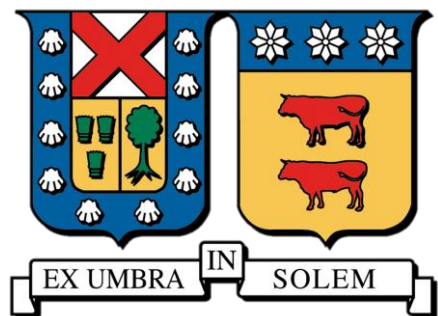


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL
VALPARAÍSO – CHILE



BÚSQUEDA DE BIOSORBENTES PARA TRATAMIENTO DE COBRE Y CADMIO EN RILES SINTÉTICOS

IVÁN ANDRÉS SARRIA ROJAS

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL AMBIENTAL

PROFESOR GUÍA

HENRIK HANSEN

PROFESORA CORREFERENTE

CLAUDIA GUTIÉRREZ

MARZO 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: BÚSQUEDA DE BIOSORVENTES PARA TRATAMIENTO DE COBRE Y CADMIO EN RILES SINTÉTICOS

Nombre del candidato(a): _____ IVÁN ANDRÉS SARRIA ROJAS _____

Carrera / Grado: _____ Ingeniería Civil Ambiental _____

Campus: __ Casa Central __ Departamento: _____ Departamento de Ingeniería Química y Ambiental _____

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, __ Knud Henrik Kirstein Hansen __, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: _____ 17/06/2026 _____ Firma: _____

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: _____ 17/06/2026 _____ Firma: _____

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.



RESUMEN

El agua es un recurso fundamental para el desarrollo de la vida en el planeta, un recurso limitado y cuya contaminación presenta un problema ambiental y de salud pública de gran relevancia. Los procesos industriales realizados para la extracción y procesamiento de metales, al igual que industrias productivas que los usan en sus procesos, como lo es la producción de baterías, generan residuos industriales líquidos (RILes) con altas concentraciones de metales pesados, como lo son el cobre, cadmio, arsénico, entre otros. Debido a su alta toxicidad y a su capacidad de acumulación en los ecosistemas, la remoción eficiente de estos residuos es un desafío para el tratamiento de aguas residuales.

Una de las alternativas de remoción de metales pesados es la biosorción, utilizando material biológico para la adsorción de los metales pesados disueltos en el agua y su remoción de dicho medio, destacada por su bajo costo, simplicidad operativa y efectividad.

La presente investigación se enfoca en un estudio bibliográfico con la finalidad de encontrar especies vegetales con potencial como biosorbentes para el tratamiento de metales pesados en aguas contaminadas. Enfocada en la remoción de cobre (Cu^{+2}) y cadmio (Cd^{+2}). Se realizan experiencias de biosorción de dichos contaminantes en RILes sintéticos para evaluar su capacidad de remoción y la viabilidad de su uso como biosorbente. Para ello se preparan los biosorbentes con las especies vegetales seleccionadas, con un tamaño de partícula de 425 a 850 μm , realizando los experimentos en soluciones sintéticas con concentraciones controladas de cobre y cadmio, a un pH constante de 4,5 y una relación masa/volumen de 10 [g/L].

Las especies vegetales estudiadas son *Equisetum Giganteum*, *Pelargonium Zonale*, *Lolium Perenne* y *Arundo Donax*. Los resultados obtenidos muestran que todas las especies tienen capacidad de remoción de los contaminantes previamente mencionados, en el caso de las especies *Lolium Perenne* y *Arundo Donax*, su capacidad de remoción es baja, alcanzando un porcentaje de remoción de cobre aproximado de 24% y 16% respectivamente, y una remoción de cadmio aproximado de un 22% y 16% respectivamente, por lo que no se recomienda su uso en el tratamiento de aguas contaminadas con dichos metales. La especie *Equisetum Giganteum* obtiene como resultados porcentajes de remoción del 80% en las pruebas de biosorción de cobre, al igual que en las pruebas de cadmio, y muestra una capacidad de retención de $8,29 \pm 0,05$ [mg/g] y $7,76 \pm 0,15$ [mg/g] respectivamente. La especie *Pelargonium Zonale* obtiene como resultados un porcentaje de remoción de cadmio aproximado del 81% y una capacidad de retención de $7,79 \pm 0,19$ [mg/g], siendo un buen candidato como biosorbente de este contaminante, y un porcentaje de remoción de cobre aproximado del 48% con una capacidad de retención de $4,77 \pm 0,13$ [mg/g]. Para ambas especies se recomienda continuar su estudio como biosorbente bajo distintas condiciones de pH, tamaño de partícula, relación masa/volumen, al igual que con otros contaminantes, y en tratamiento de RILes reales, ya que demuestran potencial en su uso como biosorbentes para el tratamiento aguas contaminadas con metales pesados.



AGRADECIMIENTOS

Terminando esta etapa de mi formación profesional quiero agradecer a todas las personas que me han apoyado durante estos años de estudio, agradecer a mi profesor guía Henrik Hansen y a mi profesora correferente Claudia Gutiérrez por siempre tener la disposición de ayudarme y responder todas mis consultas a lo largo de la realización de esta investigación.

Agradecer el apoyo económico del proyecto **Proyectos Internos USM 2025 PI_LIR_25_02**.

Agradecer a mi familia que me ha apoyado todos estos años, especialmente a mis padres y hermano que siempre están presentes para mí, siendo mi principal soporte a pesar de la distancia a la que nos encontramos. Agradezco igualmente a mis amigos, tanto a mis amigos de Antofagasta con los que aun mantengo contacto y que a pesar de las complicaciones para encontrarnos sé que siempre puedo contar con ellos, y a los amigos que hice a lo largo de mi paso por la universidad, ya que todos forman parte de quien soy hoy como persona y profesional y sé que puedo contar con ellos tanto hoy como a futuro.



Tabla de contenido

RESUMEN.....	III
AGRADECIMIENTOS	IV
INDICE DE TABLAS.....	VI
INDICE DE FIGURAS.....	VII
1 INTRODUCCIÓN	1
2 OBJETIVOS Y ALCANCES.....	2
2.1 Objetivo general	2
2.2 Objetivos específicos	2
2.3 Alcances	2
3 ANTECEDENTES GENERALES.....	2
3.1 Metales pesados	2
3.1.1 Cobre.....	3
3.1.2 Cadmio	4
3.1.3 Normativa ambiental relacionada a la descarga de residuos líquidos	5
3.2 Tratamientos de remoción de metales pesados desde residuos líquidos industriales.	7
3.2.1 Tratamientos electroquímicos	7
3.2.2 Filtración por membranas.....	8
3.2.3 Tratamientos fisicoquímicos.....	9
3.3 Biosorción.....	11
3.3.1 Biosorbentes	13
3.3.2 Mecanismos de biosorción	14
3.3.3 Factores que afectan la biosorción.....	15
3.4 Antecedentes teóricos del proceso de biosorción.....	17
3.4.1 Cálculo de la capacidad de retención.....	17
4 METODOLOGÍA.....	19
4.1 Materiales, equipos y reactivos	19
4.1.1 Materiales	19
4.1.2 Equipos.....	19
4.1.3 Reactivos	19
4.2 Proceso de selección de posibles biosorbentes	20
4.2.1 Criterios de selección	20
4.2.2 Posibles biosorbentes encontrados	20



4.2.3	Selección final.....	27
4.3	Preparación de los biosorbentes.....	27
4.3.1	Materia prima	27
4.3.2	Reducción de tamaño.....	27
4.4	Preparación de las soluciones	28
4.4.1	Solución de cobre.....	28
4.4.2	Solución de cadmio	29
4.5	Experimentos de biosorción.....	29
4.6	Análisis de las muestras	29
5	RESULTADOS	30
5.1	Pruebas de biosorbentes en solución sintética de Cu^{+2}	30
5.2	Pruebas de biosorbentes en solución sintética de Cd^{+2}	31
6	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN.....	32
6.1	Comparación de resultados de biosorción de cobre	32
6.2	Comparación de resultados de biosorción de cadmio	32
6.3	Comparación de resultados con otros estudios de la UTFSM	33
6.4	Comparación de resultados con otros estudios.....	37
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	38
8	BIBLIOGRAFÍA	39

INDICE DE TABLAS

TABLA 1 LÍMITES MÁXIMOS PERMITIDOS PARA LA DESCARGA DE RESIDUOS LÍQUIDOS ESTABLECIDOS POR D.S. N°609/1998	6
TABLA 2 LÍMITES MÁXIMOS PERMITIDOS PARA LA DESCARGA DE RESIDUOS LÍQUIDOS ESTABLECIDOS POR EL D.S. N°90/2000	6
TABLA 3 LÍMITES MÁXIMOS PERMITIDOS PARA LA DESCARGA DE RESIDUOS LÍQUIDOS A AGUAS SUBTERRÁNEAS ESTABLECIDOS POR EL D.S. N°46/2002.....	7
TABLA 4 MÉTODOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS PARA REMOCIÓN DE METALES PESADOS	7
TABLA 5 TABLA RESUMEN, COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE REMEDIACIÓN DE METALES PESADOS EN AGUAS CONTAMINADAS	12
TABLA 6 RESULTADOS EXPERIMENTALES, BIOSORCIÓN DE Cu^{2+} EN SOLUCIÓN SINTÉTICA (TAMAÑO DE PARTÍCULA DE 425-850 μM , PH DE $4,5 \pm 0,1$, $C_0 = 100$ [MG/L]).....	31
TABLA 7 RESULTADOS EXPERIMENTALES, BIOSORCIÓN DE Cd^{2+} EN SOLUCIÓN SINTÉTICA (TAMAÑO DE PARTÍCULA DE 425-850 μM , PH DE $4,5 \pm 0,1$, $C_0 = 100$ [MG/L]).....	31
TABLA 8 RESULTADOS EXPERIMENTALES DE BIOSORCIÓN DE Cu^{2+} DE ESTUDIO REALIZADO POR CAMILA ORTIZ	34



TABLA 9 RESULTADOS EXPERIMENTALES DE BIOSORCIÓN DE Cd^{2+} DE ESTUDIO REALIZADO POR CAMILA ORTIZ	34
TABLA 10 RESULTADOS EXPERIMENTALES DE BIOSORCIÓN DE Cu^{+2} DE ESTUDIO REALIZADO POR BRUNO GODOY	35
TABLA 11 RESULTADOS EXPERIMENTALES DE BIOSORCIÓN DE Cd^{2+} DE ESTUDIO REALIZADO POR BRUNO GODOY	35
TABLA 12 ESTUDIOS DE BIOSORCIÓN CON ESPECIES VEGETALES EN LA LITERATURA.	37

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 RELACIÓN ENTRE ADSORBENTE Y ADSORBATO	10
FIGURA 2 REPRESENTACIÓN DEL PROCESO DE ADSORCIÓN CONTINUO POR LOTES	18
FIGURA 3 PELARGONIUM ZONALE O GERANIO COMÚN.....	21
FIGURA 4 HELIANTHUS ANNUUS O GIRASOL	21
FIGURA 5 MEDICAGO SATIVA O ALFALFA.....	22
FIGURA 6 RICINUS COMMUNIS O HIGUERILLA	23
FIGURA 7 ARUNDO DONAX O CAÑA COMÚN	24
FIGURA 8 EQUISETUM GIGANTEUM	24
FIGURA 9 AMBROSIA AMBROSIOIDES O CHICURA	25
FIGURA 10 TRIFOLIUM REPENS O TRÉBOL BLANCO	26
FIGURA 11 LOLIUM PERENNE O BALICA	26
FIGURA 12 A) UNIVERSAL GRINDER; B) TAMICES DE PRUEBA	28
FIGURA 13 EAA VARIAN SPECTRAA 55	30
FIGURA 14 REMOCIÓN DE COBRE LOGRADA POR CADA ESPECIE VEGETAL	32
FIGURA 15 REMOCIÓN DE CADMIO LOGRADA POR CADA ESPECIE VEGETAL.....	33
FIGURA 16 COMPARACIÓN DE % DE REMOCIÓN DE COBRE CON DISTINTOS BIOSORBENTES.....	36
FIGURA 17 COMPARACIÓN DE % DE REMOCIÓN DE CADMIO CON DISTINTOS BIOSORBENTES	36

1 INTRODUCCIÓN

El agua es un componente fundamental para el desarrollo de la vida en el planeta, el agua apta para consumo es escasa y factores como el cambio climático, la contaminación de esta y el crecimiento poblacional solo exacerban la escasez (Gutierrez, et al., 2024).

Muchas industrias generan residuos industriales líquidos (RILes) durante su proceso productivo, estos RILes contienen diversos contaminantes que pueden afectar al ecosistema y a la salud humana al verterlos en reservas de aguas existentes, por lo que es necesario enfocar soluciones a la reducción de estos residuos y contaminantes, tanto a base de cambios en los métodos de producción como por medio de sistemas de tratamiento (ONU, 2021). Algunos de estos contaminantes corresponden a metales pesados, estos provienen de industrias como la minería o fundiciones, si bien algunos de estos metales son necesarios para la vida en pequeñas cantidades, una vez estas concentraciones superan un cierto nivel pasan a ser considerados tóxicos y tienen efectos perjudiciales en la salud de las personas. El principal problema con este tipo de contaminantes es que no son degradables, estos se acumulan en el ambiente y en organismos vivos por lo que es necesario realizar un tratamiento capaz de removerlos, para poder reducir su impacto en el ecosistema y en la salud humana (López & Gutiérrez, 2014).

El cobre es un metal de gran valor económico y su extracción y exportación es una de las principales actividades económicas de Chile, este metal tiene diversos usos debido a sus propiedades de conducción eléctrica y propiedades antibacterianas (Donoso Muños, 2013), el cobre igualmente es un micronutriente esencial, del cual se recomienda un consumo de 1,5 a 3,0 (mg/día), aunque la ingestión de un exceso de cobre debido a la presencia de este en el agua puede causar problemas gastrointestinales e intoxicación del hígado, lo cual puede suceder con concentraciones de cobre de aproximadamente 5,3 (mg/L) (National academy of sciences, 2000). En el caso del Cadmio este es un elemento que generalmente se encuentra como mineral y se puede encontrar en casi todos los suelos y rocas, carbón y abonos minerales, tiene múltiples usos como lo son la producción de baterías, pigmentos, revestimiento de metales y plásticos, este metal entra al ambiente durante actividades industriales, de minería y de combustión, las partículas generadas no se degradan y pueden movilizarse largas distancias hasta depositarse en tierra o agua, la exposición prolongada a cadmio produce su acumulación en los riñones generando enfermedades renales, también puede causar daños a los pulmones, fragilidad de los huesos y es considerado un elemento carcinogénico (Agencia de sustancias tóxicas y el registro de enfermedades. (ATSDR), 2012).

Se han desarrollado varias tecnologías para extraer iones de metales pesados del agua tales como precipitación química, osmosis inversa, electrodiálisis, intercambio iónico y adsorción. Esta última destaca en comparación a las otras tecnologías, debido a que suele ser más económica en términos de costos operativos y de mantención. La adsorción es un fenómeno físico químico durante el cual átomos, moléculas o iones presentes en una solución acuosa o gaseosa (adsorbatos) se adhieren a la superficie de un material sólido (adsorbente). Este proceso ocurre debido a las fuerzas de atracción intermolecular entre las moléculas del adsorbato y los átomos o grupos funcionales, también llamados sitios activos, presentes en la superficie del adsorbente (Fernández, 2024).

En los últimos años, se ha prestado especial atención al uso de adsorbentes naturales, como alternativa al carbón activado para retener ciertos metales pesados de manera económica y medioambientalmente sostenible, proceso que se conoce con el nombre de biosorción. Los materiales naturales, como bacterias,



algas, hongos, piel de animales y frutas, residuos vegetales, lodos activos y biopolímeros son diferentes tipos de biosorbentes que están ampliamente disponibles y tienen un bajo costo (Beni & Esmaili, 2020).

Considerando lo anterior, el proceso de biosorción es una subcategoría de la adsorción, donde el sorbente es una matriz biológica. El proceso de unión de los iones en soluciones acuosas es rápido y reversible. Por lo tanto, la biosorción describe cualquier sistema en el cual un sorbato (átomo, molécula o ion molecular) interactúa con un biosorbente (superficie sólida de una matriz biológica) resultando en la acumulación en la interfase sorbato-biosorbente, provocando una reducción en la concentración del sorbato en la solución tratada (Shrestha, et al., 2021).

En vista de lo expuesto anteriormente, este estudio se centra en la búsqueda de biosorbentes potenciales para el tratamiento por biosorción monocomponente de cobre y cadmio y su posterior prueba bajo condiciones controladas a un pH, tamaño de partícula y relación masa/volumen constantes.

