

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



**“REMOCIÓN DE IONES CADMIO EN SOLUCIÓN
ACUOSA EMPLEANDO UN EQUIPO DE
ELECTRODESIONIZACIÓN”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO QUÍMICO**

ALICIA MAGALY COZ CERVANTES

Callao, 2022

PERÚ

HOJA DE REFERENCIA DEL JURADO DE APROBACIÓN

La presente tesis fue sustentada por la Bachiller **COZ CERVANTES, ALICIA MAGALY** ante el jurado de sustentación de tesis conformado por los siguientes profesores ordinarios:

Ing. RODRIGUEZ TARANCO OSCAR JUAN	: PRESIDENTE
Ing. SUERO IQUIPAZA POLICARPO AGATON	: SECRETARIO
Ing. REYNA MENDOZA GLADYS ENITH	: VOCAL
Ing. MEDINA COLLANA JUAN TAUMATURGO	: ASESOR

Tal como está sentado en el Libro N°02 Folio N°148 y Acta N° 329 de fecha VEINTE de DICIEMBRE de 2022, para optar por el título profesional de Ingeniero Químico en la modalidad de Tesis sin Ciclo de Tesis de conformidad a lo establecido en el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional del Callao, aprobado por Resolución de Consejo Universitario N°099-2021-CU del 30 de junio de 2021.

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mis padres, grandes colaboradores para concluir mis estudios de Pregrado. A mi padre que madrugaba todos los días para proveer el sustento del hogar, y a mi madre, mujer luchadora y hacendosa.

AGRADECIMIENTO

Agradecimiento profundo a los maestros de la Facultad de Ingeniería Química de la UNAC, por impartir sus conocimientos a mi persona, así como sus consejos de vida para las labores profesionales, a quienes mostraron su bienvenida el primer día de clases y a quienes con rigor formaron la alta capacidad de perseverancia y sencillez. A mis abuelos quienes con su ejemplo inculcaron mi fe en Dios, fiel acompañante en cada paso de mi vida.

ÍNDICE

INDICE DE TABLAS	5
INDICE DE FIGURAS	6
RESUMEN	7
ABSTRACT	8
INTRODUCCIÓN	9
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	10
1.1. Descripción de la realidad problemática	10
1.2. Formulación del problema	12
1.2.1. Problema General	122
1.2.2. Problemas específicos	122
1.3. Objetivos	122
1.3.1. Objetivo General	122
1.3.2. Objetivos Específicos	122
1.4. Limitantes de la Investigación	133
II. MARCO TEÓRICO	144
2.1. Antecedentes: Internacional y Nacional	144
2.1.1. Antecedentes Internacionales	144
2.1.2. Antecedentes Nacionales	166

2.2.	Bases Teóricas.....	188
2.2.1.	Galvanotecnia.....	188
2.2.2.	Cadmio	188
2.2.3.	Ion cadmio	19
2.2.4.	Aguas residuales	20
2.2.5.	Enjuague	20
2.2.6.	Procesos de tratamiento de iones cadmio.....	22
2.2.7.	Electrodesionización (EDI)	28
2.2.8.	Marco Legal.....	30
1)	Decreto Supremo 015-2015-MINAM	30
2)	Decreto Supremo 031-2010-SA	33
3)	Decreto Supremo 021-2009- VIVIENDA.....	34
2.3.	Conceptual	35
2.3.1.	Elementos de la celda de Electrodesionización	35
2.4.	Definición de términos básicos	37
III.	HIPÓTESIS Y VARIABLES	38
3.1.	Hipótesis.....	388
3.1.1.	Hipótesis general.....	388
3.1.2.	Hipótesis específicas	388
3.2.	Definición conceptual de variables	39
3.2.1.	Operacionalización de variables.....	40

IV. DISEÑO METODOLÓGICO	41
4.1. Tipo y diseño de investigación.....	41
4.2. Método de Investigación.....	42
4.2.1. Equipo experimental	43
4.2.2. Procedimiento experimental	44
4.3. Población y Muestra	444
4.4. Lugar de estudio y periodo desarrollado.....	45
4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información.....	455
4.5.1. Técnica	455
4.5.2. Instrumentos.....	455
4.6. Análisis y Procesamientos de datos	46
4.6.1. Ecuaciones Básicas	466
V. RESULTADOS	48
5.1. Resultados descriptivos.....	48
5.2. Resultados inferenciales.....	50
VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	56
6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados.....	566
6.2. Contrastación de los resultados con otros estudios similares	566
6.3. Responsabilidad ética de acuerdo a los Reglamentos Vigentes	577
CONCLUSIONES	58
RECOMENDACIONES	59

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....60

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Estándar de calidad Ambiental para aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable	30
Tabla 2: Estándar de calidad Ambiental para aguas superficiales destinadas para la recreación	311
Tabla 3 : Estándar de calidad Ambiental para aguas con extracción y cultivo Marino Costero y Continental	32
Tabla 4 : Estándar de calidad Ambiental para aguas de riego de vegetales y bebidas de animales.....	322
Tabla 5 : Estándar de Calidad del Agua para la conservación del Ambiente Acuático.....	333
Tabla 6 : Límites Máximos Permisibles de Cadmio según el Reglamento de Calidad del Agua para consumo humano DS-031-2010-SA.....	344
Tabla 7 : Valores Máximos Admisibles de las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado	344
Tabla 8: Variables Independientes	40
Tabla 9: Variables Dependientes.....	40
Tabla 10: Parámetros de operación y niveles de experimentación	41
Tabla 11: Matriz de experimentación.....	42
Tabla 12: Porcentaje de remoción de cadmio	48
Tabla 13: Porcentaje de recuperación de flujo del compartimiento diluido...49	
Tabla 14: Estadísticas descriptivas	49
Tabla 15: Análisis de varianza.....	52
Tabla 16: Análisis de varianza.....	55
Tabla 17: Porcentaje de remoción de iones Cadmio	577

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de una Celda Electrolítica	188
Figura 2: Diagrama del Proceso de Recubrimiento con Cadmio.....	19
Figura 3: Tecnologías para la Remoción de Metales Pesados de las Aguas Residuales.....	21
Figura 4: Proceso de Intercambiador Iónico	22
Figura 5: Proceso de Intercambiador Iónico	266
Figura 6: Esquema de Ultrafiltración	277
Figura 7: Representación del proceso de Electrodesionización.....	288
Figura 8: Migración de iones de la Celda.....	36
Figura 9: Diagrama de Variables de la Investigación	39
Figura 10: Equipo experimental	43
Figura 11: Diagrama de Pareto de los efectos.....	50
Figura 12: Gráfica Normal de los efectos.....	50
Figura 13: Media de Porcentaje de Separación de Iones cadmio.....	51
Figura 14: Diagrama de Pareto del porcentaje de los Efectos del Porcentaje de recuperación de flujo	53
Figura 15: Gráfica de Efectos Normales (Absolutos)	53
Figura 16: Media de Porcentaje de recuperación de flujo del compartimiento diluido	54

