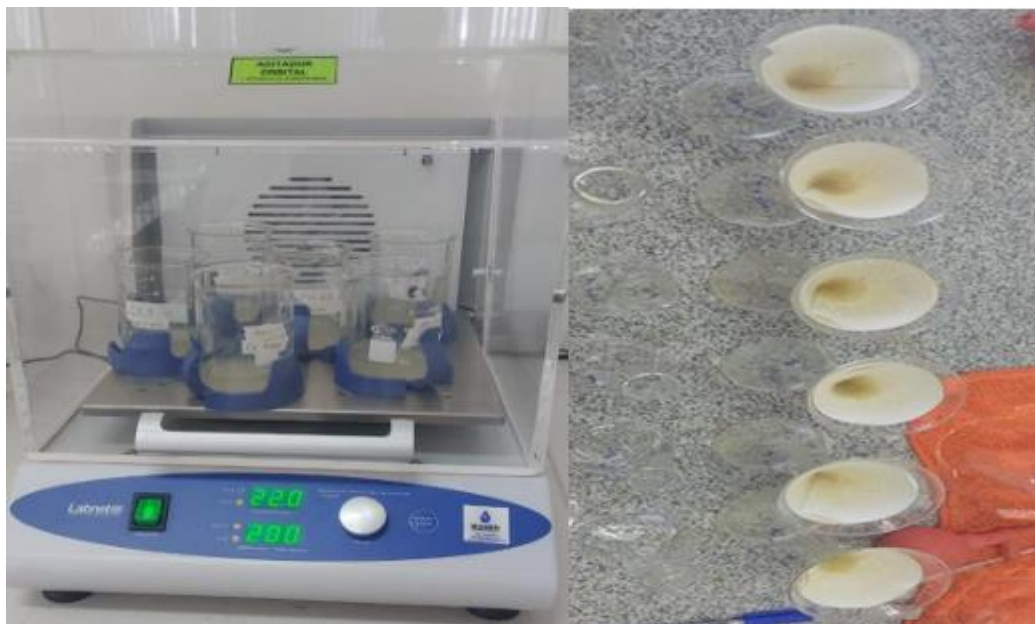
Disolución de muestra en solución estándar y ajuste de pH



Nota. Muestras de biomasa en solución de plomo y cadmio; por separado, ajuste de pH. Fuente: Elaboración propia

Figura 29

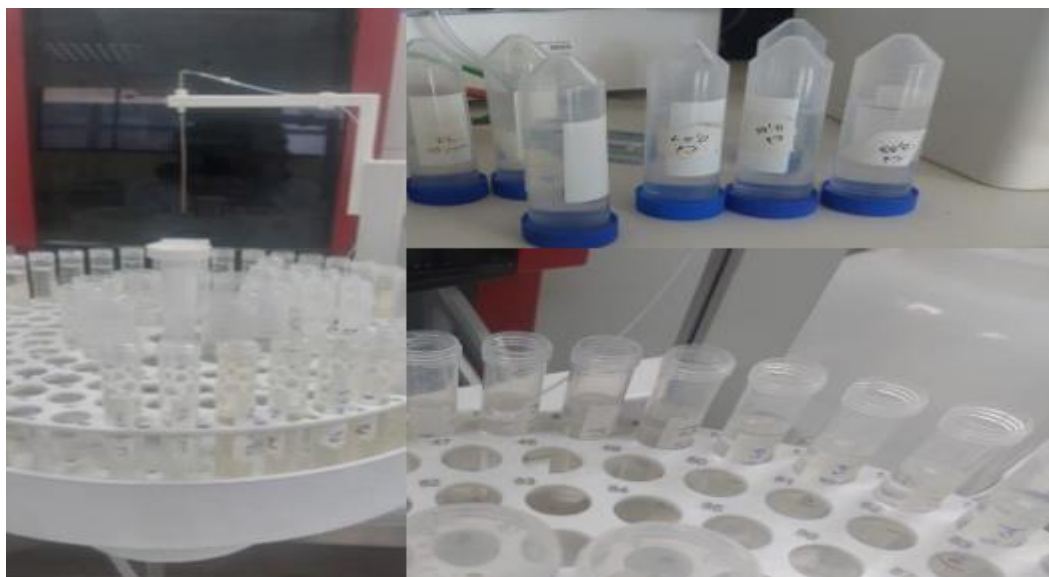
Agitación y filtración de muestra de sankayo (Echinopsis maximilina)



Nota. Muestras en agitación a temperatura de ambiente y filtración. Fuente: Elaboración propia

Figura 30

Lectura de muestras con equipo espectrofotometría por flama.



Nota. Lectura de muestras de plomo y cadmio por separado con equipo espectrofotometría de absorción atómica. Fuente: Elaboración propia



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA

"Universidad Pública de Calidad"