2 OBJETIVOS Y ALCANCES

2.1 Objetivo general

Encontrar posibles biosorbentes en base a plantas que sean capaces de remover Cu^{2+} y Cd^{2+} desde soluciones sintéticas preparadas en laboratorio

2.2 Objetivos específicos

- Definir estándares de selección para la búsqueda de nuevos posibles biosorbentes para Cu^{2+} y Cd^{2+}
- Realizar búsqueda bibliográfica de plantas con potencial para ser biosorbentes de Cu^{2+}
- Realizar búsqueda bibliográfica de plantas con potencial para ser biosorbentes de Cd^{2+}
- Realizar pruebas de biosorción con los distintos biosorbentes preparados a base de plantas investigadas con soluciones sintéticas de Cu^{2+}
- Realizar pruebas de biosorción con los distintos biosorbentes preparados a base de plantas investigadas con soluciones sintéticas de Cd^{2+}
- Comparar resultados obtenidos con otros estudios de biosorción de Cu^{2+} y Cd^{2+}

2.3 Alcances

Esta investigación se limita a la búsqueda y selección de nuevos biosorbentes potenciales y su estudio de adsorción monocomponente de Cu^{2+} y Cd^{2+} desde soluciones sintéticas de concentración conocida. Se estudia la factibilidad de distintas especies vegetales en su uso como biosorbentes para tratar RILES contaminados con Cu^{2+} y/o Cd^{2+} .

3 ANTECEDENTES GENERALES

3.1 Metales pesados

Los metales pesados son un grupo de elementos químicos caracterizados por su alta densidad relativa, generalmente superior a 5 [g/cm³], masa atómica mayor a 23 o número atómico superior a 20 y por su tendencia a bioacumularse en organismos vivos, así como a persistir en distintos compartimentos ambientales. Desde el punto de vista químico, estos metales presentan una notable variabilidad en sus



estados de oxidación, lo que les permite formar compuestos estables con diferentes ligandos, tanto orgánicos como inorgánicos (Koller & Saleh, 2018).

Elementos como el cobre (Cu), zinc (Zn) y cromo (Cr) en bajas concentraciones son esenciales para mantener el metabolismo del cuerpo humano, sin embargo metales pesados como el plomo (Pb), mercurio (Hg), cadmio (Cd) y arsénico (As, aunque este es un metaloide), son altamente tóxicos incluso en bajas concentraciones debido a su capacidad para generar estrés oxidativo, inducir daño en el ADN, interferir en el metabolismo celular y afectar órganos vitales como el hígado, los riñones y el sistema nervioso central (Koller & Saleh, 2018).

El origen de estos elementos puede ser tanto natural como antropogénico. Entre las fuentes naturales destacan la erosión de rocas, la actividad volcánica y la disolución de minerales en cuerpos de agua. Sin embargo, en la actividad humana la principal responsable de su movilización y concentración en el ambiente son las industrias metalúrgicas, la minería, la combustión de combustibles fósiles, el uso de pesticidas y fertilizantes, la producción de baterías y los desechos electrónicos. Una vez liberados al ambiente, estos elementos pueden encontrarse en distintas formas químicas, dependiendo de las condiciones fisicoquímicas del entorno, lo que influye en su movilidad, toxicidad y biodisponibilidad (Tchounwou, et al., 2014).

La remoción de metales pesados es un desafío complejo, debido a su estabilidad química y a su tendencia a la adsorción en suelos y sedimentos, donde pueden permanecer durante largos periodos. Diversos procesos fisicoquímicos y biológicos pueden influir en su movilidad, como la variación del pH, la presencia de materia orgánica y microorganismos con capacidad de biotransformación. Para mitigar su impacto, se han desarrollado múltiples estrategias de remediación, incluyendo técnicas fisicoquímicas como la precipitación química, la adsorción y la electrocoagulación, así como métodos biotecnológicos como la biorremediación mediante microorganismos o la fitorremediación con plantas capaces de adsorber y acumular metales pesados en sus tejidos. No obstante, la prevención sigue siendo la misma estrategia, promoviendo regulaciones más estrictas sobre la emisión de estos contaminantes y fomentando el desarrollo de tecnologías más limpias (Tchounwou, et al., 2014).

3.1.1 Cobre

El cobre (Cu), es un metal dúctil, maleable, tenaz, resistente a la corrosión y buen conductor térmico y eléctrico, ubicado en el grupo 11 y periodo 4 de la tabla periódica. Tiene peso atómico 63,54 [g/mol], densidad 8,96 [g/cm³] a 20 [°C], punto de ebullición 2.567 [°C] y fusión 1.083 [°C]. Posee dos isótopos naturales estables (⁶³Cu y ⁶⁵Cu) y nueve isótopos inestables. La valencia más común es la de 2+ (cúprico), pero también es frecuente 1+ (cuproso); la valencia 3+ ocurre sólo en unos cuantos compuestos inestables. Aunque es poco común, el cobre se puede encontrar en estado nativo, no obstante, la mayoría proviene de minerales de cobre sulfurados, como la calcocita (Cu₂S), covelita (CuS), calcopirita (CuFeS₂), bornita (Cu₅FeS₄) y enargita (Cu₃AsS₄). También se extrae de minerales de cobre oxidados, como la cuprita (Cu₂O), tenorita (CuO), malaquita (Cu₂CO₃(OH)₂), azurita (Cu₃(CO₃)₂(OH)₂), crisocola ((Cu,Al)₄H₄(OH)₈Si₄O₁₀·nH₂O) y brocancita (Cu₄SO₄(OH)₆). Por lo tanto, para el caso de la obtención de cobre de minerales sulfurados, se obtienen mediante procesos de flotación, fundición y refinación electrolítica principalmente mientras que para los minerales oxidados se utilizan métodos de lixiviación, extracción por solventes y electroobtención. Importante es mencionar que Chile es el principal productor de cobre a nivel mundial, con grandes yacimientos como Chuquibambilla y Escondida (Lenntech, 2023).



El cobre es un metal de transición con una configuración electrónica $[\text{Ar}] 3d^{10} 4s^1$, lo que le confiere una notable capacidad para conducir electricidad y calor, solo superada por la plata. Su estructura cristalina es cúbica centrada en las caras (FCC, Face-Centered Cubic), lo que le otorga una alta ductilidad (capacidad de estirarse sin romperse) y maleabilidad (capacidad de deformarse), características esenciales para su uso en cables eléctricos, tuberías y componentes industriales. Presenta una resistencia a la corrosión, ya que al exponerse al oxígeno y a la humedad, forma una capa protectora de óxidos y carbonatos de cobre (Cu_2O , CuO y $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$), conocida como pátina, que evita una mayor oxidación del metal subyacente. Sin embargo, en ambientes con presencia de ácido o agentes sulfurados, puede corroerse con mayor rapidez (Lenntech, 2023).

En términos químicos, el cobre es capaz de formar iones Cu^+ (cobre (I)) y Cu^{2+} (cobre (II)), siendo este último el más común en compuestos y soluciones acuosas. Su comportamiento electroquímico lo hace útil en procesos como la electroobtención y la electrólisis, además de ser un catalizador en diversas reacciones industriales (Londoño & Muñoz, 2016).

El cobre forma numerosas aleaciones que mejoran sus propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión. Algunas de las más importantes son el bronce (aleación con el estaño), el latón (aleación con zinc) y el cuproníquel (aleación con níquel), utilizadas en aplicaciones industriales, monedas, tuberías y componentes marinos debido a su durabilidad y resistencia química. Además, por su alta conductividad eléctrica (aproximadamente 58 [MS/m] a $20 \text{ [}^\circ\text{C]}$), el cobre es ampliamente utilizado en la fabricación de cables eléctricos, circuitos electrónicos, transformadores y motores eléctricos. Su conductividad térmica (aproximadamente 400 [W/mK]) también lo hace fundamental en intercambiadores de calor y sistemas de refrigeración (International Copper Association, 2024).

El cobre es un elemento esencial para el crecimiento y desarrollo de los seres vivos, pero su alta concentración en el medio ambiente puede generar efectos negativos. Para la población general, los compuestos de cobre solubles en agua, usados principalmente en la agricultura, representan un mayor riesgo para la salud, ya que estos pueden ser ingeridos a través del recurso hídrico. El cobre también puede ingresar al cuerpo humano por medio de la respiración, especialmente en ambientes cercanos a minas o plantas de procesamiento del metal, ya que su concentración en el aire puede alcanzar $5.000 \text{ [ng/m}^3\text{]}$. Asimismo, se puede estar expuesto al cobre debido a la presencia del metal depositado en el suelo, principalmente en lugares cercanos a plantas que producen cobre y latón, donde se han encontrado concentraciones de hasta 17.000 [ppm] , muy por encima del promedio normal del suelo (Londoño & Muñoz, 2016).

3.1.2 Cadmio

El cadmio (Cd) es un metal dúctil, de color blanco argento con un ligero matiz azulado, número atómico 48. Es más blando y maleable que el zinc, pero más duro que el estaño. Tiene un peso atómico de 112,40 y densidad relativa de 8,65 a 20°C . Su punto de fusión es de $320,9^\circ\text{C}$ y de ebullición de 765°C . El cadmio es miembro del grupo IIb (zinc, cadmio y mercurio) en la tabla periódica. El cadmio es divalente en todos sus compuestos estables y su ion es incoloro. El cadmio no se encuentra en estado libre en la naturaleza y la greenockita (sulfuro de cadmio, único mineral de cadmio), no es una fuente comercial del metal, la gran mayoría del cadmio producido es obtenido como subproducto de la fundición y refinamiento de los minerales de zinc, los cuales por lo general contienen de 0,2 a 0,4% de cadmio (Lenntech, 2025).

El cadmio es encontrado como subproducto de la extracción de zinc, plomo y cobre. Después de su aplicación este entra en el ambiente mayormente a través del suelo, porque se puede encontrar en estiércoles



y pesticidas, posteriormente puede lixiviar a aguas subterráneas. Una exposición a niveles altos de cadmio puede producir acumulación de este en los riñones donde puede causar daños al mecanismo de filtración lo que causa excreción de proteínas esenciales y azúcares del cuerpo, otros efectos sobre la salud que puede tener el cadmio son diarreas, dolor de estómago, vómitos severos, fractura de huesos, daño al sistema nervioso central, daño al sistema inmune, posible infertilidad, desórdenes psicológicos y también es un elemento considerado cancerígeno. (Lennetech, 2025)

Grandes cantidades de cadmio son liberadas al ambiente de forma natural, sobre 25.000 toneladas al año. La mitad de este cadmio es liberado a los ríos a través de la descomposición de rocas, otra parte se libera al aire a través de incendios forestales y volcanes. El resto del cadmio es liberado por las actividades humanas como es la manufactura. Las aguas residuales con cadmio procedentes de las industrias mayoritariamente terminan en suelos. El cadmio de las corrientes residuales puede entrar al aire a través de la quema de residuos urbanos o la quema de combustibles fósiles. Otra fuente importante de emisión de cadmio es la producción de fertilizantes fosfatados artificiales, el cual después de su uso termina en el suelo, aguas superficiales y subterráneas. El cadmio es fuertemente absorbido por la materia orgánica del suelo, cuando el cadmio está presente en el suelo este puede ser extremadamente peligroso y debido a su absorción en materia orgánica, puede ocasionar que se consuma cadmio por vía de los vegetales que consumimos. Suelos ácidos aumentan la toma de cadmio por las plantas, lo que genera un daño potencial para animales que dependen de ellas para sobrevivir, lombrices y otros animales esenciales para el suelo son extremadamente sensibles al envenenamiento por cadmio y esto tiene consecuencias para la estructura del suelo y amenaza todo el ecosistema del suelo. En ecosistemas acuáticos el cadmio puede acumularse en los animales, la susceptibilidad a este puede variar ampliamente entre organismos acuáticos, aunque en general los organismos de agua dulce son menos resistentes al envenenamiento por cadmio que los de agua salada (Lennetech, 2025).

3.1.3 Normativa ambiental relacionada a la descarga de residuos líquidos

3.1.3.1 Decreto Supremo N°609/1998: Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Industriales Líquidos a Sistemas de Alcantarillado (SINCA, 2000).

La presente norma de emisión tiene como objetivo mejorar la calidad ambiental de las aguas servidas que los servicios públicos de disposición de éstas vierten a los cuerpos de agua terrestres o marítimos mediante el control de los contaminantes líquidos de origen industrial. Con lo anterior se logra que los servicios públicos de disposición de aguas servidas dispongan aguas residuales con un bajo nivel de contaminación, protegiendo así los cuerpos de agua receptores. Por lo tanto, esta norma, al proteger los sistemas de recolección de aguas servidas, evita que los contaminantes transportados por éstos puedan eventualmente ser liberados sin tratamiento, al medio ambiente urbano (calles, suelo, aire entre otros), por efecto de roturas u obstrucciones del sistema, pudiendo afectar la calidad de éste, y la salud de las personas.

La Tabla 1, contiene las concentraciones máximas de contaminantes permitidos para residuos industriales líquidos, descargados por establecimientos industriales a los servicios públicos de recolección de aguas servidas de tipo separado o unitario, establecidos por el Decreto Supremo.

Tabla 1 Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos establecidos por D.S. N°609/1998

Detalle de descarga	Límite máximo permitido cobre [mg/L]	Límite máximo permitido cadmio [mg/L]
Caracterización de aguas servidas domésticas correspondientes a 100 habitantes	1	0,1
Límites máximos permitidos para descargas de efluentes que se efectúan a redes de alcantarillado que no cuenten con plantas de tratamiento de aguas servidas	3	0,5
Límites máximos permitidos para descargas de efluentes que se efectúan a redes de alcantarillado que cuenten con plantas de tratamiento de aguas servidas	3	0,5

3.1.3.2 Decreto Supremo N°90/2000: Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales (MINSEGPRES, 2000a).

El decreto Supremo N°90/2000 tiene por objeto regular la descarga de contaminantes hacia cursos de aguas marinas y continentales superficiales mediante la fijación de límites máximos permisibles para la descarga de residuos líquidos, previniendo así la contaminación de dichos cuerpos de agua. Este decreto establece que toda fuente que descargue sus residuos líquidos a uno o más cuerpos de agua, deberá caracterizar sus residuos líquidos a modo de evaluar si califica como fuente emisora y si queda sujeta al cumplimiento de la norma de emisión.

La Tabla 2, contiene la concentración máxima de contaminantes permitida para residuos líquidos descargados por las fuentes emisoras, a los cuerpos de agua marinos y continentales superficiales de la República de Chile, establecidas por el Decreto Supremo.

Tabla 2 Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos establecidos por el D.S. N°90/2000

Detalle de descarga	Límite máximo permitido cobre [mg/L]	Límite máximo permitido cadmio [mg/L]
Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de aguas fluviales	1	0,01
Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua fluviales considerando la capacidad de dilución del receptor	3	0,3
Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua lacustres	0,1	0,02
Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua marinos	1	0,02
Límites máximos de concentración para descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua marinos fuera de la zona de protección litoral	3	0,5

3.1.3.3 Decreto Supremo N°46/2002: Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas (MINSEGPRES, 2002a).

El decreto Supremo N°46/2002 tiene por objetivo regular la descarga de contaminantes hacia aguas subterráneas, mediante la fijación de límites máximos permisibles para la descarga de residuos líquidos, con el objeto de prevenir la contaminación de los acuíferos.

Este decreto establece que toda fuente que descargue sus residuos líquidos mediante obras de infiltración deberá caracterizar los residuos generados a modo de evaluar si califica como fuente emisora y si queda sujeta al cumplimiento de la norma de emisión. De esta forma, los límites para el cobre y cadmio se presentan en la Tabla 3 a continuación.

Tabla 3 Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a aguas subterráneas establecidos por el D.S. N°46/2002.

Detalle de descarga	Límite máximo permitido cobre [mg/L]	Límite máximo permitido cadmio [mg/L]
Establecimiento emisor	1	0,01
Límites máximos permitidos para descargar residuos líquidos en condiciones de vulnerabilidad media	1	0,002
Límites máximos permitidos para descargar residuos líquidos en condiciones de vulnerabilidad baja	3	0,002

3.2 Tratamientos de remoción de metales pesados desde residuos líquidos industriales.

A lo largo de los años, los investigadores han empleado una variedad de métodos para la remoción de metales pesados presentes en diversas aguas residuales industriales, los cuales pueden clasificarse en tratamientos electroquímicos, filtración por membrana y procesos fisicoquímicos.

Tabla 4 métodos de tratamiento de aguas para remoción de metales pesados

Tratamientos electroquímicos	Filtración por membrana	Fisicoquímico
Electrocoagulación	Ultrafiltración	Precipitación química
Electrodeposición	Nanofiltración	Intercambio iónico
Electroflotación	Ósmosis inversa	Adsorción
	Electrodialisis	

3.2.1 Tratamientos electroquímicos

3.2.1.1 Electrocoagulación

La electrocoagulación es un proceso electrolítico, que se utiliza para desestabilizar los contaminantes presentes en forma de partículas disueltas o suspendidas en la solución electrolítica mediante la aplicación de corriente eléctrica. Este proceso se basa en el fenómeno de la electroquímica, en el que la oxidación o pérdida de electrones tiene lugar en el ánodo, mientras que la reducción o ganancia de electrones tiene lugar en la superficie del cátodo. Los principales parámetros operativos que influyen en el proceso de

electrocoagulación son la distancia entre electrodos, el pH de la solución, el tipo de electrodos, la densidad de corriente aplicada y la configuración de los electrodos.