RESUMEN

La contaminación por metales pesados en los cuerpos de agua es una gran amenaza para los ecosistemas naturales y la salud pública, estos son tóxicos, incluso en bajas concentraciones. El cadmio es un elemento altamente tóxico y cancerígeno, está presente en efluentes industriales de galvanoplastia, baterías, pinturas, procesamiento de minerales, procesos de refinación e industria de aleaciones. En este trabajo experimental se ha investigado el efecto de las condiciones de funcionamiento de un equipo de electrodesionización, como potencial eléctrico aplicado, concentración de la sal y flujo de alimentación con respecto al porcentaje de remoción de iones cadmio usando una solución modelo preparada con nitrato de cadmio. Los resultados muestran que al ingresar una concentración de iones cadmio en la alimentación de la celda de electrodesionización de 0.54 ppm con voltaje de 20 V a un flujo de 6L/min, se alcanza un porcentaje de remoción de 99,9 % de iones cadmio, igualmente hay una recuperación de flujo en el permeado de 68%. Se concluye que el proceso de electrodesionización es una alternativa eficiente para tratar aguas residuales entre concentración de iones cadmio de (0.54-1.74) valores que sobrepasan la normativa peruana e internacional, así mismo es una tecnología respetuosa con el medio ambiente.

Palabras claves: electrodesionización, iones cadmio y resinas de intercambio iónico.

ABSTRACT

Heavy metal contamination in water bodies is a great threat to natural ecosystems and public health. These are toxic even in low concentrations and are the main inorganic pollutants in the environment due to their mobility and toxicity. Cadmium is a highly toxic and carcinogenic element, it is present in industrial effluents from electroplating, batteries, paints, mineral processing, refining processes and the alloy industry. In this experimental work, the effect of the operating conditions of an electroionization equipment has been investigated, such as applied electric potential, salt concentration and feed flow with respect to the removal percentage of cadmium ions using a model solution prepared with nitrate of cadmium. The results show, when the concentration of cadmium ions in the feed to the electroionization cell is 0.54 ppm, voltage of 20 V, flow of 6L / min. a removal percentage of 99.9% of cadmium ions is reached, there is also a flux recovery in the permeate of 68%. It is concluded that the electrodeionization process is an efficient alternative to treat wastewater with a concentration of cadmium ions of (0.54-1.74) values that exceed Peruvian and international regulations, and it is also an environmentally friendly technology.

Keywords: electro ionization, cadmium ions and ion exchange resins.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación busca establecer de manera experimental las condiciones de operación más adecuadas de un módulo de electrodesionización para la remoción de iones Cadmio a partir de una solución modelo.

El uso de baños de cadmio en la industria de la galvanoplastia genera una fuerte preocupación en relación con el impacto ambiental debido a la alta toxicidad del cadmio.

La precipitación química del metal es una alternativa, sin embargo, presenta algunas deficiencias y puede resultar en problemas ambientales adicionales debido a la producción de lodos de hidróxido metálico que es clasificada como un residuo peligroso. La disposición adecuada de estos lodos constituye un problema ambiental y económico serio para las industrias involucradas. Por consiguiente, existe una creciente necesidad de métodos alternativos de tratamiento de aguas residuales que contienen metales pesados. La electrodesionización es una técnica de separación de membrana, donde son transportados especies ionizadas en solución, a través de membranas de intercambio iónico bajo la influencia de un campo eléctrico. Cuando una solución que contiene especies iónicas se introduce en los compartimientos, los aniones migran hacia el ánodo y los cationes migran hacia el cátodo obteniéndose dos compartimientos una diluida y una concentrada.

Sabiendo que el cadmio es un metal no fácilmente biodegradable y que existen pocos trabajos de investigación para su reducción específica, esta tesis busca contribuir estableciendo parámetros óptimos para el tratamiento de agua, alcanzando niveles máximos permisibles en los efluentes vertidos por industrias o procesos contaminantes.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción de la realidad problemática

La contaminación por metales pesados en los cuerpos de agua es una gran amenaza para los ecosistemas naturales y la salud pública. Estos son tóxicos incluso en bajas concentraciones y son los principales contaminantes inorgánicos del medio ambiente debido a su movilidad y toxicidad. El cadmio, uno de los metales pesados tóxicos más dañinos que posee una alta solubilidad, podría acumularse fácilmente en el cuerpo vivo a través del tracto respiratorio y la boca, altamente tóxico y cancerígeno (Colantonio,2011). Es un daño grave para nuestro hígado, riñón y esqueleto, incluso en pequeñas cantidades. Sobre la base de estos hechos y los graves impactos, la OMS (2011) ha presentado una guía muy estricta indicando que la concentración más alta de Cd^{2+} en el agua potable debe limitarse a 0,003 mg /L. El cadmio es carcinógeno con efectos negativos en pulmones, huesos, hígado y riñón. (Pyrzynska and Krystyna, 2019).

El cadmio está presente en efluentes industriales de galvanoplastia, baterías, pinturas, procesamiento de minerales, procesos de refinación e industria de aleaciones. Estos efluentes industriales requieren un tratamiento obligatorio para su eliminación segura en ecosistemas. El Departamento de Medio Ambiente del Reino Unido clasificó al cadmio como prioridad contaminante en la lista roja. La Unión Europea ha colocado cadmio en lista negra de compuestos y ha ordenado eliminarlo con prioridad base.

Por lo tanto, la búsqueda de una técnica práctica y económica para el tratamiento de aguas residuales que contienen Cd^{+2} antes de ser descargadas directa o indirectamente al ecosistema ha atraído la atención de los ambientalistas. Los métodos fisicoquímicos convencionales son inadecuados o muy costosos para el tratamiento de metales pesados, especialmente en un rango de concentración baja, entre 1 a 100

mg/L (ppm). Recientemente, varios tipos de técnicas, como la coagulación química, adsorción, intercambio iónico, ósmosis inversa y filtración por membrana se emplean ampliamente en el tratamiento de aguas residuales de metales pesados. Teniendo en cuenta la contaminación por cadmio generalizada y el bajo valor de concentración máxima admisible en el agua potable, existe un interés apreciable en la eliminación de cadmio antes de la descarga de aguas residuales.