El sistema de electrocoagulación consta de una celda electrolítica y una serie de electrodos de metales de sacrificio (normalmente aluminio, hierro o zinc) acoplados a una fuente de alimentación controlada. Este proceso utiliza corriente continua para desprender el catión activo del ánodo de sacrificio, el que reacciona con los iones hidroxilos que se forman en el cátodo, desestabilizando los contaminantes suspendidos, emulsionados o disueltos en medio acuoso. Finalmente, los materiales coloidales se aglomeran para ser eliminados por flotación o por decantación.

Los pasos importantes en el mecanismo de electrocoagulación son: formación de cationes metálicos debido al suministro de corriente eléctrica a los ánodos; producción de iones hidroxilo debido a la hidrólisis del cátodo; interacción de cationes metálicos con iones hidroxilos para formar hidróxidos metálicos; oxidación de contaminantes tóxicos; neutralización de la carga de contaminantes y adsorción de contaminantes neutralizados (Das, Sharma, & Purkait, 2022).

3.2.1.2 Electrodeposición

La electrodeposición es un proceso en el que tiene lugar una reacción Redox, en donde ocurre una reducción y oxidación de los iones de metales pesados en una celda que consta de un ánodo, un cátodo, un electrolito, y una fuente de corriente. Cuando se hace pasar la electricidad por el electrolito, los iones metálicos del ánodo se desprenden en la solución acuosa y se reducen, para posteriormente precipitar y depositarse en forma de película protectora en la pieza que se va a impregnar (cátodo), volviendo a su estado metálico original. Por su parte, el paso de la corriente eléctrica provoca que el ánodo se oxide liberando más cationes del metal pesado a la solución acuosa. Ahí se reducen de nuevo y se precipitan en el cátodo como capa superficial (Alsiment, 2022).

3.2.1.3 Electroflotación

La electroflotación es un método de tratamiento de aguas residuales que combina los principios de la electrocoagulación y la flotación. Es un proceso de separación en el que las partículas hidrófobas existentes en el agua o las partículas generadas por otros procesos son transportadas a la superficie acuosa por burbujas de gas adheridas generadas por la descomposición del agua en oxígeno e hidrógeno. Dentro del funcionamiento, se encuentra la aplicación de corriente eléctrica a una celda con dos electrodos para inducir la electrólisis del agua, generando burbujas de hidrógeno en el cátodo y de oxígeno en el ánodo. Estas burbujas se adhieren a las partículas contaminantes, llevándolas a la superficie del líquido, donde forman una capa de espuma que se recolecta y elimina. La electroflotación es especialmente útil para tratar soluciones muy diluidas, con concentraciones de contaminante por debajo de los 50 [mg/L] (Muddemann, et al. 2019).

3.2.2 Filtración por membranas

La filtración por membranas es una técnica de separación que utiliza membranas semipermeables para separar sustancias en función del tamaño de las partículas y diferencia de presión. Esta técnica implica pasar una corriente de alimentación a través de un sistema de membranas, separando ésta en dos efluentes independientes, es decir el permeado (agua filtrada) y el retenido (corriente con sustancias separadas). Varios parámetros afectan el rendimiento de las membranas, entre los cuales se encuentran el material de la membrana, el tamaño de los poros y la composición de la solución.

Las tecnologías más utilizadas son: ósmosis reversa (OR), ultrafiltración (UF), microfiltración (MF), nanofiltración (NF) y electrodiálisis (ED). Estos procesos son similares, pero se diferencian en la estructura de los poros, la permeabilidad de la membrana y las presiones operativas aplicadas (Barman, et al. 2021).

3.2.2.1 Ultrafiltración

Tanto la ultrafiltración (UF) como la microfiltración (MF), son métodos de filtración física que utilizan una membrana semipermeable para atrapar contaminantes, son procesos dependientes de la presión que eliminan los sólidos disueltos y otras sustancias del agua en menor medida que la nanofiltración y la osmosis inversa. La principal diferencia entre ambos métodos radica en el tamaño de poro de la membrana. La UF tiene poros en el rango de 1 a 100 [nm], mientras que la MF tiene poros en el rango de 0,1 a 5 [μm]. Asimismo, la UF opera a presiones en el rango de 1 a 5 [bar], mientras que la MF opera a presiones entre 0,1 a 2 [bar]. Además, la UF es capaz de tratar compuestos con peso molecular entre 1.000 y 100.000 [Da] (Eykamp, 1995).

3.2.2.2 Nanofiltración

Es una técnica de tratamiento de agua relativamente reciente que utiliza membranas con carga superficial y poros muy pequeños, inferiores a 2 [nm]. Requiere de presiones de funcionamiento en el rango de 10-20 [bar]. Con respecto a su funcionamiento, las membranas son operadas bajo presión, permitiendo la concentración y desalado de solutos orgánicos. De esta manera, los solutos de bajo peso molecular son retenidos, pero las sales pasan, total o parcialmente, a través de la membrana con el filtrado. Es importante de recalcar que las membranas de nanofiltración son capaces de tratar aguas residuales que contienen más de un metal pesado con una eficiencia de remoción de más del 80% (Park, Lee, & Puthumana, 2021).

3.2.2.3 Ósmosis inversa

La ósmosis inversa (OR) es un proceso en el cual se reduce el caudal a través de una membrana semipermeable y se ejerce una fuerza de empuje superior a la presión osmótica en dirección opuesta al proceso de osmosis. De esta forma se logran separar las sustancias que se encuentran en el agua en un lado de la membrana (concentrado) y del otro lado se obtiene una solución diluida baja en sólidos disueltos (permeado). En general, las membranas utilizadas en OR tienen poros con tamaño en el rango de 0,1 y 1 [nm], y se emplea una presión de trabajo en el rango de 10 a 70 [bar] (Carbotecnia, 2024).

3.2.2.4 Electrodiálisis

La electrodiálisis (ED) es una técnica que utiliza membranas de intercambio iónico y electricidad para extraer compuestos iónicos de soluciones acuosas, siendo un campo eléctrico el que actúa como fuerza impulsora para la separación de solutos. La ED tiene la capacidad de remover iones contaminantes cargados de hasta 0,01 [nm], y su principal ventaja es su capacidad para recuperar agua limpia, eliminando incluso las concentraciones más bajas de iones metálicos de los efluentes (Tonner, 2004).

3.2.3 Tratamientos fisicoquímicos

3.2.3.1 Precipitación química

La precipitación química es la tecnología más común que se utiliza para eliminar metales disueltos (iónicos) de soluciones, como las aguas residuales de procesos que contienen metales tóxicos. Los metales iónicos se convierten en una forma insoluble (partícula) mediante la reacción química entre los compuestos metálicos solubles y el reactivo precipitante (óxido de calcio o cal (CaO), hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) y el carbonato de calcio (CaCO_3)). Las partículas formadas por esta reacción se eliminan de la solución

mediante sedimentación y/o filtración. Las operaciones unitarias que se requieren en esta tecnología son la neutralización, precipitación, coagulación, floculación, separación de sólidos/líquidos y deshidratación.

La eficiencia del proceso depende de varios factores, incluido el tipo y concentración de metales iónicos presentes en la solución, el precipitante utilizado, las condiciones de reacción (especialmente del pH de la solución que debe estar en valores cercanos a 11) y la presencia de otros componentes que pueden inhibir la reacción de precipitación.

La precipitación química presenta varias ventajas, como la posibilidad de tratar eficazmente efluentes con una concentración del metal mayor a 1.000 [mg/L], la simplicidad del proceso y el uso de equipos económicos, así como operaciones convenientes y seguras. No obstante, la precipitación química requiere la adición de una cantidad considerable de productos químicos, lo que genera una producción excesiva de lodos que requieren de un tratamiento adicional (Dahman, 2017).

3.2.3.2 Intercambio iónico

El tratamiento de intercambio iónico implica el intercambio mutuo de iones entre partículas sólidas (resinas de intercambio iónico) y un líquido. En este método, se utiliza una resina insoluble para remover los iones de metales pesados de las aguas residuales y liberar otros iones de similar carga en una cantidad químicamente equivalente, sin ningún cambio estructural de la propia resina. La eficiencia de este proceso depende de factores como la afinidad de la resina por un ion en particular, el pH del fluido, la concentración de iones, la temperatura y la difusión; éste último factor está en función de la dimensión del ion, carga electrostática, temperatura, estructura y tamaño del poro de la resina. Por lo tanto, este proceso tiene alta eficiencia, menor volumen de lodos, alta selectividad y recuperación de los metales, pero no es efectivo para tratar soluciones con concentraciones altas de metales pesados debido a que la matriz se satura rápidamente, requiere de tiempo de regeneración y es sensible a las variaciones de pH (Dyer, 2000).

3.2.3.3 Adsorción

La adsorción es un fenómeno superficial, que implica la concentración de uno o más componentes de un gas o un líquido en la superficie de un sólido. El sólido se denomina adsorbente y las moléculas adsorbidas en la superficie del sólido, con mayor concentración que en la fase fluida, se conocen como adsorbato (Figura 1). Una gran superficie específica es preferible para proporcionar una gran capacidad de adsorción, esto se traduce en una alta superficie interna por volumen de biosorbente, dando lugar a una gran cantidad de poros de pequeño tamaño entre las superficies de adsorción. El tamaño de los microporos determina la accesibilidad de las moléculas de adsorbato a la superficie de adsorción interna, siendo ésta una característica importante en los adsorbentes.

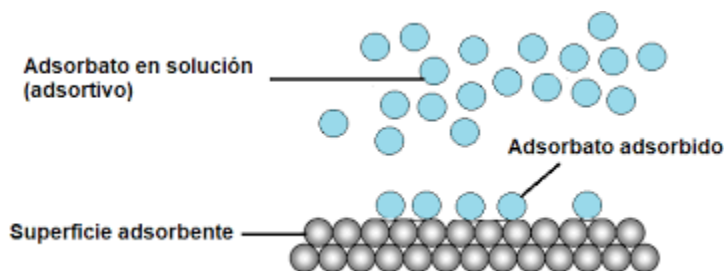


Figura 1 Relación entre adsorbente y adsorbato



Entre los factores que afectan a la adsorción se incluyen la temperatura, la naturaleza del adsorbato y del adsorbente, la presencia de otros contaminantes, y las condiciones atmosféricas y experimentales (pH, concentración del contaminante, tiempo de contacto y tamaño de partícula del adsorbente, etc.) (Artioli, 2008).

La adsorción se establece debido a las fuerzas de atracción entre los iones o contaminantes presentes en la solución y la superficie sólida. Si las fuerzas son de tipo Van der Waals, conllevan una fisisorción sobre la superficie del adsorbente, resultado de interacciones intermoleculares débiles entre el sólido y el contaminante. En cambio, la adsorción activada o quimisorción ocurre cuando se forman enlaces químicos entre los contaminantes y la superficie adsorbente (Artioli, 2008).

La adsorción es uno de los métodos más utilizados para la remoción de metales pesados como cromo, plomo, níquel, mercurio, cadmio, cobre, entre otros, de efluentes descargados. Esto se debe a su bajo costo, buena eficiencia, facilidad de operación, alta reactividad con el adsorbato, diseño flexible y capacidad de regeneración (Kumar, et al. 2021). Los adsorbentes pueden ser de origen mineral, orgánico o biológico como zeolitas, subproductos industriales, desechos agrícolas, biomasa o materiales poliméricos (Barakat, 2011). A nivel industrial, el carbón activado es el adsorbente más utilizado debido a su gran área superficial, comprendida entre 500-1000 [m²/g], su estructura porosa y su alta capacidad de adsorción. Generalmente es fabricado a partir de subproductos agrícolas que utilizan carbonato de potasio (K₂CO₃) en su proceso. No obstante, el carbón activado posee un mayor costo que otros adsorbentes (Ighalo, et al. 2022).

La remoción de metales pesados en medio acuoso mediante tecnologías sostenibles ha sido objeto de creciente interés en el ámbito de la remediación ambiental. En este contexto, el desarrollo de adsorbentes naturales, también conocidos como biosorbentes, se ha posicionado como una alternativa prometedora a los materiales convencionales, debido a su bajo costo, alta disponibilidad y menor impacto ambiental. Estos biosorbentes, derivados de residuos agroindustriales y biomasa, presentan una diversidad de grupos funcionales (como carboxilos, hidroxilos y aminas), que facilitan la interacción con iones metálicos a través de mecanismos de adsorción, incluyendo intercambio iónico, quelación y atracción electrostática. Este proceso, conocido como biosorción, ha demostrado ser una estrategia eficiente y sostenible para el tratamiento de efluentes industriales, destacándose por la regenerabilidad del biosorbente y su aplicabilidad en sistemas de adsorción en continuo (Gupta, Khan, & Singh, 2021).

3.3 Biosorción

La sorción es un término utilizado tanto para la absorción como para la adsorción. La absorción es la incorporación de una sustancia en un estado a otro diferente; es decir, líquidos absorbidos por un sólido o gases absorbidos por líquidos. La adsorción es la adherencia física o unión de iones y moléculas sobre la superficie del material sólido (Mejía, 2024). Tal como se mencionó en la sección 3.2.3.3, el material acumulado en la interfaz es el adsorbato y la superficie sólida es el adsorbente.

La biosorción es una subcategoría de la adsorción, donde el sorbente es una matriz biológica. Por lo tanto, la biosorción puede describir cualquier sistema en el cual un sorbato (átomo, molécula o ion molecular) interactúa con un biosorbente (superficie sólida de una matriz biológica) resultando en la acumulación en la interfase sorbato-biosorbente, provocando una reducción en la concentración del sorbato en la solución tratada. La eficiencia de la biosorción reside en la alta afinidad del biosorbente por la especie objetivo, lo que facilita su adhesión a la superficie del biomaterial. A través de mecanismos (adsorción, intercambio iónico, precipitación, y en ciertos casos, la absorción), se produce una distribución selectiva de la especie



entre las fases sólida y líquida, lo cual es fundamental para el proceso de separación y remoción de contaminantes (Shrestha, et al., 2021).

En la tabla 5, se realiza la comparación del método de biosorción con los distintos métodos de remediación de metales pesados.

Tabla 5 Tabla resumen, comparación de métodos de remediación de metales pesados en aguas contaminadas

Tratamiento	eficiencia	costo operativo	ventajas principales	limitaciones
Electrocoagulación	media-alta	medio	Generación mínima de lodos. Puede recuperar metales	Requiere recambio de electrodos, es sensible a factores como el material, distancia entre electrodos, polaridad, densidad de la corriente, conductividad del agua a tratar y pH por lo que es difícil predecir el resultado del tratamiento de forma consistente, se requiere calibración activa de los equipos utilizados durante el proceso para aumentar la consistencia
Electrodeposición	alta	alto	Utilizada para la recuperación de metales no ferrosos como cobre, níquel, estaño, cadmio	Requiere de recambio de electrodos y de uso de energía eléctrica por lo que su costo puede variar
Electroflotación	media	medio	No requiere de productos químicos, eficiente en partículas finas, puede tratar una amplia gama de contaminantes	Alto costo operativo, requiere recambio de electrodos, se utiliza para remoción de partículas finas, no sirve para partículas gruesas ni iones disueltos
Ultrafiltración	media	medio	Bajo consumo energético, retiene minerales esenciales y no genera agua de rechazo	No puede eliminar sales disueltas y se deben limpiar y cambiar membranas para evitar bloqueo
Nanofiltración	muy alta	alto	Bajo consumo energético, alta eficiencia	Se requiere pretratamiento para su uso, la membrana se ensucia y se bloquea
Osmosis inversa	excelente	muy alto	Remueve contaminantes disueltos, y residuos orgánicos	Genera aguas de rechazo, requiere mantenimiento, requiere altas presiones por lo que igual requiere alto consumo energético

Electrodialisis	alta	alto	Alta recuperación de agua, baja demanda química y alta selectividad	Pierde eficiencia en altas salinidades, membranas propensas a incrustación por materia orgánica y especies metálicas, requiere de pretratamiento para ser utilizada
Precipitación química	alta	bajo	Bajo costo, sencillo de operar, útil para una amplia variedad de contaminantes, alta selectividad	Genera lodos
Intercambio iónico	muy alta	alto	Alta eficiencia y selectividad, muy eficaz para bajas concentraciones	Presencia de calcio o magnesio puede reducir la eficiencia de remoción de metales, no es eficiente en soluciones de alta concentración o con gran cantidad de sólidos suspendidos, las resinas utilizadas pueden ser muy costosas, no es apto para contaminantes orgánicos
Adsorción	alta	medio	Bajo costo, sencillo de operar, útil para una amplia variedad de contaminantes	Pierde eficiencia con el tiempo, baja selectividad, efectividad dependiente de factores como pH, temperatura y concentración inicial del contaminante
Biosorción	alta	bajo	Bajo costo, alta eficiencia a distintas concentraciones de contaminantes, sostenible y amigable ambientalmente, útil para remoción de amplia variedad de contaminantes, no genera lodos tóxicos	El material se satura por lo que se requiere remplazo o regeneración de biosorbente, es sensible a condiciones como pH, temperatura, presencia de otros metales y el tipo de biomasa utilizada

En comparación con otros métodos convencionales, la biosorción suele ser preferida debido a que no requiere una alta inversión de capital, ya que los materiales biológicos suelen ser económicos y fáciles de obtener a partir de la agricultura o de desechos industriales. Otras ventajas de este método incluyen una alta eficiencia, la minimización de lodos químicos o biológicos, no requerir aditivos químicos, la posibilidad de regenerar el biosorbente y la recuperación de los metales (Michalak, Chojnacka, & Krowiak, 2013).