Estos problemas inspiraron a los investigadores a encontrar soluciones alternativas que podrían ofrecer tal técnica que es económicamente factible y también está libre de los problemas asociados mencionados anteriormente.

El proceso de electrodesionización (EDI) se ha aplicado comercialmente para producir agua ultrapura en las industrias de semiconductores y farmacéutica. Procesos de separación impulsados eléctricamente, como electrodiálisis (ED) y EDI, eliminan los iones cargados aplicando un campo eléctrico, resinas de intercambio iónico se incorporan al proceso de EDI para mejorar la migración de iones.

En este trabajo experimental se ha evaluado experimentalmente la separación de iones cadmio a partir de una solución modelo utilizando un equipo de electrodesionización.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema General

¿Cuáles serán las condiciones de operación más adecuadas del equipo de electrodesionización para la remoción de iones cadmio en solución acuosa?

1.2.2. Problemas específicos

1. ¿Cuáles serán los parámetros de operación y niveles de experimentación más adecuados (concentración inicial de iones cadmio, potencial eléctrico, flujo volumétrico) del equipo de electrodesionización que permita la remoción de iones cadmio?
2. ¿Cuál será el porcentaje de remoción de iones cadmio alcanzado mediante el proceso de electrodesionización?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Establecer las condiciones de operación más adecuadas del equipo de electrodesionización para la remoción de iones cadmio en solución acuosa.

1.3.2. Objetivos Específicos

1. Seleccionar los parámetros de operación y niveles de experimentación (concentración inicial de iones cadmio, voltaje, flujo volumétrico) del equipo de electrodesionización.
2. Determinar el porcentaje de remoción de iones cadmio mediante el proceso de tratamiento por electrodesionización.

1.4. Limitantes de la Investigación

Limitante Teórica:

Los textos relacionados a la electrodesionización se encuentran en mínima cantidad, por ser una tecnología emergente, además de presentarse en idiomas diferentes al castellano.

Parte de la información sobre electrodesionización se encuentra en páginas web de acceso restringido, las cuales requieren de afiliación previa por contener textos de investigación.

Los textos referidos a la contaminación por Cadmio exclusivamente son escasos, y algunas son referencias de enfoques biológicos y farmacéuticos más que químicos o de la especialidad de ingeniería química.

Limitante Temporal:

El proceso de la experimentación en sí misma, puede demorar en promedio un mes, debido al tiempo para adquisición de la solución patrón, la experimentación misma y la espera de resultados de laboratorio.

La respuesta del laboratorio de análisis demora entre una a dos semanas.

Limitante Espacial:

Las pruebas experimentales están limitada a soluciones sintéticas preparadas en el laboratorio a partir de solución patrón de nitrato de cadmio. La medición de la concentración de cadmio se realizó con equipos instrumentales.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes: Internacional y Nacional

2.1.1. Antecedentes Internacionales

Sarıçiçek (2021). El ácido bórico es un electrolito débil y no se disocia completamente en soluciones acuosas. Debido a tales características, no siempre es posible eliminarlo de manera eficiente mediante tecnologías convencionales. En este trabajo se utiliza por primera vez la electrodesionización rellena de resina (EDI) selectiva de boro para eliminar el boro de las soluciones acuosas. Si bien los experimentos se llevaron a cabo en modo de voltaje constante, sin embargo, se reveló que el potencial aplicado y el caudal de alimentación tienen efectos significativos sobre la eliminación de boro. La concentración de boro en la solución disminuyó de 5 mg/L a 0,3 mg/L con una tasa de eliminación de boro de hasta 94%. Se toma este antecedente porque se recalca la importancia del voltaje y el caudal para obtener resultados óptimos en el proceso de eliminación del elemento Boro; se refiere también la utilización de un equipo de electrodesionización, dado que las referencias específicas para eliminación de Cadmio por electrodesionización (EDI) son escasas.

Zahakifar (2020). En esta investigación, la eliminación de torio (IV) de solución acuosa se realizó mediante electrodesionización (EDI). Los experimentos de eliminación de torio (IV) con EDI se efectuaron bajo un diseño experimental, analizando tres variables independientes, incluido el voltaje aplicado (X1), tasa de flujo (X2) y la concentración de torio (IV) (X3). Los valores óptimos de voltaje, caudal y concentración de torio (IV) se obtuvieron 9,8 V, 3,4 mL/ min y 63,1 mg/L, respectivamente. En estas condiciones, la eliminación de torio (IV) fue del 99,06%. Se toma la referencia por encontrar una alta eliminación del elemento Torio tras

utilizarse el método de electrodesionización.

Arar (2011). En su trabajo de investigación usando un equipo de electrodesionización de micro flujo redujeron la concentración de iones cobre; el sistema contiene un compartimento central lleno de resinas de intercambio catiónico y los compartimentos de cátodo y ánodo de la celda se separaron del compartimento central con las membranas de intercambio aniónico Neosepta AMX y de intercambio catiónico CMX. La concentración de iones Cu^{+2} proveniente de la corriente central disminuyó a 0.49 mg/L cuando la concentración inicial de iones Cu^{+2} fue de 5.0 mg/L y a 1.7 mg/L cuando la concentración de Cu^{+2} en la solución de alimentación fue de 25.0 mg/L. alcanzando un porcentaje de remoción de 90 % y 93,2% de iones cobre. Se resaltan los altos porcentajes de remoción obtenidos en la experimentación de disminuir concentración de Cobre en solución acuosa usando la electrodesionización.

Chun Wai (2014) manifiesta que los iones de metales pesados son uno de los principales contaminantes para los seres humanos y recursos hídricos. Algunos iones de metales pesados son extremadamente tóxicos, como plomo, mercurio y cadmio, incluso en concentraciones relativamente bajas; no son biodegradables, por lo que estos contaminantes se acumulan en plancton y plantas y, finalmente, se transfieren a humanos a través de la cadena alimentaria. Indica que el cadmio es un metal altamente tóxico que se encuentra en los efluentes de las plantas de fabricación de baterías. En su estudio, la capacidad de eliminar iones de cadmio utilizando una resina de intercambio iónico se ha estudiado en un solo sistema de intercambio de sorción de componentes. La capacidad máxima de sorción de resina para iones de cadmio se ha alcanzado a pH 5 y el valor es 2,20 mmol /g de resina. Este valor muestra que la resina puede eliminar eficazmente los iones de cadmio. Se refiere la alta toxicidad del Cadmio y su reducción mediante resinas de intercambio iónico.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

Huaranga (2010). En su trabajo “Contaminación por metales pesados en la cuenca del río Moche, 1980-2010, La Libertad-Perú”, señala sobre las mediciones de cadmio hallados en la cuenca alta, media y baja del río Moche, llegando a encontrarse concentraciones de Cadmio de 4,55mg/L en el año 1980 cuando empiezan los estudios y bajando hasta niveles próximos de 0.009 mg/L en el año 2010, esto producto de relaves mineros. El área de estudio fue en la cuenca del río moche a poca distancia de la mina Quiruvilca, extractora de Plata. El estudio paciente y detallado de 30 años que realizan para elementos como Fe, Pb, Cu, Zn, As y Cd, este último de interés en nuestra investigación, nos hacen concluir que este problema de contaminación se da en diversos puntos del Perú, lugares donde incluso no se lleva un registro a través de los años. Por lo tanto, la referencia se utiliza como antecedente de estudio de contaminación de ríos y suelos, afectando directamente a la población. Utilizan un proceso de espectrofotómetro de absorción atómica, con muestras de suelos de las áreas regadas con agua del río Moche y ya se indica un antecedente de estudio, primero para identificar cuantitativa y detalladamente los elementos que interfieren negativamente en cultivos y medio ambiente; como segundo punto se deben realizar investigaciones sobre alternativas de eliminar y/o reducir el desecho de estos metales o elementos contaminantes, tal como se pretende en el presente trabajo de tesis, proponiendo una tecnología emergente para la reducción de iones Cadmio.

Marín y García (2015) “Contaminación por Cadmio en alimentos marinos”, en la Facultad de Farmacia y Bioquímica de la UNMSM, refieren que la concentración de Cadmio en pescado jurel supera los límites máximos permitidos según la Comisión de la Unión Europea en su reglamento (CE) N° 1881/2006 y su modificatoria (UE) N°488/2014, indicando también que los moluscos bivalvos y moluscos cefalópodos superan ligeramente la norma, basándose en una muestra colectada al azar del Terminal

Pesquero de Villa María del Triunfo, provenientes del litoral de la región Lima, sub área 3: Chorrillos, Islas Pachacamac. Ya nos brinda un antecedente de estudio medioambiental dirigido directamente a los niveles de Cadmio en una zona determinada del mar peruano. Se identifica que esta investigación se da desde el área de la salud, específicamente desde la Facultad de Farmacia y Bioquímica. Por lo tanto, entendemos que es una preocupación de los profesionales con respecto al impacto en la salud poblacional. Para este caso se ha utilizado el estudio de identificación del Cadmio dentro de los moluscos bivalvos, los cuales en el área bioquímica tienden a utilizarse para descontaminación de masas acuosas dado su poder de absorción. Otra vez identificamos una investigación que ha buscado demostrar mediante el análisis en los pescados y moluscos el elevado contenido de Cadmio. Desde el área de la Ingeniería Química se busca, además de identificar cuantitativamente valores de concentración de Cadmio inicial y final, se busca reducir y proponer una alternativa para la reducción de iones Cadmio en solución acuosa.

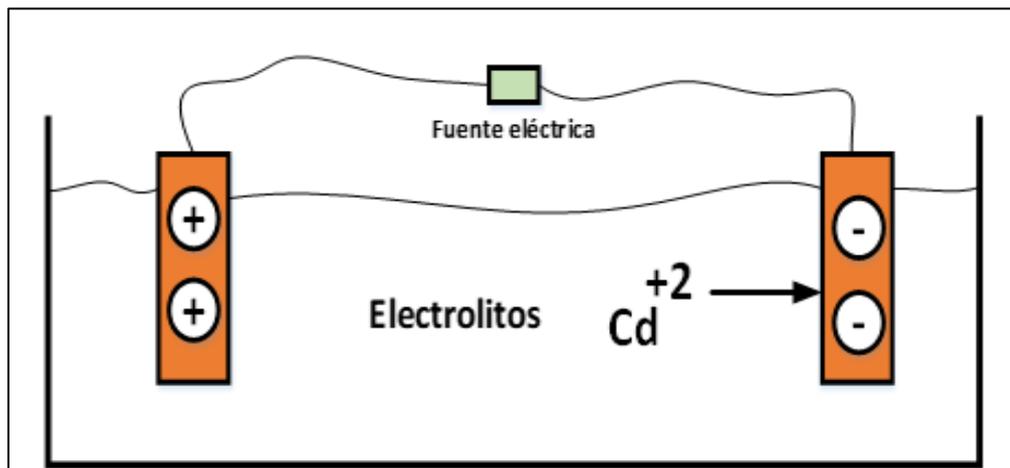
2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Galvanotecnia

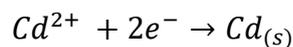
Proceso de recubrimientos metálico vía electrolítica sobre diferentes superficies con fines decorativos y de protección contra la corrosión. Estas películas formadas se destacan; la dureza, uniformidad, estabilidad y buen aspecto. En la figura 1 se muestra un esquema general de una celda electrolítica de recubrimiento de cadmio. Los componentes principales de un proceso electrolítico son la fuente eléctrica, electrolíticos, celda y electrodos (ánodo y cátodo).

Figura 1

Esquema de una Celda Electrolítica



La reacción que se presenta en el cátodo se indica en la siguiente ecuación



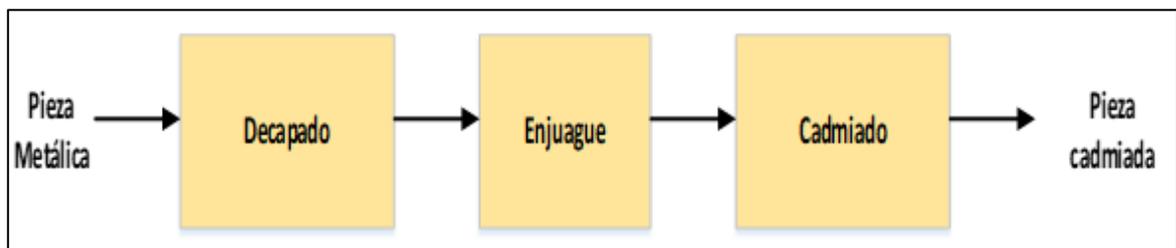
2.2.2. Cadmiado

El revestimiento de cadmio es el proceso de recubrir una superficie conductora con una capa de cadmio. El chapado de cadmio se puede utilizar para recubrir metales como el acero, hierro fundido, cobre, etc. Entre los diversos recubrimientos realizados en procesos galvánicos, la

galvanoplastia de cadmio utiliza baños de cianuro alcalino. El uso de baños de cianuro de cadmio en la industria de la galvanoplastia genera una gran preocupación relacionada con impactos ambientales debido a la alta toxicidad de cadmio y cianuro (Waalkes,2000). En el siguiente diagrama de bloques se muestra el proceso de recubrimiento de una pieza metálica con cadmio.