3.3.1 Biosorbentes

Los biosorbentes son materiales provenientes de la flora microbiana, algas, plantas, biomasa residual, productos agroindustriales o algunos biopolímeros, estos deben ser capaces de adsorber directamente el metal de forma iónica de la solución. En algunas ocasiones los biosorbentes son sometidos a tratamientos fisicoquímicos sencillos y de bajo costo, con el fin de mejorar su capacidad de adsorción en los procesos de aplicación como remoción de metales pesados o recuperación de especies metálicas en solución.



La calidad del biosorbente está ligada a la cantidad de sorbato que pueda atraer y retener, en este sentido, la búsqueda de nuevos materiales biosorbentes de bajo costo y con gran potencial de adsorción de iones metálicos presentes en aguas residuales, se ha convertido en el objetivo principal de algunas investigaciones. Razón por la cual, se han realizado diversos estudios evaluando la efectividad de biomasa microbiana, vegetal y animal igual que diversos productos derivados de su pre-tratamiento físico y modificación química.

Para ser considerados efectivos los biosorbentes a elección, se deben cumplir los siguientes criterios: alta capacidad de biosorción y cinética adecuada; tamaño, forma y propiedades óptimas para remover el contaminante de interés; separación del biosorbente de la solución de manera económica, rápida y con una alta eficiencia; alta resistencia mecánica, estabilidad térmica, y buena resistencia química; alta disponibilidad y método de preparación rentable; posibilidad de ser regenerado y reutilizado (Tejada, Villabona, & Garcés, 2025).

3.3.2 Mecanismos de biosorción

La biosorción es un proceso de transferencia de masa pasivo y complejo que involucra la adsorción de iones metálicos en la superficie de un biosorbente. Este fenómeno ocurre a través de múltiples mecanismos: quelación, complejación, intercambio iónico, quimisorción, reducción, precipitación superficial y adsorción en superficies y poros, cada uno con particularidades que favorecen la eficiencia de la biosorción (Ahmad & Zaidi, 2020).

3.3.2.1 Quelación

Es un mecanismo en el cual un agente complejo orgánico (agente quelante) une los iones metálicos en más de un lugar a la vez para formar una estructura de anillo. Las moléculas en un compuesto orgánico que forman estos tipos de coordinación se denominan ligandos y la asociación ligando-metal se conoce como complejo de coordinación. Un aumento en los complejos de coordinación en las superficies minerales debilita el enlace de metal o catión a la red cristalina, dando como resultado la disolución.

Los quelatos, al formar enlaces múltiples con el ion metálico, suelen ser más estables que los complejos simples. Esta estabilidad ha sido aprovechada en la biosorción para la remoción eficaz de metales pesados de efluentes líquidos, un enfoque que se ha investigado ampliamente debido a su relevancia ambiental y aplicabilidad práctica (Ahmad & Zaidi, 2020).

3.3.2.2 Complejación

Es un proceso en el que dos o más especies se asocian y forman un complejo. Cuando los complejos se forman de tal manera que el átomo de metal único disfruta de la posición central, entonces se denominan complejos mononucleares. Cuando más de un ion metálico está presente en el centro, forman un complejo polinuclear. Durante la formación de complejos polinucleares, en función del número de ligandos de unión involucrados, el átomo de metal puede tener una carga positiva, negativa o neutra. Varios estudios han confirmado que la formación de complejos por los ligandos mononucleares es más deseable que los ligandos polinucleares porque estos últimos contienen múltiples ligandos que dan como resultado la unión de múltiples especies (Ahmad & Zaidi, 2020).

3.3.2.3 Quimisorción

La quimisorción, también conocida como adsorción química es un proceso de adsorción que implica una reacción química entre la superficie y el adsorbato. Principalmente, ocurre cuando el adsorbato y el



adsorbente se atraen a través de un enlace químico o debido a las fuerzas químicas de atracción. Durante el proceso de quimisorción solo se forma una sola capa de adsorbato sobre el adsorbente y este proceso tiene una alta entalpía de adsorción. La cinética del proceso es dependiente de la temperatura; incrementándola se acelera la reacción hasta alcanzar un punto óptimo, tras el cual la velocidad puede disminuir (Ahmad & Zaidi, 2020).

3.3.2.4 Intercambio iónico

El intercambio iónico es un mecanismo esencial en la biosorción, el cual permite la sustitución de iones metálicos presentes en una solución por iones de la misma carga situados en la superficie del biosorbente. Esta dinámica de intercambio implica la transferencia de aniones o cationes, donde los grupos funcionales específicos en el biosorbente, como los grupos amino y carboxilo, actúan como intercambiadores de aniones y cationes, respectivamente. Este mecanismo es crucial para la eficacia de la biosorción en la remoción de contaminantes desde los efluentes (Ahmad & Zaidi, 2020).

3.3.2.5 Precipitación superficial

La precipitación superficial es un mecanismo en el cual los iones metálicos disueltos en una solución acuosa reaccionan con grupos funcionales presentes en la superficie del biosorbente, lo cual resulta en la formación de precipitados. Estos precipitados pueden ser de naturaleza orgánica o inorgánica, y suelen formarse durante el proceso de adsorción, particularmente en la biosorción que implica el uso de bacterias (Ahmad & Zaidi, 2021). Este fenómeno contribuye significativamente a la remoción de metales pesados desde las aguas residuales al convertir los contaminantes disueltos en sólidos, facilitando así su separación de la solución acuosa (Ahmad & Zaidi, 2020).

3.3.2.6 Reducción

La reducción es también un mecanismo importante de adsorción que desempeña un papel vital en la biosorción de metales pesados. Durante el proceso de reducción, el metal se conecta con un grupo funcional, se reduce y experimenta el crecimiento de cristales. Este cambio de estado de oxidación del metal permite que se adhiera en múltiples puntos del biosorbente, lo que puede mejorar la estabilidad de la unión y la eficiencia del proceso de biosorción (Ahmad & Zaidi, 2020).

3.3.3 Factores que afectan la biosorción

El proceso de biosorción está influenciado por una serie de factores que pueden alterar su eficiencia en la remoción de metales pesados desde soluciones acuosas. Estos factores incluyen; dosis del biosorbente, pH, temperatura, tiempo de contacto, efecto de la fuerza iónica, efectos de la concentración inicial y velocidad de agitación.

3.3.3.1 Dosis del biosorbente

La dosis de biosorbente se refiere a la cantidad de biosorbente por volumen de aguas residuales. Si la dosis aumenta, la eficiencia de biosorción aumenta porque hay más sitios activos disponibles para los iones de metales pesados. Sin embargo, la capacidad de biosorción se reduce porque los sitios activos del biosorbente no están saturados. Importante de mencionar es que una dosis más baja de biosorbente genera retenciones mayores y menores eficiencias de remoción (Beni & Esmaeili, 2020).



3.3.3.2 pH

El pH es un parámetro muy importante que desempeña un papel crítico en el proceso de biosorción. Determina la carga superficial del adsorbente, el grado de ionización y el tipo de adsorción como también afecta la solubilidad de los iones metálicos y los sitios de unión del biosorbente. Los valores óptimos de pH para maximizar la biosorción dependen específicamente del tipo de biosorbente y del metal pesado en cuestión. Sin embargo, valores típicamente usados de pH de trabajo varían entre 4 y 5 (Shamim, 2017).

3.3.3.3 Temperatura

La temperatura es un parámetro que desempeña un papel crucial en la termodinámica del proceso y en la energía cinética de los iones metálicos, pudiendo ejercer una influencia tanto positiva como negativa sobre la biosorción en determinados rangos de temperatura. Afecta la solubilidad y estabilidad de las especies de iones metálicos, ligandos y ligandos complejos. Sin embargo, algunos investigadores afirman que el efecto de la temperatura es menor que el de los parámetros anteriormente mencionados es decir la dosis de biosorbente y pH. La temperatura óptima para la remoción eficiente de iones metálicos del entorno es entre 20 y 35 [°C], temperaturas superiores pueden dañar al biosorbente y a su vez afectar el proceso de biosorción (Shamim, 2017).

3.3.3.4 Tiempo de contacto

El tiempo necesario para lograr la máxima eficiencia de remoción varía según el tipo de biosorbente, el ion de metal pesado a remover y las interacciones entre ambos. En diversos estudios, se ha observado que la biosorción de metales pesados ocurre rápidamente en las etapas iniciales del proceso, principalmente debido a la disponibilidad de numerosos sitios activos. Conforme avanza el proceso, la velocidad disminuye gradualmente a medida que estos sitios se ocupan, hasta alcanzar un punto óptimo en el que ya no se observan aumentos significativos en la remoción.

Como se mencionó anteriormente la biosorción aumenta con el tiempo de contacto hasta alcanzar el óptimo, momento en el cual se mantiene prácticamente constante. Cuando todos los sitios activos están ocupados, la biomasa se satura, lo que resulta en un equilibrio (Gouda & Taha, 2023).

3.3.3.5 Efecto de la fuerza iónica

Las aguas residuales industriales a menudo contienen otros iones que pueden interferir con la adsorción de los metales pesados. Como tendencia general, se observa que la adsorción del metal disminuye con el aumento de la fuerza iónica de la solución acuosa debido a un incremento en la atracción electrostática y cambios en la actividad del metal (Beni & Esmaeili, 2020).

3.3.3.6 Efectos de la concentración inicial

La concentración inicial proporciona una fuerza impulsora importante para superar la resistencia a la transferencia de masa del metal entre las fases acuosa y sólida. Un incremento en la concentración inicial del metal en solución influye significativamente la capacidad de retención del biosorbente; por lo tanto, la cantidad de metal adsorbido por gramo de biomasa aumenta debido a la mayor disponibilidad de iones metálicos y a la interacción con los grupos funcionales de la biomasa (Shamim, 2017). No obstante, aunque la capacidad de retención aumenta, el porcentaje óptimo de remoción total generalmente se obtiene a concentraciones iniciales bajas, ya que a medida que la concentración aumenta, los sitios de unión disponibles se saturan rápidamente.



3.3.3.7 Velocidad de agitación

La capacidad de biosorción es incrementada con el aumento de la velocidad de agitación, ya que este incremento reduce la película estancada que rodea a la partícula adsorbente, disminuyendo la resistencia a la transferencia de masa externa. A pesar de lo anterior es importante considerar que la velocidad de agitación debe ser lo suficientemente elevada para asegurar una mezcla homogénea de la solución y el biosorbente, pero lo bastante baja para evitar daños en este último (Dávila, 2012).

3.4 Antecedentes teóricos del proceso de biosorción

Los principios fundamentales para la remoción de iones metálicos, la cinética de transferencia de masa durante el proceso, los modelos utilizados para cuantificar las interacciones metal-biosorbente en equilibrio y los parámetros estadísticos que determinan la validez de estos mismos; son áreas claves del proceso de biosorción que requieren revisión detallada.

En términos operativos, existen diversas configuraciones para llevar a cabo la adsorción, como la adsorción discontinua por lotes, los reactores continuos de tanque agitado (CSTR), la adsorción en lecho fijo, en lecho expandido, en lecho fluidizado, de lecho móvil simulado, entre otras. Esta investigación se centra en la adsorción discontinua por lotes, que representa el 90% de la literatura científica y es la metodología utilizada en los ensayos de laboratorio (Piccin, et al. 2017).

La adsorción discontinua por lotes proporciona una medida de la eficacia del proceso en la remoción de sustancias específicas, así como la capacidad máxima de adsorción. La adsorción por lotes se utiliza para obtener datos y parámetros sobre la remoción de adsorbatos como isothermas de adsorción de equilibrio, evaluar la capacidad de adsorción de los adsorbentes y para el caso de la cinética recolectar intervalos de tiempo preestablecidos para analizar el nivel residual de adsorbatos en la solución (Piccin, et al. 2017).

Varios investigadores sugieren que los experimentos de adsorción por lotes son simples y pueden proporcionar una buena comprensión de las propiedades del adsorbente, la cinética y el mecanismo general de adsorción. Por lo tanto, la adsorción por lotes se prefiere a escala de laboratorio, para predecir el rendimiento de los adsorbentes antes de su aplicación a gran escala industrial (Piccin, Cadaval , Pinto, & Dotto, 2017).

3.4.1 Cálculo de la capacidad de retención

Para analizar la calidad del biosorbente, se debe determinar la capacidad de retención de éste. La capacidad de adsorción del metal por parte del biosorbente se puede calcular a partir de la diferencia entre la cantidad inicial de iones presentes en el medio acuoso y la permanencia en el medio después de la biosorción.

La Figura 2, muestra una representación esquemática de una operación de adsorción discontinua por lotes. En este caso, se pone en contacto una cierta cantidad m de un adsorbente puro con una solución de volumen inicial V_0 y concentración de adsorbato C_0 . La solución se agita a temperatura constante hasta el final de la operación (tiempo t). Durante este periodo, el adsorbato se transfiere desde la solución a la superficie del adsorbente, lo que provoca una disminución de la concentración en la solución hasta C_t , y un aumento de la cantidad de adsorbato en la fase sólida hasta llegar q_t . Cuando se alcanza el equilibrio, se cumplen las condiciones $t = t_e$, $C_t = C_e$ y $q_t = q_e$. (Piccin, et al. 2017).

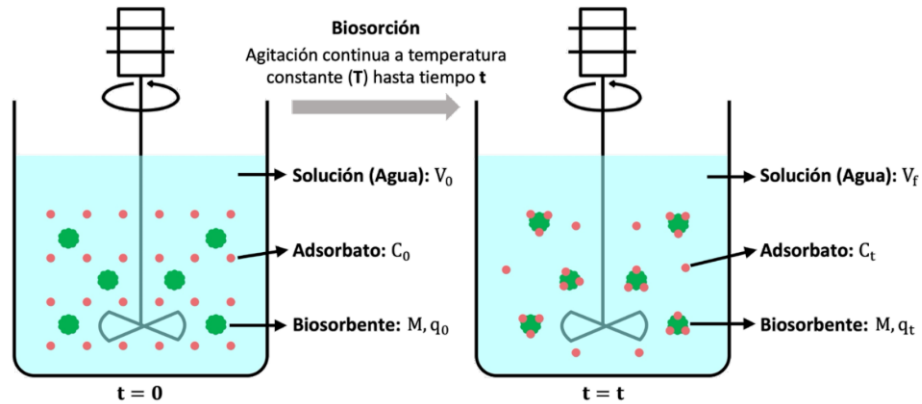


Figura 2 representación del proceso de adsorción continuo por lotes

En operaciones discontinuas por lotes, normalmente se requiere de un balance de masa sencillo para obtener la cantidad de adsorbato adsorbido por el adsorbente en un tiempo t . El balance de masa global del adsorbato viene dado por (Geankoplis, 1998) (Eykamp, 1995):

$$C_0 V_0 + q_0 m = C_t V_f + q_t m \quad [1]$$

Para un adsorbente descargado, la cantidad de adsorbato retenida en el tiempo 0, representada por q_0 , es igual a 0, lo que simplifica la Ecuación 1 en:

$$C_0 V_0 = C_t V_f + q_t m \quad [2]$$

Reescribiendo,

$$q_t = \frac{C_0 V_0 - C_t V_f}{m} \quad [3]$$

Dado que $V_0 = V_f$, es decir, que el volumen no cambia con en el tiempo, la cantidad de adsorbato retenida por el adsorbente en el tiempo t está determinada por:

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t)V}{m} \quad [4]$$

Donde:

- q_t : Capacidad de adsorción en el tiempo t [mg adsorbato/g adsorbente]
- C_0 : Concentración inicial del adsorbato en la solución [mg/L]
- C_t : Concentración del adsorbato en la solución en el tiempo t [mg/L]
- V : Volumen de la solución [L]
- m : Masa del biosorbente [g]

Además, la eficiencia de remoción del metal de interés del proceso se puede calcular utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{remoción [\%]} = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \cdot 100 \quad [5]$$

4 METODOLOGÍA

4.1 Materiales, equipos y reactivos

4.1.1 Materiales

- Vasos de precipitado de vidrio de 100 [mL], 250 [mL]
- Frascos plásticos para toma de muestra de 50 [mL]
- Matraces de aforo de 100 [mL] y 1 [L]
- Embudo Büchner
- Embudo de vidrio 100 [mL]
- Papel de microfibra de vidrio
- Espátula metálica
- Piseta con agua destilada
- Gotario de vidrio
- Pinzas
- Pipeta de 5 [mL] y 25[mL]
- Propipeta de goma
- Papel Parafilm
- Bolsas plásticas herméticas
- Elementos de protección personal

4.1.2 Equipos

- Balanza de precisión RADWAG WTC-2000.
- Balanza analítica BOECO BAS 31 plus.
- Universal Grinder modelo FW200.
 - Potencia: 800 [W]
 - Velocidad de rotación: 26000 [rpm]
- Tamices de prueba estándar W.S. TYLER N°20 y N°40.
- Orbital Shaker FINCER modelo SH30.
- Bomba de vacío WELCH modelo 2522C-02.
- Agitador magnético con calefactor ARQUIMED modelo SH-3.
- PH-metro SI Analytics modelo Lab 855.
- Espectrofotómetro de absorción atómica VARIAN modelo SpectrAA 55.
- Estufa de secado BINDER FD-S 115.