Figura 2

Diagrama del Proceso de Recubrimiento con Cadmio



2.2.3. Ion cadmio

El ion cadmio está presente en efluentes industriales de galvanoplastia, baterías, pinturas, procesamiento de minerales, procesos de refinado e industria de aleaciones. El ion cadmio (II) es uno de los iones de metales pesados más tóxicos con efectos negativos para el medio ambiente y la salud humana. Su toxicidad depende de los niveles de concentración y exposición. Se ha informado que el cadmio es carcinógeno y teratógeno humano con efectos negativos sobre pulmones, huesos, hígado y riñón la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha establecido una concentración máxima de 0,003 mg/L. Teniendo en cuenta la contaminación por cadmio generalizada y el bajo valor de concentración máxima admisible en el agua potable, existe un interés apreciable en la eliminación de cadmio antes de la descarga de aguas residuales. Estos

efluentes industriales requieren un tratamiento obligatorio para su eliminación segura en ecosistemas. Se pueden utilizar varias tecnologías de tratamiento para este propósito, como filtración, precipitación química, coagulación, extracción con disolvente, intercambio iónico, adsorción, proceso de membrana y biorremediación (Simonescu, 2020).

2.2.4. Aguas residuales

Las aguas de enjuague de la industria de galvanoplastia destacan por su concentración de cadmio superior a la estandarizada por diferentes países. Estas aguas residuales se tratan convencionalmente con precipitación química de sales, creando hidróxidos insolubles con formación de un lodo residual concentrado que debería almacenarse en rellenos sanitarios especiales y, por lo tanto, transferir el contaminante del líquido a la fase sólida. Es el vertido de aguas residuales es el aspecto medioambiental más significativo que se puede encontrar es en un taller de galvanotecnia.

2.2.5. Enjuague

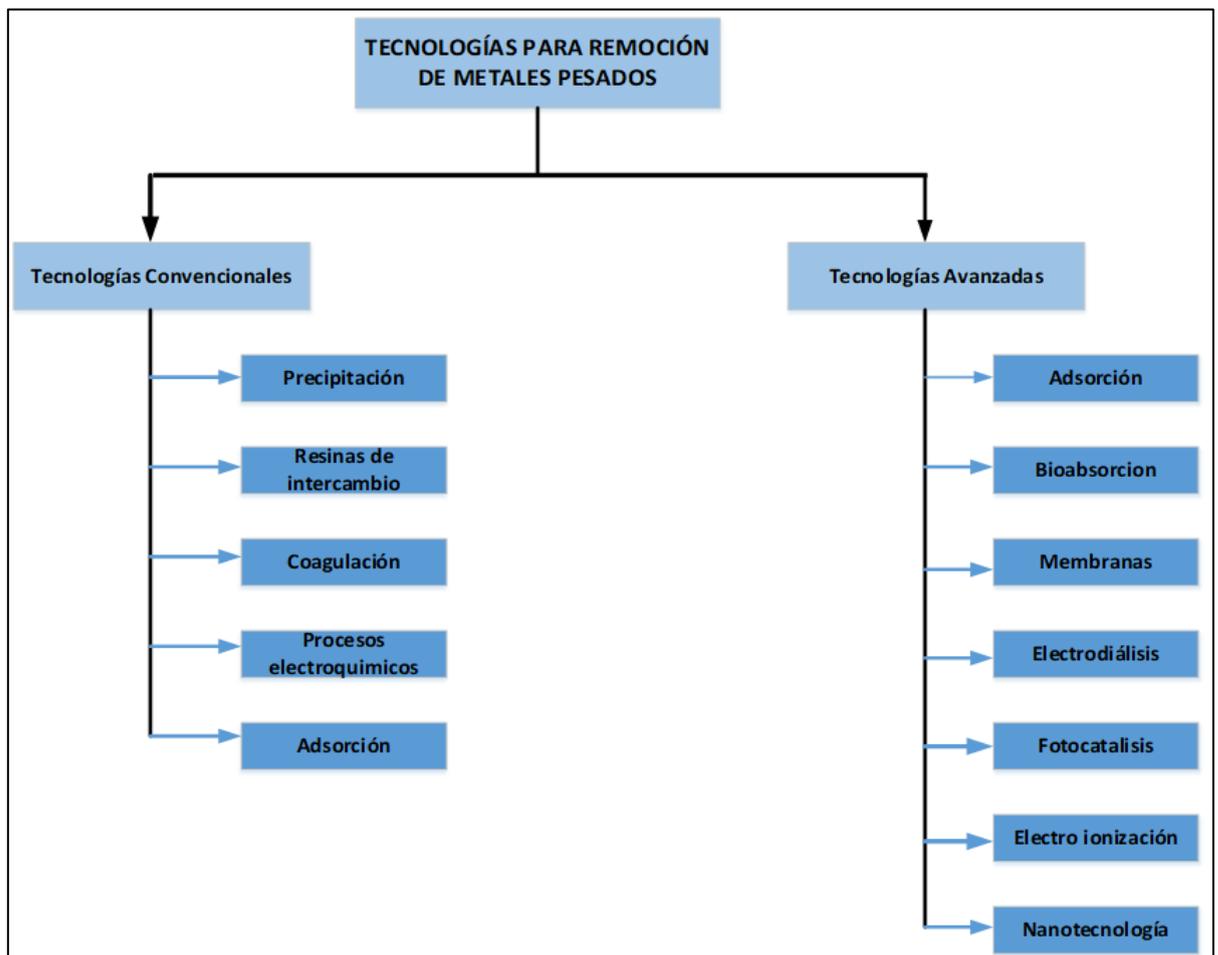
Constituye la fuente principal de aguas residuales de un proceso galvánico. Los enjuagues se utilizan para eliminar de las piezas los restos de soluciones químicas que arrastran las piezas a la salida de los baños. Los enjuagues contienen pequeñas concentraciones de las sales arrastradas. Es lo que constituye la contaminación de esas aguas y lo que hace necesario un tratamiento, en orden a eliminar esa contaminación y producir un vertido con el mínimo impacto ambiental.