4.1.3 Reactivos

- Sulfato de cobre pentahidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) al 99,93% de pureza Sigma-Aldrich.
- Nitrato de cadmio tetrahidratado ($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) al 98% de pureza Sigma-Aldrich.

- Ácido nítrico (HNO_3) al 65% Fermont.
- Hidróxido de sodio (NaOH) al 97% Merk.
- Ácido clorhídrico (HCl) al 37% Fermont.
- Ácido sulfúrico (H_2SO_4) al 98% EMSURE Supelco.
- Agua destilada.
- Solución buffer pH 4,01 Hanna Instruments.
- Solución buffer pH 7,00 Hanna Instruments.

4.2 Proceso de selección de posibles biosorbentes

4.2.1 Criterios de selección

La fitorremediación es un proceso en el que se utilizan plantas que tienen capacidad inherente para absorber, acumular o degradar contaminantes presentes en el suelo, agua o aire. Una vez que estas se saturan en contaminantes, pierden su capacidad de remoción y pasan a ser consideradas biorresiduos, los cuales deben ser tratados adecuadamente o pueden convertirse en una fuente secundaria de contaminación. Con el fin de evitar esto, se utilizan diversos métodos que tratan la biomasa vegetal derivada de la fitorremediación, como tratamientos térmicos, de extracción, microbianos, vertederos de compresión y utilización de nanopartículas (Muñoz, 2025).

Para la selección de especies con potencial de biosorción se realiza la revisión de literatura, principalmente en estudios de fitorremediación de cobre y cadmio en suelos, el motivo tras este criterio es la hipótesis de que, al ser especies vegetales capaces de absorber los contaminantes de forma natural durante su crecimiento, los tejidos de estas especies deberían ser capaces de adsorber el contaminante mediante un proceso de biosorción, es importante mencionar que este criterio no asegura que cualquier planta que sea una buena especie fitorremediante automáticamente sea un buen biosorbente. Otros criterios incluyen la facilidad de adquisición de las plantas, al igual que la existencia de estudios de biosorción con estas plantas en el tratamiento de otros contaminantes y nulos o pocos estudios en su uso como biosorbentes para el tratamiento de cobre o cadmio en soluciones acuosas.

4.2.2 Posibles biosorbentes encontrados

Los criterios que se plantean en el punto 4.2.1, se utilizan para la realización del estudio bibliográfico, con el cual se determinan las siguientes especies vegetales como potenciales biosorbentes de cobre o cadmio, esto basado en estudios de fitorremediación realizados para el tratamiento de estos contaminantes.

4.2.2.1 *Pelargonium zonale*

Pelargonium zonale, también llamado Geranio, es una especie nativa de África meridional, esta planta es un arbusto trepador, con tallos peludos cuando la planta es joven y se vuelven leñosos con la edad. Las hojas suelen tener un color oscuro con una zona de pigmentación en zigzag. Las flores nacen en un umbel e individualmente son marcadamente zigomorfas (tienen simetría bilateral) (Lawrence, 2002).



Figura 3 *Pelargonium Zonale* o Geranio común

En el estudio de (Valdivia, y otros, 2018), se determina la capacidad de fitorremediación de cuatro especies vegetales, incluido el *Pelargonium zonale*, en el tratamiento de un suelo contaminado artificialmente con 278 mg/kg de sulfato de cobre. En este estudio el *Pelargonium zonale* redujo el nivel de cobre del suelo a 89 mg/kg, esto demuestra su utilidad para la fitorremediación de cobre. Otro estudio realizado por (Obeso Obando, 2021), evalúa la capacidad del *Pelargonium zonale* para remover arsénico, cadmio y cobre de muestras de suelo contaminado, este muestra una reducción de hasta un 74% y 79%, respecto a la concentración inicial de arsénico y cadmio respectivamente, y una reducción del 55% respecto a la concentración inicial de cobre.

4.2.2.2 *Helianthus annuus*

Helianthus annuus, comúnmente llamado girasol, es una planta herbácea anual de la familia de las asteráceas originaria de centro y Norteamérica y cultivada en todo el mundo como una planta alimenticia, oleaginosa y ornamental. El *Helianthus annuus* puede llegar a medir 3 metros de alto, los tallos son generalmente erectos e hispados. La mayoría de las hojas son caulinares, alternas, pecioladas, con base cordiforme y bordes aserrados.



Figura 4 *Helianthus annuus* o Girasol

El estudio de (Valdivia, y otros, 2018), determina que tiene potencial como una planta fitorremediante de cobre. En este el *Helianthus annuus* reduce el contenido de cobre del suelo artificialmente contaminado

desde una concentración de 278 mg/kg de cobre, hasta 119 mg/kg. En otro estudio realizado en la ciudad de Puno, Perú se determina la capacidad de absorción de cadmio de la planta de *Helianthus annuus* en un ambiente controlado, midiendo su capacidad de retención en hojas, tallo y raíz, obteniendo como resultado una absorción media de cadmio en la raíz de 5,7%, en el tallo de 1,2% y en las hojas de un 0,5% (Quispe, 2017).

4.2.2.3 *Medicago sativa*

Medicago sativa o alfalfa es una especie de planta herbácea perteneciente a la familia de las fabáceas o leguminosas. Son hierbas perennifolias, alcanzan un tamaño de los 30 a 60 cm de altura. Es una planta utilizada ampliamente como pasto y con este propósito se cultiva intensamente en el mundo entero. Su ciclo vital es de 5 a 12 años dependiendo de su variedad y el clima, sus raíces suelen ser muy profundas, pudiendo medir hasta 4,5 metros, debido a esto, la planta es especialmente resistente a la sequía (Britannica editors, 2025).



Figura 5 *Medicago sativa* o alfalfa

Se han realizado estudios de fitorremediación de cobre utilizando *Medicago sativa*, el estudio de (Gonzales, et al.) es uno de ellos, en este se estudia la *Medicago sativa* en suelo contaminado de forma artificial con 2 niveles de cobre, los resultados de esta investigación arrojan una reducción del cobre en el suelo desde una concentración de 278 ppm y de 293 ppm hasta 124 y 143 ppm respectivamente. El estudio de (Valdivia, y otros, 2018) investiga la capacidad de fitorremediación de la *Medicago sativa*, obteniendo como resultado una reducción de la concentración de cobre en el suelo desde 278 mg/kg a 77 mg/kg.

4.2.2.4 *Ricinus communis*

Ricinus communis o higuera es una planta arbustiva de la familia Euphorbiaceae. Es originaria de África tropical, pero se ha naturalizado en áreas tropicales y subtropicales de todo el mundo convirtiéndose en una maleza invasora. Produce gran cantidad de semillas altamente viables y venenosas. De esta planta pueden extraerse compuestos anticancerígenos y el aceite de ricino (higuera) que sí es comestible.



Figura 6 *Ricinus communis* o higuerilla

De acuerdo al estudio de (Valdivia, y otros, 2018) la *Ricinus communis* tiene una buena capacidad como fitorremediante de cobre, en su estudio de obtiene como resultado una reducción de la concentración de cobre en el suelo desde 278 mg/kg hasta 90 mg/kg. En el estudio realizado por (Verde Malpartida, 2025) se investiga la reducción de la contaminación del suelo por cadmio y plomo mediante la fitorremediación con la planta de *Ricinus communis*, obteniendo como resultado una disminución en la contaminación por cadmio de un 29.73%.

4.2.2.5 *Arundo donax*

También conocida como caña común o caña de castilla, es una planta semejante al bambú, del que se diferencia porque de cada nudo sale una hoja única que envaina el tallo. Puede alcanzar los 3 a 6 metros de altura, tiene tallo grueso, hojas lanceoladas que envuelven el tallo en forma de láminas verdes, las flores están en una panícula de espiguillas violáceas o amarillas, florecen al final del verano y otoño. Se encuentran en humedales de aguas permanentes o estacionales, es originaria de Asia, pero se encuentra en la zona mediterránea y norte de África y en toda América. Está incluida en la lista de las “100 especies invasoras exóticas más dañinas del mundo” de la unión internacional para la conservación de la naturaleza (Lowe S., 2004).



Figura 7 *Arundo donax* o caña común

De acuerdo al estudio de (Sabeen, et al., 2013), se comprueba que la planta *Arundo donax* tiene potencial para fitorremediar cadmio, según el estudio es más eficiente en la remediación de aguas que en su uso en suelos contaminados. Respecto a la fitorremediación de cobre, hay estudios como el de (Cano-Ruiz, et al. 2020) que miden la tolerancia de la planta para desarrollarse en ambientes saturados de cobre, los resultados que arrojan son positivos y señalan la planta como un potencial fitorremediante para cobre, pero no se han realizado estudios midiendo su capacidad de fitorremediación para este metal.

4.2.2.6 *Equisetum giganteum*

Especie botánica de equiseto, nativa de Sudamérica y América central, desde Chile central, Argentina, Uruguay, este de Brasil y al norte y sur de México. Es uno de los Equisetos más grandes, midiendo de 2 a 5 metros de altura, sus tallos son similares a cañas, y a diferencia de otros equisetos, no presenta una separación entre tallos fotosintéticos y portadores de esporas. Tiene rizomas largos y sus hojas forman vainas cilíndricas desde los nudos de los tallos y comprenden muchas hojuelas lineales.



Figura 8 *Equisetum giganteum*

El *Equisetum giganteum* ha sido utilizado como indicador de contaminación por cobre, mercurio y arsénico en el valle de Copiapó, esto para identificar riesgos ambientales en la agricultura local. Según (Sepúlveda,

2023) el *Equisetum giganteum* es una de las especies con mayor absorción de cobre. Otro estudio señala que la planta es muy resistente a condiciones de alta concentración de metales pesados y señala que debería ser utilizada para remediar sectores con altas concentraciones de cadmio (Vega Sánchez, 2018).

4.2.2.7 *Ambrosia ambrosioides*

Ambrosia ambrosioides, también conocida como chicura, es una especie de planta de la familia de las asteráceas, originaria de Norteamérica donde se encuentra en los desiertos del norte de México y sur de Arizona. Crece como arbusto alcanzando tamaños de 1 a 2 metros de altura, con hojas gruesas y dentadas. La floración ocurre principalmente en febrero y abril y produce frutos. Se puede encontrar en ambientes con arenas lavadas y otras áreas disturbadas como bordes de caminos y a veces en grietas de las rocas.



Figura 9 *Ambrosia ambrosioides* o Chicura

En el estudio realizado por (Gottfried, et al. 2019) se evalúa el potencial fitorremediador de la planta para el tratamiento de suelos contaminados con cobre, cadmio y plomo, señalando que la planta absorbe en mayor cantidad el cobre, seguido del cadmio y por último el plomo y concluye que presenta una alta fitoextracción y que la *Ambrosia ambrosioides* puede ser utilizada en fitorremediación y sanidad de suelos.

4.2.2.8 *Trifolium repens*

También llamado trébol blanco, es una especie nativa de Europa, norte de África y Asia occidental. Está extendida por toda Norteamérica y gran parte de Sudamérica, donde se ha naturalizado. Se trata de una especie herbácea perenne, que puede alcanzar una altura de 10 cm. El *Trifolium repens* es exigente en luz y sensible a la sequía y es poco tolerante a la salinidad, sin embargo, es capaz de crecer en suelos pobres, ácidos o arenosos. En sus raíces desarrolla módulos formados por bacterias nitrificantes, en condiciones adecuadas de temperatura, humedad y suelo, las bacterias fijan importantes cantidades de nitrógeno de la atmósfera (iNaturalist, s.f.).



Figura 10 *Trifolium repens* o trébol blanco

En un estudio que evalúa la bioacumulación de metales pesados en tejido vegetal que se encuentra en áreas mineras abandonadas, se analiza la acumulación de metales en *Trifolium repens*, mostrando una alta absorción de cobre y cadmio al igual que otros metales (Cahuana & Aduvire, 2021). Otro estudio realizado por (Silva Caris, 2013) en el que se evalúa el potencial fitoacumulador del *Trifolium repens* para ofrecer una alternativa de limpieza de sitios contaminados con cobre, se determina que los cultivos de *Lolium perenne* más *Trifolium repens* presentan mayor eficiencia en cuanto a absorción de cobre.

4.2.2.9 *Lolium perenne*

Lolium perenne, llamada comúnmente ballica, es una planta de importancia en la creación de césped y producción de forrajes en lugares de clima templado y subtropical. tiene tallos que crecen hasta 80 cm y hojas de color verde oscuro y brillante. Esta planta es originaria de Europa y norte de África, y ha sido introducida en Sudamérica, Australia y Nueva Zelanda. Tiene una importancia económica debido a su potencial de producir gran cantidad de biomasa de buena calidad y apetecible para el ganado (iNaturalist, s.f.).



Figura 11 *Lolium perenne* o Ballica

En el estudio realizado por (Silva Caris, 2013) la planta *Lolium perenne* da buenos resultados en la absorción de cobre, lo cual sería un indicador de su potencial como fitorremediante de este metal. Otro estudio que también prueba el uso de *Lolium perenne* como planta fitorremediadora de cobre, es el estudio de (Moreno Molina, 2024) donde se compara la *Lolium perenne* y *Medicago sativa* o alfalfa para el

tratamiento de suelos contaminados, en esta investigación la especie *Lolium perenne* tiene un mejor rendimiento que la *Medicago sativa*. Por último, el estudio realizado por (Gutiérrez Ginés, 2011) en la universidad de valencia señala la alta absorción de cobre que esta planta presenta y señala su potencial como fitorremediador.

4.2.3 Selección final

Todas las especies mencionadas en el punto 4.2.2 corresponden a plantas con capacidades fitorremediadoras útiles para tratar cobre y/o cadmio, estas tienen potencial como biosorbentes. Para la realización de las pruebas en laboratorio se seleccionan cuatro especies, con el fin de evaluar su viabilidad como biosorbentes, la selección se realiza basándose en la falta o poca cantidad de estudios previos de biosorción de cobre y/o cadmio realizados con esa especie, esto descarta especies como el girasol o la alfalfa que han sido vastamente estudiadas, otro criterio es la facilidad de adquisición de las especies. En base esto, las especies vegetales seleccionadas son, *Lolium perenne* (ballica), *Arundo donax*, *Pelargonium zonale* (geranio) y *Equisetum giganteum*.

4.3 Preparación de los biosorbentes

4.3.1 Materia prima

Esta sección hace referencia a la obtención de las especies vegetales, las cuales deben ser deshidratadas para su posterior molienda, dependiendo de la especie, la adquisición y tratamiento previo varía, en caso de *Lolium perenne* o ballica, esta al ser una especie de forraje utilizado para alimento de ganado, se vende comúnmente de forma deshidratada por lo que posterior a la adquisición no hace falta tratamiento previo, la especie *Arundo donax* no es una especie vegetal que se encuentre a la venta, ya que es considerada una especie de maleza sin valor agregado, esta se puede encontrar dentro de la región de Valparaíso por lo que se realiza la extracción de la planta en terreno, se realizan 3 lavados con agua potable y posteriormente 3 lavados con agua destilada para retirar cualquier residuo que se encuentre adherido a la planta y finalmente se procede a secarla en estufa a 50°C hasta peso constante. Tanto el *Equisetum giganteum* como *Pelargonium zonale* o geranio son plantas ornamentales que se pueden conseguir en viveros; al tener que utilizar la planta en su totalidad se retira esta de su macetero y de forma manual se procede a remover la tierra que se encuentra adherida a las raíces de la planta, la tierra removida se descarta, una vez extraído lo más posible de forma manual se procede a lavar la planta con agua potable para separar toda la tierra y otros residuos adheridos a la planta y se procede a enjuagar 3 veces con agua destilada, finalmente se procede a secar las plantas en una estufa a 50°C hasta peso constante.

4.3.2 Reducción de tamaño

Una vez realizado el pretratamiento de lavado y secado, se pasa al proceso de reducción de tamaño, en este se utiliza un molinillo (universal grinder) que se muestra en la Figura 12a), de 800[W] y 26.000 [rpm] con un tiempo de operación de 5 [s]. Luego se realiza la clasificación de tamaño utilizando tamices de acero inoxidable N°20 y N°40 como de muestra en la figura 12b), lo cual permite obtener las partículas que se encuentran entre 425µm y 850µm.



a)



b)

Figura 12 a) Universal Grinder; b) Tamices de prueba

Para obtener la fracción de tamaño de partícula de interés se hace un tamizado manual, colocando el tamiz con mayor diámetro de apertura en la parte superior (850 micrones) y el de menor abertura en la parte inferior (425 micrones). El material molido previamente se va cargando en el tamiz superior y se lleva a cabo una agitación durante aproximadamente 1 min.

Como resultado de este proceso se obtiene una fracción retenida en el tamiz superior, que tiene partículas de diámetro superior a 850 μm , por otro lado, la fracción contenida en la sección intermedia es el tamaño de partícula deseada, con partículas de entre 425 a 850 μm , y la sección inferior contiene las partículas de tamaño inferior a 425 μm . Las partículas deseadas se almacenan en una bolsa plástica hermética previamente tarada y se registra la masa y se reserva hasta su utilización en los estudios de biosorción, este procedimiento se repite con todos los biosorbentes.

Cabe señalar que los tamices se limpian con un pincel para evitar la aglomeración de partículas, facilitar la separación y evitar mezcla de biosorbentes.

4.4 Preparación de las soluciones

Para el desarrollo de la etapa experimental, se realiza la preparación de soluciones sintéticas para simular RILes de cobre y cadmio.

4.4.1 Solución de cobre

Para la preparación de la solución sintética de este metal se utiliza sulfato de cobre pentahidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) con pureza cercana a 100%.

Se trabaja con una concentración de 100 [mg/L], debido a que desde esta concentración la biosorción es más efectiva y menos costosa que utilizando otros métodos de remoción de metales pesados. (Schiewer & Volesky, 1995)

Para el caso de la preparación de la solución de cobre, se mide la masa de sulfato de cobre necesaria para preparar un volumen de 2 L de solución con una concentración de cobre de 100 [mg/L], para esto se calculan que se requieren 0,7857 [g] de sulfato de cobre pentahidratado, este se pesa en una balanza analítica en un vaso precipitado, luego se le agrega agua destilada para disolverlo, esta solución se vierte en un matraz de



aforo de 1 [L], se afora con agua destilada, y se vierte en un bidón de plástico de 5 [L], luego se afora nuevamente con agua destilada, para completar los 2 litros de solución y evitar que queden remanentes de cobre en el matraz de aforo, luego el agua destilada aforada se vierte igualmente en el bidón de 5 [L] donde se mezcla la solución final, luego se procede a regular el pH de la solución hasta un valor de 4,5 con soluciones de ácido sulfúrico y se procede a guardarla.

4.4.2 Solución de cadmio

Para la preparación de la solución sintética de este metal se utiliza nitrato de cadmio tetrahidratado ($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) con pureza cercana a 98%.

Para el caso de la preparación de la solución de cadmio, se mide la masa de nitrato de cadmio tetrahidratado necesaria para preparar un volumen de 2 L de solución con una concentración de cadmio de 100 [mg/L], para esto se requieren 0,5601[g] de la sal, la cual se pesa en una balanza analítica en un vaso precipitado, y se prepara la solución siguiendo el mismo procedimiento que para la solución de cobre.

4.5 Experimentos de biosorción

En la biosorción es necesario poner en contacto una solución que contiene el ion metálico de interés con una cantidad definida de biosorbente durante un tiempo determinado, en condiciones de operación definidas. Este proceso se desarrolla a un pH de 4,5 y a una razón de masa de biosorbente a volumen de solución (M/V) de 10 [g/L], agregando 1 [g] de biosorbente por 100 [mL] de solución. La masa de biosorbente se mide sobre un vaso precipitado de 250 [mL] utilizando una balanza analítica, donde posteriormente se agregan los 100 [mL] de solución, luego se cubren con papel film plástico para evitar salpicaduras y contaminación de muestras. Los vasos precipitados se dejan en la superficie del agitador orbital, con agitación constante. Durante este proceso el pH de la solución cambia, y es necesario medirlo y corregirlo con gotas de ácido sulfúrico o hidróxido de sodio de ser necesario hasta alcanzar un pH de 4,5 cada 15 minutos, esto se repite hasta que las soluciones alcancen el equilibrio y se procede a dejar la biosorción con agitación constante durante 24 horas.

Al concluir cada experimento se separa la fase líquida de la sólida mediante filtración al vacío, dejando el biosorbente retenido sobre el papel filtro y la solución con el ion metálico se recolecta en tubos de ensayo plásticos de 50 [mL], los cuales se etiquetan y almacenan para posterior digestión y análisis.

4.6 Análisis de las muestras

El análisis de las muestras se realiza de acuerdo con la NCh 2313/10, que establece el método analítico para la determinación de metales pesados en aguas residuales (Instituto Nacional de Normalización, 1996), mediante Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA) utilizando el equipo VARIAN SpectrAA 55 (Figura 13).

Las muestras se someten, previo al análisis, a un proceso de digestión química con ácido nítrico (HNO_3) al 65%, con el objetivo de eliminar turbiedad, color y materia orgánica que pueda estar presente en la muestra y que afecte negativamente a la medición.



Figura 13 EAA VARIAN SpectraAA 55

Para el proceso de digestión, se toma una alícuota de 25 [mL] de cada muestra con una probeta, esta se agrega a un vaso precipitado de 100 [mL] previamente etiquetado. Luego, bajo una campana de extracción de gases, se agregan al vaso con la alícuota, 40 [mL] de ácido nítrico concentrado y se coloca en una placa calefactora, de manera que se produzca una evaporación lenta y evitando que llegue a ebullición, hasta que el volumen alcance los 20 [mL], evitando que la muestra se seque y que se produzca precipitación. La digestión se completa hasta obtener una solución transparente, si no es el caso, se debe seguir agregando ácido nítrico cuantas veces sea necesario.

Terminada la digestión, el vaso de precipitado se deja enfriar, luego se vierte la solución digerida a un matraz de aforo de 100 [mL] con ayuda de un embudo de vidrio. Posteriormente se agregan 5 [mL] de ácido clorhídrico para ajustar las condiciones de acidez de la solución, y se afora con agua destilada. El matraz de aforo se agita para homogeneizar la muestra y se vierte a un frasco plástico de toma de muestra previamente etiquetado, para llevar al EAA y realizar el análisis de la concentración del metal estudiado.

5 RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en las pruebas de biosorción para las cuatro especies vegetales seleccionadas.

5.1 Pruebas de biosorbentes en solución sintética de Cu^{2+}

En la Tabla 6 se presentan los resultados obtenidos de los experimentos de biosorción de Cu^{2+} utilizando las especies *Equisetum Giganteum*, *Pelargonium Zonale*, *Lolium Perenne* y *Arundo donnax*, bajo una concentración inicial de 100[mg/L] de Cu^{2+} , tamaño de partícula de 425 – 850 μm , una razón M/V de 10 [g/L], pH de $4,5 \pm 0,1$.

Tabla 6 Resultados experimentales, Biosorción de Cu^{2+} en solución sintética (tamaño de partícula de 425-850 μm , pH de $4,5 \pm 0,1$, $C_0 = 100$ [mg/L])

Biosorbente	C ₀ experimental [mg/L]	C _t [mg/L]	C _t promedio ± desviación estándar [mg/L]	q _t [mg/g]	q _t promedio ± desviación estándar [mg/g]	Remoción [%]	Remoción promedio ± desviación estándar [%]
<i>Equisetum Giganteum</i>	100	17,36	17,08±0,52	8,26	8,29±0,05	82,64	82,92±0,52
		16,48		8,35		83,52	
		17,4		8,26		82,60	
<i>Pelargonium Zonale</i>		50,84	52,25±1,28	4,92	4,77±0,13	49,16	47,75±1,28
		52,6		4,74		47,40	
		53,32		4,67		46,68	
<i>Lolium Perenne</i>		76,08	76,04±0,50	2,39	2,40±0,05	23,92	23,96±0,50
		76,52		2,35		23,48	
		75,52		2,45		24,48	
<i>Arundo Donax</i>		85,32	84,49±0,72	1,47	1,55±0,07	14,68	15,51±0,72
		84,08		1,59		15,92	
		84,08		1,59		15,92	

5.2 Pruebas de biosorbentes en solución sintética de Cd^{2+}

En la Tabla 7 se presenta los resultados obtenidos de los experimentos de biosorción de Cd^{2+} utilizando las especies *Equisetum Giganteum*, *Pelargonium Zonale*, *Lolium Perenne* y *Arundo donnax*, bajo una concentración inicial de 100 [mg/L] de Cd^{2+} , tamaño de partícula de 425 – 850 μm , una razón M/V de 10 [g/L], pH de $4,5 \pm 0,1$.

Tabla 7 Resultados experimentales, Biosorción de Cd^{2+} en solución sintética (tamaño de partícula de 425-850 μm , pH de $4,5 \pm 0,1$, $C_0 = 100$ [mg/L])

Biosorbente	C ₀ experimental [mg/L]	C _t [mg/L]	C _t promedio ± desviación estándar [mg/L]	q _t [mg/g]	q _t promedio ± desviación estándar [mg/g]	Remoción [%]	Remoción promedio ± desviación estándar [%]
<i>Equisetum Giganteum</i>	113,83	23,52	22,41±1,49	7,65	7,76±0,15	79,34	80,31±1,31
		23,00		7,70		79,80	
		20,72		7,93		81,80	
<i>Pelargonium Zonale</i>		21,40	22,11±1,88	7,86	7,79±0,19	81,20	80,58±1,65
		24,24		7,58		78,71	
		20,68		7,93		81,83	
<i>Lolium Perenne</i>		88,52	88,52±0,20	1,15	1,15±0,02	22,24	22,24±0,18
		88,32		1,17		22,41	
		88,72		1,13		22,06	
<i>Arundo Donax</i>		96,72	96,12±0,60	0,33	0,39±0,06	15,03	15,56±0,53
		96,12		0,39		15,56	
		95,52		0,45		16,09	

6 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

La notación utilizada en los gráficos comparativos es la siguiente: EG corresponde a *Equisetum Giganteum*, PZ a *Pelargonium Zonale* (Geranio), LP a *Lolium Perenne* (Ballica) y AD a *Arundo Donax*, seguido del contaminante tratado en la experiencia siendo este cobre (Cu) o Cadmio (Cd).

6.1 Comparación de resultados de biosorción de cobre

Los resultados que se obtienen en la experiencia de biosorción de cobre, permiten comparar la efectividad como biosorbente de las especies vegetales estudiadas. En la Figura 14 se muestra gráficamente el porcentaje de remoción de cobre de las distintas especies vegetales.

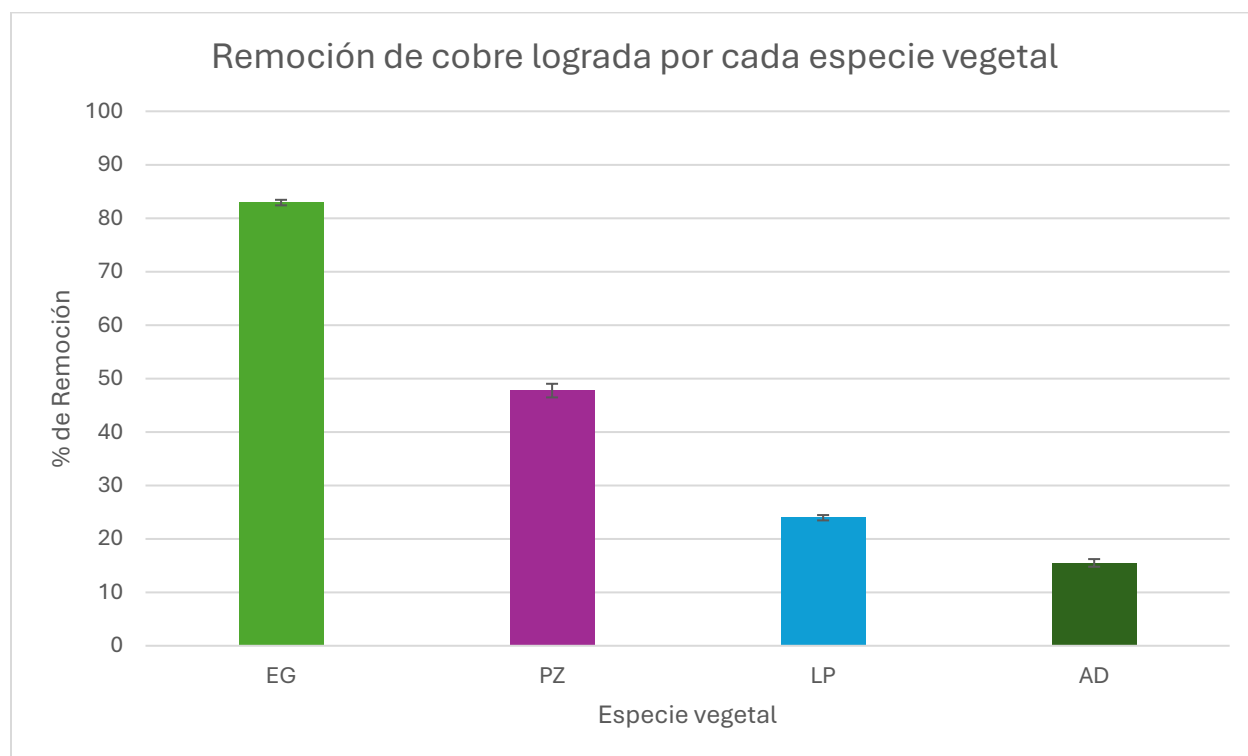


Figura 14 Remoción de cobre lograda por cada especie vegetal

Se observa que todas las especies estudiadas tienen la capacidad de adsorber el cobre disuelto en la solución sintética, siendo la especie *Equisetum Giganteum* la que muestra mayor porcentaje de remoción de dicho contaminante con un porcentaje de remoción sobre el 80%, igualmente se recomienda estudiar el desempeño de la especie *Pelargonium Zonale* (Geranio) bajo otras condiciones, ya que ésta muestra una remoción cercana al 50%, mientras que *Lolium Perenne* y *Arundo Donax* muestran el menor porcentaje de remoción, si bien remueven el contaminante el porcentaje es muy bajo como para considerar dichas especies como biosorbentes factibles para el tratamiento de aguas contaminadas con cobre.

6.2 Comparación de resultados de biosorción de cadmio

Los resultados que se obtienen en la experiencia de biosorción de cadmio, permiten comparar la efectividad como biosorbente de las especies vegetales estudiadas. En la Figura 15 se muestra el porcentaje de remoción de cadmio de las distintas especies vegetales.

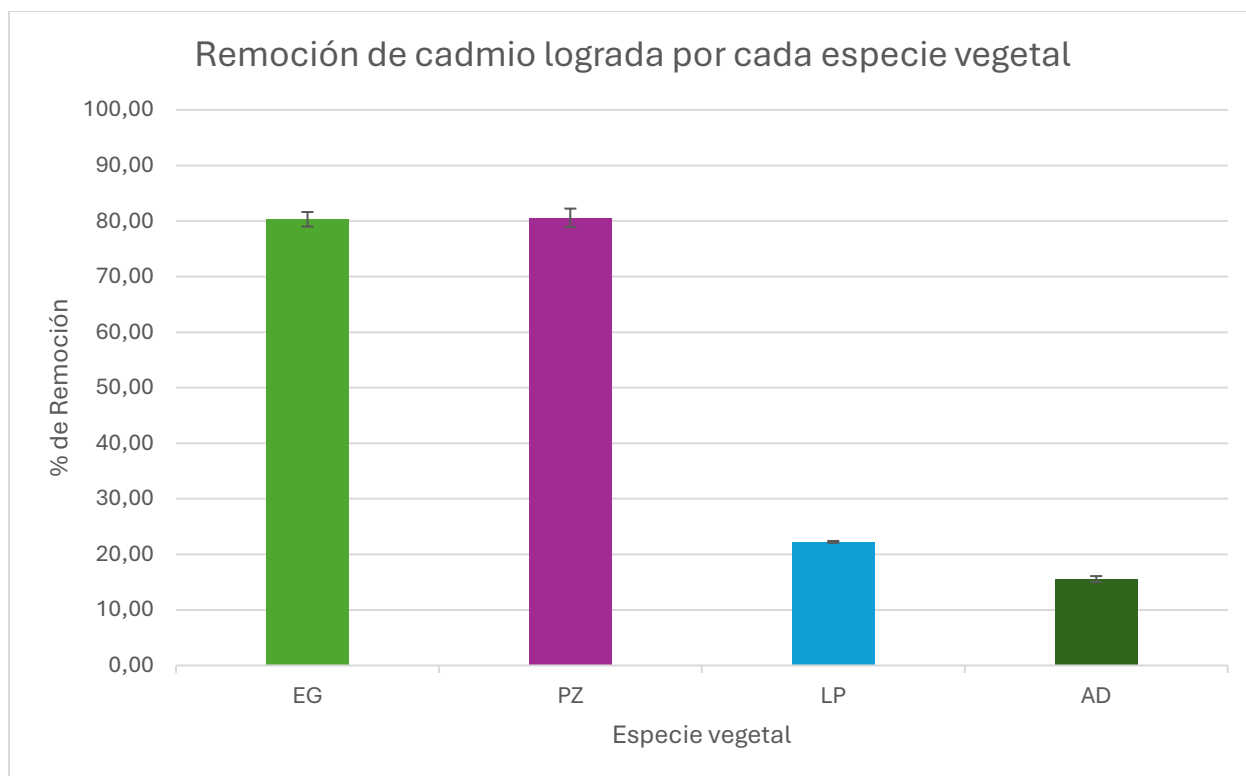


Figura 15 Remoción de cadmio lograda por cada especie vegetal

Se observa en la Figura 15 que, al igual que con el cobre, todas las especies estudiadas tienen la capacidad de adsorber cadmio disuelto en la solución sintética, siendo las especies *Equisetum Giganteum* y *Pelargonium Zonale* (Geranio) las que muestran mayor porcentaje de remoción, con un porcentaje de cercano al 80%, mientras que las especies *Lolium Perenne* y *Arundo Donax* muestran un bajo porcentaje de remoción, si bien remueven el contaminante el porcentaje es muy bajo como para considerar dichas especies como biosorbentes factibles para el tratamiento de aguas contaminadas con cadmio.