Se pueden utilizar varias tecnologías de tratamiento para este propósito, como filtración, precipitación química, coagulación, intercambio iónico, adsorción y biorremediación. Las tecnologías emergentes en el tratamiento de residuos líquidos de galvanoplastia se basan

fundamentalmente en procesos de separación. Dentro de estas tecnologías se pueden mencionar la electrodiálisis, electrodesionización, ósmosis inversa y ultrafiltración. Todo este grupo de tecnologías se pueden englobar en lo que se denominan tecnologías limpias. En la figura 3 se muestran los procesos de tratamiento.

Figura 3

Tecnologías para la Remoción de Metales Pesados de las Aguas Residuales



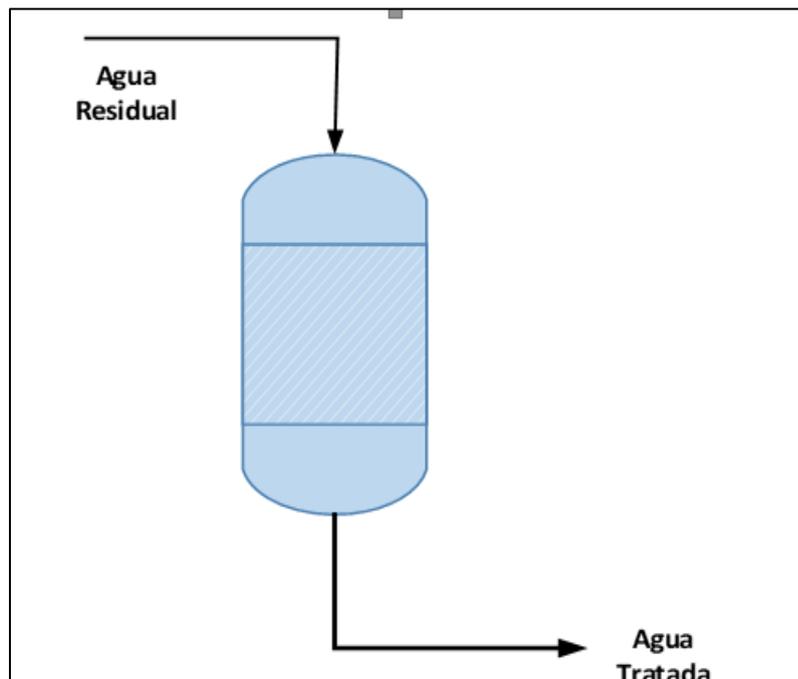
2.2.6. Procesos de tratamiento de iones cadmio

1) Intercambio iónico

Los sistemas de intercambio iónico utilizan la capacidad de resinas para adsorber metales de la solución en forma iónica a un pH específico. (Wong, Chun-Wai, 2014). Este proceso es muy efectivo para eliminación de metales forma continua de aguas residuales de bajas concentraciones de metales pesados a un costo razonablemente. Los cationes son reemplazados por iones hidrógeno que son desplazados desde la resina. Luego de un tiempo, la capacidad de la resina decrece, debiendo ser regenerada. La unidad de intercambio aniónico contiene una resina que remueve los iones cargados negativamente, tales como cianuro. Estos se reemplazan con iones hidroxilo (OH^-) que se desplazan desde la resina, debiendo ser regenerada con una base fuerte como el hidróxido de sodio.

Figura 4

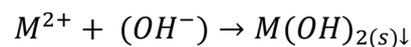
Proceso de Intercambiador Iónico



2) Precipitación química

La precipitación química se utiliza para eliminar las sustancias iónicas metálicas en aguas residuales industriales, mediante la adición de agentes precipitantes que dan como resultado una reacción química que convierte el compuesto soluble en una forma insoluble. Siempre va seguida de otras técnicas de separación, incluida la coagulación o la filtración, para eliminar los precipitados. La mayoría de los metales se precipitan como hidróxidos, sin embargo, otros métodos como la precipitación de sulfuros y carbonatos también son de uso común (Wang, 2005).

El mecanismo de precipitación se puede generalizar como.



Donde, M^{2+} son los iones metálicos, OH^{-} agente precipitante y finalmente el hidróxido de metal insoluble formado, respectivamente. (Brbootl ,2011) comparó la efectividad del uso de magnesia (MgO) con respecto al uso de cal de magnesia para la eliminación de $Fe(OH)_3$, $Cr(OH)_3$, $Cu(OH)_2$, $Pb(OH)_2$, y $Cd(OH)_2$, informó que la eficiencia de eliminación fue de más del 97% a una dosis óptima de MgO, Con el uso de MgO como agente precipitante, el lodo era granuloso, denso y fácilmente sedimentable y deshidratado, mientras que el uso de cal resultó en una baja tasa de sedimentación y dificultad de desagüe.

La reacción de precipitación del ion cadmio con hidróxido de calcio se indica a continuación.



3) Recuperación electrolítica

La recuperación electrolítica captura el metal en una solución, enchapándola sobre una fina hoja nueva hecha del metal que se recupera, o sobre una hoja de acero inoxidable que sirve así de cátodo en el tanque. El producto de este proceso es una plancha de metal sólida que se puede reciclar o usar como un ánodo en un tanque de electro-enchapado. Esta tecnología se aplica al agua de enjuague y a los baños de proceso gastados. Esta técnica requiere la segregación del agua de enjuague para evitar que se contamine el ánodo con los metales mezclados. Las celdas electrolíticas más habituales consisten en series de parejas de electrodos ánodo/cátodo en posición vertical, con agitación por aire y un filtro previo para la eliminación de partículas.

4) Técnicas de membrana

Las tecnologías de membrana tales como la osmosis inversa y ultrafiltración, son particularmente utilizadas en el tratamiento/recuperación de metales en sistemas de ciclo cerrado, proveniente de los residuos líquidos de las aguas de lavado. Todas las tecnologías de membrana tienen en general, las mismas ventajas:

Bajo costo de capital dada la característica modular de las unidades, hacen de ella una alternativa favorable en instalaciones de pequeña escala.

Bajo requerimiento de espacio: el equipo es compacto y opera continuamente requiriendo un mínimo de estanques.

Bajo costo de trabajo u operación: el proceso es simple de operar y es totalmente automatizado, lo que hace innecesario, la plena atención del operador.

Bajo uso de energía, los residuos líquidos no están sometidos a requerimientos de cambios de fase en el proceso.

No hay generación de lodos: una cantidad casi nula de productos químicos son usados por lo que no resultan lodos del tratamiento bajo esta técnica.

a. Osmosis inversa

Es un proceso de separación a presión a través de una membrana, en la cual el flujo de residuo líquido alimentado a presión es separado en un agua reconocida como producto, denominado permeado o permeado el cual contiene muy pocas sales y un concentrado o rechazo rico en sales. Esta separación se debe a una permeación selectiva del agua a través de una membrana semipermeable.

Aplicación: Recuperación de aguas de lavado

Ventajas: Bajo costo de energía, sólo requerida para el bombeo de fluido.

La ósmosis inversa sólo logra altas concentraciones cuando la presión utilizada supere a la presión osmótica de la solución. De esta manera, el grado de concentración logrado dependerá de la máxima presión de operación. En el caso de baños a temperatura ambiente, se requiere un pequeño evaporador de ciclo cerrado. - La capacidad de separación de la membrana se degrada con el tiempo, por lo que debe ser reemplazada en forma periódica.

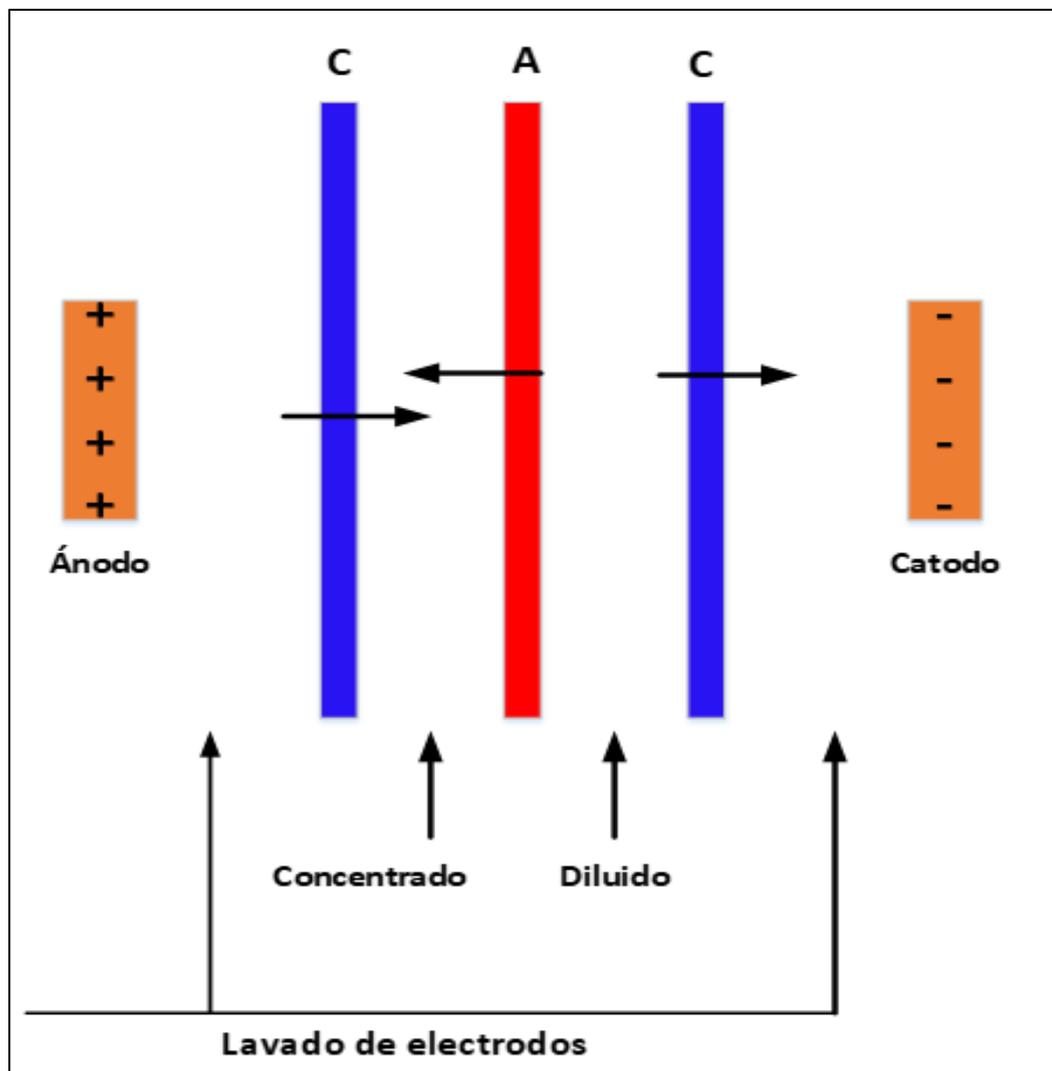
b. Electrodialisis

La electrodialisis es una tecnología que permite la separación de los iones contenidos en una disolución. Esta separación se consigue mediante la utilización de membranas selectivas de tipo iónico, aplicando entre ellas una diferencia de potencial. Mediante la aplicación de la técnica se obtienen dos corrientes, una diluida, de donde se han extraído los iones, y otra concentrada, donde han migrado las especies iónicas. La solución a tratar pasa a través de una serie alternativa de cámaras en paralelo denominadas de dilución y concentración, delimitadas ambas por

membranas permeables a aniones y permeables a cationes, un tipo de membrana en cada uno de los límites de las cámaras. El sistema lo componen también un ánodo y un cátodo colocados en los extremos del empaquetamiento de las membranas. Creando una diferencia de potencial a través del empaquetamiento se genera la migración de iones a través de las membranas, desde las cámaras de dilución hacia las cámaras de concentración.

Figura 5

Proceso de Intercambiador Iónico



c. Ultrafiltración

Tanto la ultrafiltración, técnica de separación que utilizan como elemento separador membranas semipermeables, micro porosas, y como fuerza impulsora un gradiente de presión.