6.3 Comparación de resultados con otros estudios de la UTFSM

El estudio de (Ortiz, 2024) realiza experiencias de biosorción de cobre y cadmio bajo las mismas condiciones que en este estudio, las cuales corresponden a una concentración inicial de cobre o cadmio de 100 [mg/L] en solución sintética, tamaño de partícula de los biosorbentes de 425 a 850 μm , relación M/V de 10 [mg/g] y un pH constante de 4,5, en este se realizan las experiencias con otras especies vegetales como biosorbentes obteniendo los resultados que se muestran en las tablas 8 y 9.



Tabla 8 Resultados experimentales de biosorción de Cu^{2+} de estudio realizado por Camila Ortiz

Biosorbente	C ₀ experimental [mg/L]	C _t [mg/L]	C _t promedio ± desviación estándar [mg/L]	q _t [mg/g]	q _t promedio ± desviación estándar [mg/g]	Remoción [%]	Remoción promedio ± desviación estándar [%]
<i>Haplopappus baylahuen</i>	96,4	24,1	23,8±0,5	7,2	7,3±0,1	75,0	75,3±0,5
		24,1		7,2		75,1	
		23,2		7,3		76,0	
<i>Leptocarpus rivularis</i>		29,5	29,8±0,3	6,7	6,7±0,0	69,5	69,1±0,3
		29,8		6,7		69,1	
		30,1		6,6		68,8	
<i>Haplopappus foliosus</i>		87,7	89,2±1,7	0,9	0,7±0,2	9,1	7,5±1,7
		88,9		0,8		7,8	
		91,0		0,5		5,7	

Tabla 9 Resultados experimentales de biosorción de Cd^{2+} de estudio realizado por Camila Ortiz

Biosorbente	C_0 experimental [mg/L]	C_t [mg/L]	C_t promedio $\pm$ desviación estándar [mg/L]	q_t [mg/g]	q_t promedio $\pm$ desviación estándar [mg/g]	Remoción [%]	Remoción promedio $\pm$ desviación estándar [%]
<i>Haplopappus baylahuen</i>	110,3	12,6	13,4 $\pm$ 1,2	9,8	9,7 $\pm$ 0,1	88,6	87,8 $\pm$ 1,1
		14,5		9,6		86,8	
		12,2		9,8		89,0	
		14,4		9,6		86,9	
<i>Leptocarpus rivularis</i>		33,8	32,5 $\pm$ 1,5	7,7	7,8 $\pm$ 0,1	69,4	70,5 $\pm$ 1,3
		30,9		7,9		72,0	
		32,9		7,7		70,2	
<i>Haplopappus foliosus</i>	118,8	63,6	65,3 $\pm$ 1,5	5,5	5,3 $\pm$ 0,2	46,5	45,0 $\pm$ 1,3
		66,5		5,2		44,1	
		65,9		5,3		44,5	

El estudio de (Godoy, 2024) realiza experiencias de biosorción de cobre y cadmio desde soluciones sintéticas bajo las mismas condiciones que el presente estudio y el de (Ortiz, 2024), con la excepción de las especies vegetales utilizadas y la utilización de un tamaño de partícula de biosorbente de 150 a 425 μm , los resultados de su estudio se presentan en las tablas 10 y 11.



Tabla 10 Resultados experimentales de biosorción de Cu^{+2} de estudio realizado por Bruno Godoy

Biosorbente	C ₀ experimental [mg/L]	C _t [mg/L]	C _t promedio ± desviación estándar [mg/L]	q _t [mg/g]	q _t promedio ± desviación estándar [mg/g]	Remoción [%]	Remoción promedio ± desviación estándar [%]
<i>Schinus molle</i>	100,3	43,1	43,6±0,6	5,7	5,7±0,1	57	57±1
		44,3		5,6		56	
		43,6		5,7		57	
<i>Lomatia hirsuta</i>		42,9	44,0±1,0	5,7	5,6±0,1	57	56±1
		44,5		5,6		56	
		44,5		5,6		56	
<i>Aristotelia chilensis</i>		34,7	34,1±0,6	6,6	6,6±0,1	65	66±1
		33,5		6,7		67	
		34,1		6,6		66	

Tabla 11 Resultados experimentales de biosorción de Cd^{2+} de estudio realizado por Bruno Godoy

Biosorbente	C ₀ experimental [mg/L]	C _t [mg/L]	C _t promedio ± desviación estándar [mg/L]	q _t [mg/g]	q _t promedio ± desviación estándar [mg/g]	Remoción [%]	Remoción promedio ± desviación estándar [%]
<i>Schinus molle</i>	104,9	38,1	38,1±0,9	6,7	6,7±0,1	64	64±1
		37,3		6,8		65	
		39,0		6,6		63	
<i>Lomatia hirsuta</i>		56,4	54,9±1,5	4,9	5,0±0,2	46	48±1
		55,0		5,0		48	
		53,4		5,2		49	
<i>Aristotelia chilensis</i>		44,5	45,8±1,6	6,0	5,9±0,2	58	56±2
		47,6		5,7		55	
		45,4		6,0		57	

En base a estas investigaciones previas se realiza una comparación de la remoción lograda por las distintas especies vegetales, esto para comprobar el buen rendimiento de las especies estudiadas en este trabajo. La comparación se muestra en las Figuras 16 y 17, por simplicidad, se denotan las especies como HB a *haplopappus baylahuen*, LR a *Leprocarpha rivularis*, HF a *Haplopappus foliosus*, SM a *Schinus molle*, LH a *Lomatia hirsuta*, AC a *Aristotelia chilensis*.

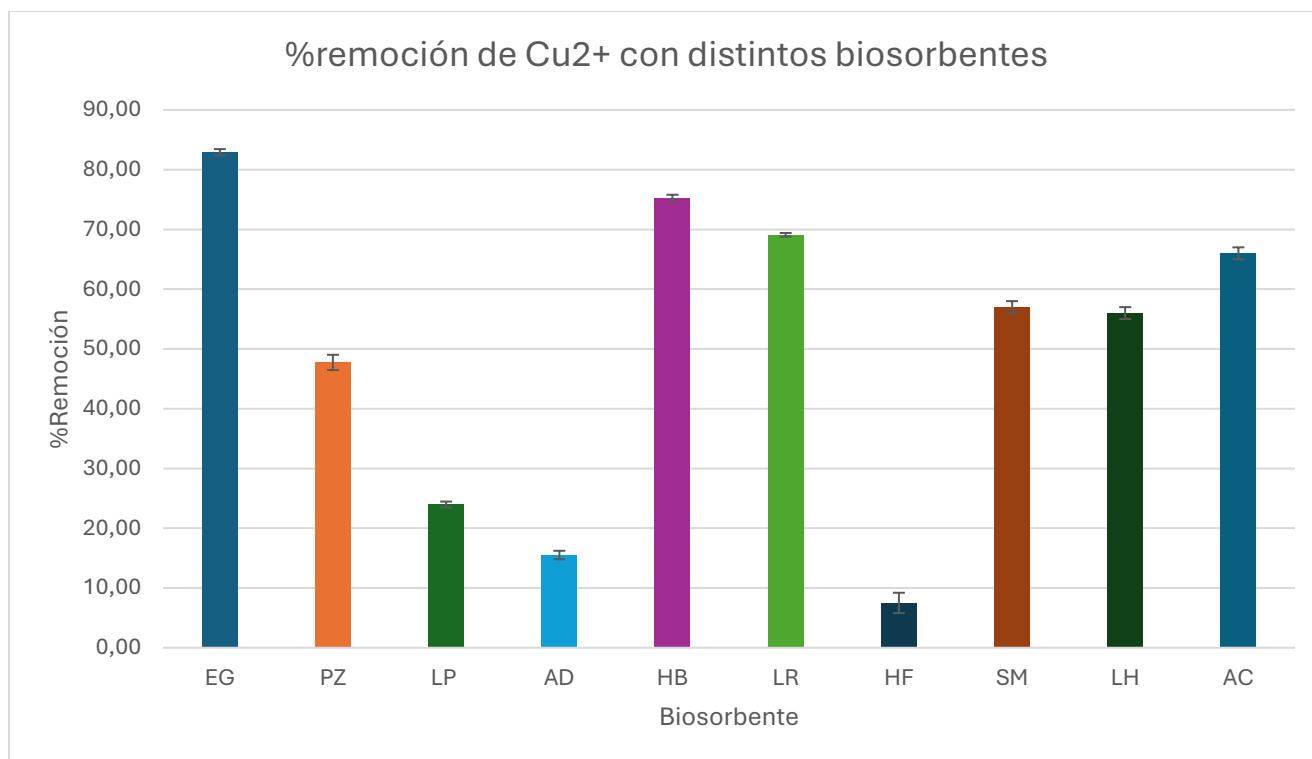


Figura 16 Comparación de % de remoción de cobre con distintos biosorbentes

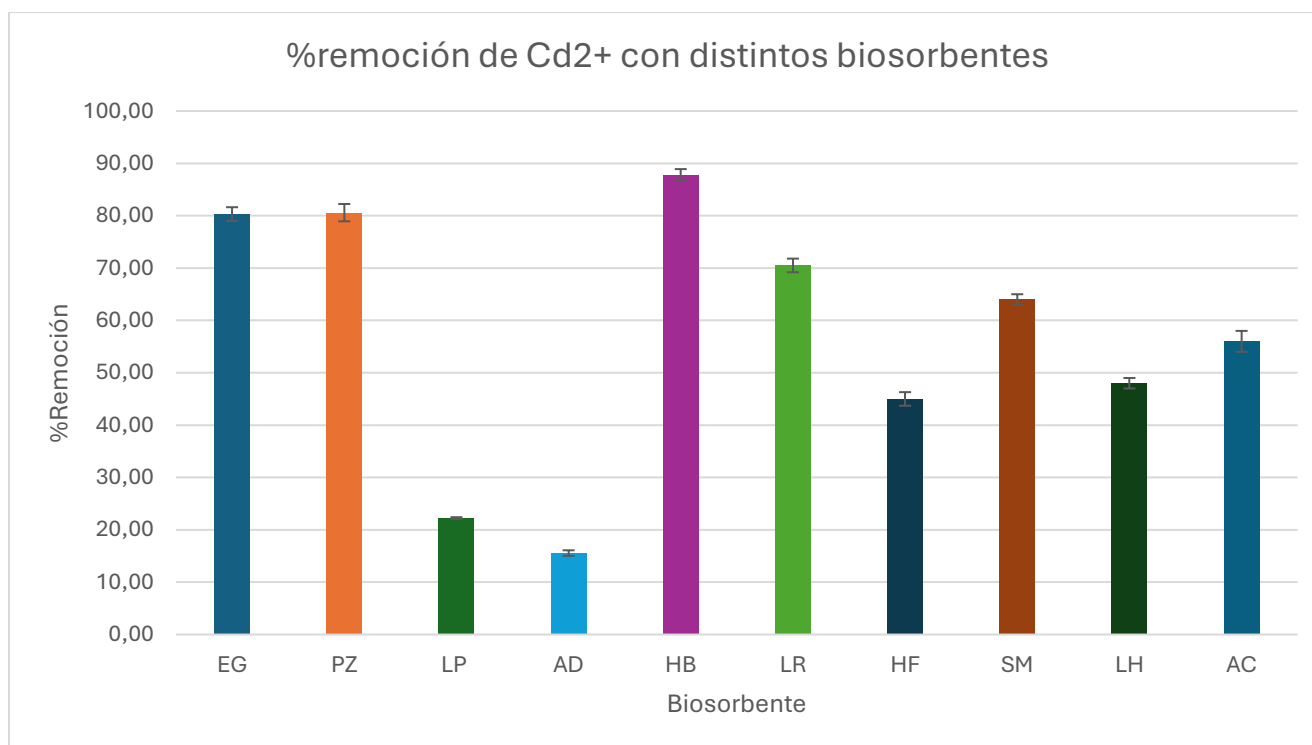


Figura 17 Comparación de % de remoción de cadmio con distintos biosorbentes



En las Figuras 16 y 17 se observa que las especies *Equisetum giganteum* y *Pelargonium zonale* se encuentran entre las especies con más alto porcentaje de remoción de cadmio desde el RIL sintético y la primera es la que muestra mejor rendimiento de remoción de cobre entre todas las especies mencionadas.

6.4 Comparación de resultados con otros estudios

Con el fin de comparar el desempeño en la biosorción de cobre y cadmio de las especies vegetales estudiadas, en la Tabla 12 se realiza una recopilación de datos reportados por diversas investigaciones de biosorción de estos metales con otras especies vegetales.

Tabla 12 Estudios de biosorción con especies vegetales en la literatura.

Biomasa foliar	Familia	Metal	C ₀ [mg/L]	M/V [g/L]	pH	t _e [min]	q _e [mg/g]	remoción %	Referencias
<i>Agave sisalana</i>	<i>Asparagaceae</i>	Cd ²⁺	-	0,6	7	10	1,9	-	(Dos Santos, et al., 2011)
<i>Citrus sinensis</i>	<i>Rutacea</i>	Cu ²⁺	100	2	4,5	1440	26,4	47,2	(Villanueva Huerta, 2007)
<i>Araucaria heterophylla</i>	<i>Araucariaceae</i>	Cd ²⁺	100	20	5,5	120	9,3	90,2	(Sarada, et al., 2017)
<i>Diplotaxis harra</i>	<i>Brassicaceae</i>	Cd ²⁺	100	2	7,5	60	25,2	49,6	(Tounsadi, et al., 2015)
<i>Cassia fistula</i>	<i>Fabaceae</i>	Cd ²⁺	100	15	6	90	6,3	98	(Imran, et al., 2019)
<i>Mimosa pudica</i>	<i>Fabaceae</i>	Cd ²⁺	100	-	5	200-400	25,3	-	(Chen, et al., 2008)
		Cu ²⁺	100	-	5	200-400	22,7	-	
<i>Polytrichum commune</i>	<i>Polytrichoosida</i>	Cu ²⁺	16	-	4,5	30	6,2	79,5	(Ivanova, et al., 2025)
<i>Rosa damascena</i>	<i>Rosaceae</i>	Cu ²⁺	55	4	5,5	150	25,13	90,7	(Fawzy, et al., 2022)
<i>Myrica esculenta</i>	<i>Myricaceae</i>	Cu ²⁺	10	10	4	45	1,4	56	(Kumar, et al., 2023)



7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente estudio realiza la búsqueda bibliográfica de posibles biosorbentes para remoción de cobre y cadmio desde RILes sintéticos en base a su capacidad de fitorremediación de dichos contaminantes, y realiza experiencias de laboratorio, con el fin de estudiar si efectivamente se pueden utilizar como biosorbentes para el tratamiento de dichos contaminantes.

Los resultados obtenidos en la experiencia muestran que bajo las condiciones en las que se realizan las pruebas de biosorción, que corresponden a pH $4,5 \pm 0,1$, relación M/V de 10 [g/L], tamaño de partícula de los biosorbentes de 425 a 850 μm y un tiempo de contacto de 24 h, todas las especies vegetales estudiadas presentan algún grado de adsorción de los contaminantes estudiados. Las especies que muestran mayor porcentaje de remoción de dichos contaminantes son el *Equisetum Giganteum*, con la cual se obtiene un porcentaje de remoción cercano al 80% tanto en el tratamiento del RIL sintético de cobre como en el de cadmio y la especie *Pelargonium Zonale*, la cual muestra un porcentaje de remoción cercano al 80% de cadmio, y un rendimiento moderado en la remoción de cobre, alcanzando en promedio un 47% de remoción de dicho contaminante. La retención de contaminantes más alta lograda por los biosorbentes corresponde a las especies *Equisetum giganteum* y *Pelargonium zonale*, la primera con una capacidad de retención de cobre de $8,29 \pm 0,05$ [mg/g] y de cadmio de $7,76 \pm 0,15$ [mg/g], mientras que la segunda obtiene una capacidad de retención de cadmio de $7,79 \pm 0,19$ [mg/g]. En la comparativa realizada con los resultados de trabajos anteriores, se observa que el porcentaje de remoción de los contaminantes es de los más altos en comparación con otras especies investigadas, en el caso de la especie *Equisetum Giganteum*, esta logra el porcentaje de remoción de cobre más alto de todas las especies referenciadas, mientras que tanto esta como la especie *Pelargonium zonale* muestran buen rendimiento en la remoción de cadmio comparado a especies estudiadas en otros trabajos realizados en la universidad. Al comparar con otros biosorbentes encontrados en la literatura, se puede observar que las especies *Equisetum giganteum* y *Pelargonium zonale*, se encuentran dentro de los tipos de plantas que se pueden considerar buenos biosorbentes. Se recomienda continuar los estudios de ambas especies bajo distintas condiciones de operación, variando tamaño de partícula del biosorbente, al igual que estudios con distintas relaciones M/V con la finalidad de encontrar las condiciones óptimas de operación para el tratamiento de RILes con dichos biosorbentes. Igualmente se recomienda realizar estudios con RILes con múltiples contaminantes y en su posibilidad RILes reales contaminados con diversos metales pesados para conocer su rendimiento bajo condiciones reales para el tratamiento de aguas contaminadas.

Las especies *Lolium Perenne* y *Arundo Donax* no muestran un porcentaje de remoción ni retención de contaminante alto por lo que no se recomienda su uso como biosorbentes para el tratamiento de aguas contaminadas con cobre y/o cadmio. Se recomienda realizar mayor estudio en el tratamiento de otros metales pesados o bajo distintas condiciones de tamaño de partícula, relación M/V o pH que puedan mejorar su rendimiento hasta niveles en que sea factible su uso.



8 BIBLIOGRAFÍA

- Piccin, J., Cadaval, T., Pinto, L., & Dotto, G. (4 de Julio de 2017). *Adsorption Isotherms in Liquid Phase: Experimental, Modeling, and Interpretations*. Obtenido de https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-58136-1_2
- Agencia de sustancias tóxicas y el registro de enfermedades. (ATSDR). (2012). *Reseña toxicológica del cadmio*. Atlanta, GA: Departamento de Salud y servicios humanos de los EE.UU., Servicio de salud pública.
- Ahmad, F., & Zaidi, S. (26 de Julio de 2020). *Potential Use of Agro/Food Wastes as Biosorbents in the Removal of Heavy Metals*. Obtenido de <https://www.intechopen.com/chapters/73900>
- Alsiment. (15 de Mayo de 2022). *La electrodeposición del cobre y su aplicación en la industria*. Obtenido de <https://alsimet.es/es/noticias/la-electrodeposicion-del-cobre-y-su-aplicacion-en-la-industria>
- Artioli, Y. (2008). *Adsorption*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780080454054002524>
- Barakat, M. (Octubre de 2011). *New trends in removing heavy metals from industrial wastewater*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878535210001334?via%3Dihub>
- Barman, S., Ray, U., Das, P., & Mukhopadhyay, A. (2021). *Membrane processes for removal of polyaromatic hydrocarbons from wastewater*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128177426000062>
- Beni, A., & Esmaeili, A. (Febrero de 2020). Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352186418304346?via%3Dihub>
- Beni, A., & Esmaeili, A. (Febrero de 2020). Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352186418304346?via%3Dihub>
- Britannica editors. (1 de Noviembre de 2025). *Britannica*. Obtenido de <https://www.britannica.com/plant/alfalfa>
- Cahuana, L., & Aduvire, O. (2021). *Trifolium repens trébol y calamagrostis sp. ichu en áreas mineras abandonadas*. Revista de Medio Ambiente y Minería.
- Cano-Ruiz, J., Galea, M. R., Amorós, M. C., Alonso, J., Mauri, P. V., & Lobo, M. C. (2020). *Assessing Arundo donax L. in vitro-tolerance for phytoremediation purposes*. Chemosphere.
- Carbotecnia. (28 de Octubre de 2024). *¿Qué es la ósmosis inversa?* Obtenido de <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/osmosis-inversa/que-es-la-osmosis-inversa-purificador/>
- Chen, W. M., Wu, C. H., James, E. K., & Chang, J. S. (2008). Metal biosorption capability of *Cupriavidus taiwanensis* and its effects on heavy metal removal by nodulated *mimosa pudica*. *Journal of Hazardous Materials* 151(2-3), 364-371.
- Dahman, Y. (2017). *Nanopolymers*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B978032351256500006X>



- Das, P., Sharma, M., & Purkait, M. (1 de Julio de 2022). *Recent progress on electrocoagulation process for wastewater treatment: A review*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586622006153>
- Dávila, N. (2012). *Caracterización del proceso de biosorción de metales pesados mediante residuos sólidos de café*.
- Donoso Muños, M. J. (2013). *El mercado del cobre a nivel mundial: evolución, riesgos, características y potencialidades futuras*. Ingeniare. Revista chilena de ingeniería.
- Dos Santos, W. N., Cavalcante, D. D., da Silva, E. G., das Virgens, C. F., & Dias, F. d. (2011). Biosorption of Pb(II) and Cd(II) ions by Agave sisalana (sisal fiber). *Microchemical Journal*, 269-273.
- Dyer, A. (2000). *Ion Exchange*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B0122267702000818>
- Eykamp, W. (1995). *Chapter 1 Microfiltration and Ultrafiltration*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927519306800033?via%3Dihub>
- Fawzy, M., Al-Yasi, H., Galal, T., Hamza, R., Abdelkader, T., & Ali, E. (2022). Statistical Optimization, Kinetic, Equilibrium Isotherm and Thermodynamic Studies of Copper Biosorption onto Rosa Damascena Leaves as a Low-Cost. *Scientific Reports*, 12.
- Feoktistova Victorava, L., & Clark Feoktistova, Y. (2018). El metabolismo del cobre. Sus consecuencias para la salud humana. *Medisur*, 579-587.
- Fernández, I. (Abril de 2024). *Optimización de la desorción de cobre utilizando gránulos de bioreactores*.
- Gardea-Torresday, J. L., Tiemann, K. J., Gonzalez, J. H., & Rodriguez, O. (1996). *Biosorption of Cadmium, Chromium, Lead, and Zinc, by Biomass of Medicago sativa (Alfalfa)*. Albuquerque: 11th Annual EPA Conf.
- Geankoplis, C. (1998). *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. Obtenido de <https://fenomenosdetransporte.wordpress.com/wp-content/uploads/2008/05/geankopolis.pdf>
- Godoy, B. (2024). *Uso de biosorbentes a base de restos vegetales para la remoción de metales perados desde soluciones contaminadas*. Valparaíso: UTSFM.
- Gonzales, J., del Pilar Aponte, M., Bustamante, E., & Chomba, J. (s.f.). *Fitorremediación de un suelo contaminado con dos niveles de cobre, mediante el uso del cultivo de la alfalfa "Medicago Sativa"*. Trujillo: Universidad católica de Trujillo.
- Gottfried, R., Carrillo, G., Reyna, Á., Cervante, G., & Hernández., H. (2019). *Potencial fitorremediador de la chicura (Ambrosia ambrosioides) en suelos contaminados por metales pesados*. Revista mexicana de ciencias agrícolas.
- Gouda, S., & Taha, A. (2023). *Biosorption of Heavy Metals as a New Alternative Method for Wastewater tratment: A review*. Obtenido de https://ejabf.journals.ekb.eg/article_291671_374c9fa6ea85408ae7c7f1a353e63751.pdf



- Gupta, G., Khan, J., & Singh, N. (2021). *Application and efficacy of low-cost adsorbents for metal removal from contaminated water: A review*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321004053?via%3Dihub>
- Gutiérrez Ginés, M. H. (2011). *Estudio del comportamiento de Lolium perenne L. en suelos del Centro de España contaminados por metales pesados*. Universidad de Valencia.
- Gutierrez, G., López, I., M. N, H., Parra, L., Parra, J., & Parra, R. (2024). El Agua: Pilar fundamental para la sostenibilidad del futuro. *Revista de Ciencias Agroalimentarias y Biotecnología*, 25-38.
- Ighalo, J., Omoarukhe, F., Ojukwu, V., Iwuozor, K., & Chinenye Adaobi Igwegbe, C. (Septiembre de 2022). *Cost of adsorbent preparation and usage in wastewater treatment: A review*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772782322000407?via%3Dihub>
- Imran, M. S., Shah, N. S., Mubeen, M., Ahmad, S., Zakir, A., & Schotting, R. J. (2019). Kinetic and equilibrium studies for cadmium biosorption from contaminated water using Cassia fistula biomass. *International Journal of Enviromental Science and Technology*. 16(7), 3099-3108.
- iNaturalist. (s.f.). *iNaturalistCL*. Obtenido de <https://inaturalist.mma.gob.cl/taxa/55745-Trifolium-repens>
- International Copper Association. (2024). *Atributos y aleaciones del cobre*. Obtenido de <https://internationalcopper.org/es/sustainable-copper/about-copper/copper-attributes-and-alloys/>
- Ivanova, L., Vassileva, P., Detcheva, A., Koleva, V., & Avramova, I. (2025). Plantbased Biosorbents for Copper (II) Removal: A Comparative Study of Biomass and. *Applied Sciences*, 15.
- Koller, M., & Saleh, H. (27 de Junio de 2018). *Introductory Chapter: Introducing Heavy Metals*. Obtenido de <https://www.intechopen.com/chapters/59857>
- Kumar, M., Seth, A., Singh, A., Rajput, M., & Sikandar, M. (Diciembre de 2021). *Remediation strategies for heavy metals contaminated ecosystem: A review*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2665972721000568?via%3Dihub>
- Kumar, R., Joshi, H. K., Vishwakarma, M. C., Sharma, H., Joshi, S. K., & Bhandari, N. S. (2023). Biosorption of copper and lead ions onto treated biomass myrica esculenta: Isotherms and kinetics studies. *Enviromental Nanotechnology, Monitoring and management*, 19.
- Lawrence, E. (2002). *Pelargonium Zonale (L.) L'Hérit*. PlantZAfrica, South African National Biodiversity Institute.
- Lenntech. (2025). *Propiedades químicas del cadmio - efectos del cadmio sobre la salud - efectos ambientales del cadmio*.
- Lenntech. (2023). *Propiedades químicas del Cobre - Efectos del Cobre sobre la salud - Efectos ambientales del Cobre*. Obtenido de <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/cu.htm>
- Londoño, L., & Muñoz, F. (18 de Mayo de 2016). *Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal*. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-35612016000200017
- López, M., & Gutiérrez, F. (2014). *Metales pesados y Biorremediación*. C. & Basica.



- Lowe S., B. M. (2004). *100 de las Especies Exóticas Invasoras más dañinas del mundo*. Grupo Especialista de Especies Invasoras (GEEI).
- Mejía, G. (2024). *Aproximación teórica a la biosorción de metales pesados por medio de microorganismos*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/3214/321428096010.pdf>
- Michalak, I., Chojnacka, K., & Krowiak, A. (Mayo de 2013). *State of the Art for the Biosorption Process—a Review*. Obtenido de <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3696181/>
- MINSEGPRES. (30 de Mayo de 2000a). *Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos y aguas marinas y continentales superficiales*. Obtenido de <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=182637>
- MINSEGPRES. (8 de Marzo de 2002a). *Norma de emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas*. Obtenido de <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=206883&idParte=0>
- Moreno Molina, J. A. (2024). *Fitorremediación de suelos contaminados en mecánicas automotrices, utilizando Lolium perenne y Medicago sativa, en laboratorio*. Universidad católica de cuenca.
- Muddemann, T., Haupt, D., Sievers, M., & Kunz, U. (3 de Octubre de 2019). *Electrochemical Reactors for Wastewater Treatment*. Obtenido de <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/cben.201900021>
- Muñoz, C. (2025). *Biosorción de cobre desde residuos líquidos utilizando Haplopappus Baylahuen como biosorbente*. Valparaíso: UTFSM.
- National academy of sciences. (2000). *National library of medicine*. Obtenido de NIH: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK225402/#:~:text=En%20el%20agua%20potable%2C%20el,despu%C3%A9s%20de%20descargar%20el%20grifo.>
- Obeso Obando, A. D. (2021). *Cultivo de geranio: uso potencial para remover arsénico (As), cadmio (Cd) y cobre (Cu) de suelos contaminados*. Trujillo: Universidad privada del norte.
- ONU. (2021). Obtenido de La economía circular: un modelo económico que lleva al crecimiento y al empleo sin : <https://news.un.org/es/story/2021/03/1490082>
- Ortiz, C. (2024). *Estudio del proceso de biosorción de Cu²⁺ y/O Cd²⁺ desde soluciones sintéticas utilizando un biosorbente a base de plantas*. Valparaiso: UTFSM.
- Park, J., Lee, J., & Puthumana, j. (2021). *Current physicochemical treatment technologies available for remediation of different types of heavy metals from wastewater*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B978012822965100012X>
- Quispe, M. E. (2017). *Capacidad del girasol (Helianthus annus L.) para absorber cadmio de suelos contaminados en ambiente controlado-Puno*. Puno: Universidad nacional del altiplano de Puno.
- Reyes, Y. L. (2024). *Análisis temporal de la contaminación ambiental en las aguas costeras del norte de Chile y su relación con los niveles de producción de la actividad minera*. Concepción: Universidad de concepción.



- Sabeen, M., Mahmood, Q., Irshad, M., Fareed, I., Khan, A., Ullah, F., & ... & Tabassum, S. (2013). *Cadmium phytoremediation by Arundo donax L. from contaminated soil and water*. BioMed research international.
- Sarada, B., Krishna Prasad, M., Kishore Kumar, K., & Murthy, C. V. (2017). Biosorption of Cd²⁺ by green plant biomass, *Araucaria heterophylla*: characterization, kinetic, isotherm and thermodynamic studies. *Applied Water Science*, 7(7), 3483-3496.
- Schiewer, S., & Volesky, B. (1995). Modeling of the proton-metal ion exchange in biosorption.
- Sepúlveda, B. R. (2023). *Uptake of Cu, Hg, and As in wild vegetation, associated to surface water in the Copiapó valley, before the 2015 alluvium*. Environmental Geochemistry and Health.
- Shamim, S. (31 de Octubre de 2017). *Biosorption of Heavy Metals*. Obtenido de <https://www.intechopen.com/chapters/58112>
- Shrestha, R., Devkota, S., Ban, S., Sharma, S., Joshi, R., Tiwari, A., . . . Joshi, M. (2021, Agosto). *Technological trends in heavy metals removal from industrial wastewater: A review*. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343721006655#bib9>
- Silva Caris, G. A. (2013). *Evaluación de plantas fitoacumuladoras en suelos aluviales con alto nivel de cobre disponible*. Facultad de ciencias agrónomicas de la Universidad de Chile.
- SINCA. (26 de Septiembre de 2000). *Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a la descarga de residuos industriales líquidos a sistemas de alcantarillado*. Obtenido de <https://sinca.mma.gob.cl/uploads/documentos/f74eed7489e584c736262d21ac824e9e.pdf>
- Sireesha, C., Subha, R., & Sumithra, S. (2022). *Biosorption of copper ions in aqueous solution by carbonized sunflower stem*. Rasayan J. Chem.
- Tchounwou, P., Yedjou, C., Patlolla, A., & Sutton, D. (2014). *Heavy Metals Toxicity and the Environment*. Obtenido de <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4144270/>
- Tejada, C., Villabona, Á., & Garcés, L. (Junio de 2025). *Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico*. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-77992015000100010#:~:text=Los%20biosorbentes%20son%20materiales%20provenientes,forma%20i%C3%B3nica%20de%20la%20soluci%C3%B3n.
- Tonner, J. (2004). *Desalination and Energy Use*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B012176480X004034>
- Tounsadi, H., Khalidi, A., Abdennouri, M., & Barka, N. (2015). Biosorption potential of *Diplotaxis harra* and *Glebionis coronaria* L. biomasses for the removal of Cd(II) and Co(II) from aqueous solutions. *Journal of Environmental Chemical Engineering. Journal of Enviromental Chemical engeneering* 3(2), 822-830.
- Valdivia, J. E., Acebedo, J., C., A., Custodio, M., García, M., Gonzales, A., & ... & Vásquez, M. (2018). *Fitorremediación de un suelo con exceso de cobre utilizando cuatro especies vegetales; "girasol", "alfalfa", "geranio" e "higuerilla"*. SEARCHING-SCIENCE.



- Vega Sánchez, M. J. (2018). *Composición y diversidad vegetal en piscinas de relave de la minera agroindustrial El Corazón*. Universidad de las Américas.
- Verde Malpartida, L. (2025). *Eficiencia de la fitorremediación con Mostaza (*Brassica juncea*) e Higuierilla (*Ricinus communis*) en la recuperación de la calidad del suelo contaminado por plomo y cadmio del botadero de Marabamba, Provincia y Departamento de Huánuco*. Universidad de Huánuco.
- Villanueva Huerta, C. C. (2007). *Biosorción de Cobre (II) por biomasa pretratada de cáscara de Citrus Sinensis (naranja), Citrus Limonium (limón) y Opuntia Ficus (palmeta de nopal)*.