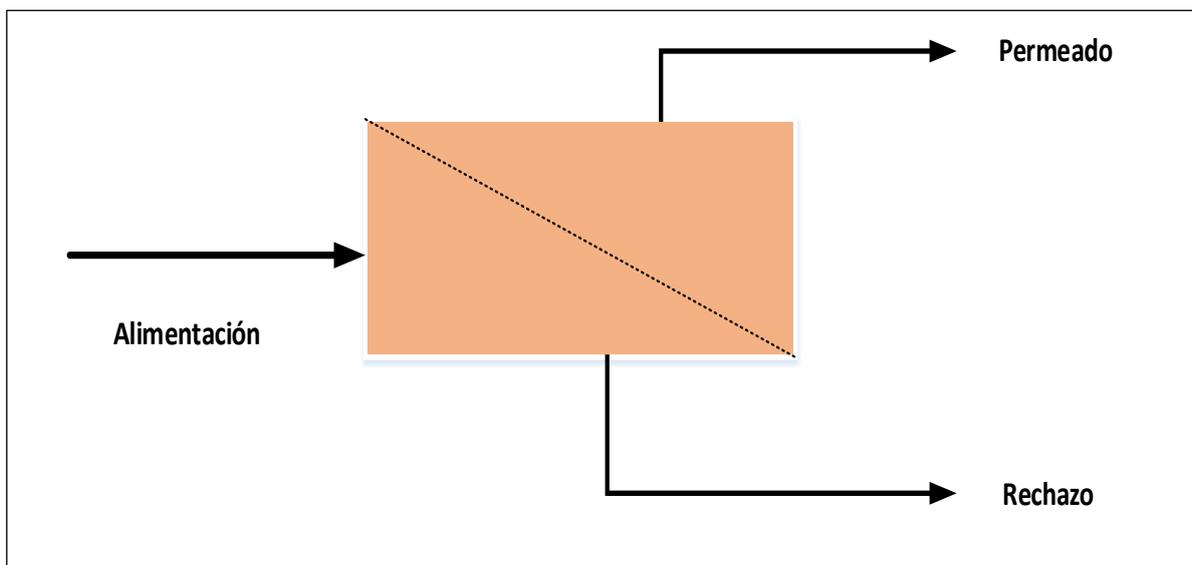
El mecanismo de transferencia en ambas técnicas es de tipo capilar, de modo que la membrana es considerada como un medio poroso constituido por una multitud de capilares. Como consecuencia de la filtración tangencial se generan con una sola entrada dos corrientes de salida:

Permeado: corriente exenta de aquellos componentes que no atraviesan las membranas.

Rechazo: corriente que contiene todas las especies químicas que rechaza la membrana. Tanto el permeado como el concentrado pueden ser reaprovechados.

Figura 6

Esquema de Ultrafiltración



2.2.7. Electrodesionización (EDI)

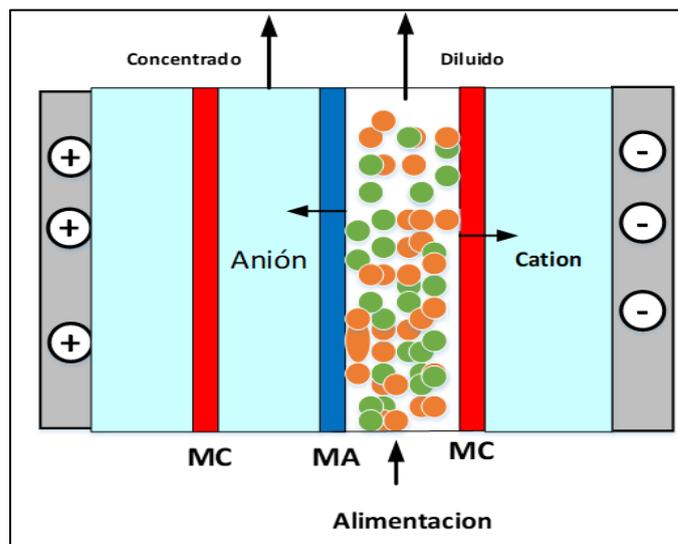
La Electrodesionización (EDI) o la Electrodesionización continua (CEDI) es una tecnología híbrida que combina electrodiálisis con resinas de intercambio iónico.

En este proceso intervienen una pequeña cantidad de resinas de intercambio iónico, membranas semipermeables aniónicas y catiónicas alternadas y una corriente eléctrica continua entre dos electrodos (cátodo y ánodo).

El compartimento central está lleno de materiales de resinas de intercambio iónico que mejoran el transporte de cationes o aniones bajo la fuerza impulsora de una corriente continua. La reacción de disociación del agua durante la operación EDI produce hidrógeno (H^+) y iones hidroxilo (OH^-). Los iones H^+ y OH^- producidos regeneran continuamente las resinas de intercambio iónico electroquímicamente sin utilizar productos químicos regeneradores.

Figura 7

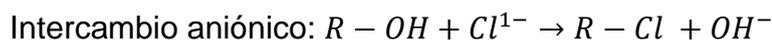
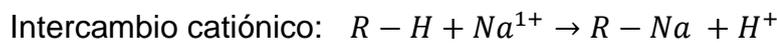
Representación del proceso de Electrodesionización



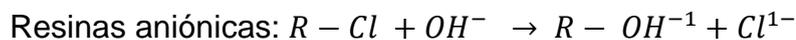
Las resinas de intercambio iónico aumentan la conductividad en todo el proceso. Canalizar y permitir el transporte de iones hacia las membranas de intercambio iónico con proceso de baja conductividad agua.

El sistema funciona entre dos electrodos, los iones que se mueven hacia los electrodos pasan a través de las membranas aniónica y catiónica formando compartimientos de concentrado y diluido.

A medida que el agua ingresa a través del compartimento diluido, el ion Na^+ y los iones Cl^- fueron adsorbidos por las de resina de intercambio catiónico y resinas de intercambio aniónico, respectivamente como se muestra en las siguientes ecuaciones químicas:



Las resinas de intercambio iónico se regeneran continuamente mediante los iones protones (H^+) iones hidroxilo (OH^-) que provienen de la disociación del agua como se indica en las siguientes ecuaciones:



1) Ventajas de los procesos de Electrodesionización

- No requiere productos químicos para su regeneración
- Es amigable con el medio ambiente
- Evita el manejo de residuos
- No requiere detención del equipo para la regeneración
- Requieren muy baja cantidad de energía para operar.
- Requieren pequeños espacios para instalación
- Mínima supervisión del operador
- Costo de operación es principalmente la energía eléctrica.

2.2.8. Marco Legal

Dado que las contrastaciones que realizaremos se darán de acuerdo con las normativas peruanas, procedemos a nombrarlos:

1) Decreto Supremo 015-2015-MINAM

Los Estándares de Calidad del Agua (ECA) para el agua en el Perú se dividen en cuatro categorías según el DS-015-2015.

Categoría 1: Poblacional y Recreacional

Sub categorías:

A→ Aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable.

A1→ Aguas que pueden ser potabilizadas c/ desinfección.

A2→ Aguas que pueden ser potabilizadas c/ tratamiento convencional.

A3→ Aguas que pueden ser potabilizadas c/ tratamiento avanzado.

B→ Aguas superficiales destinadas a la recreación.

Tabla 1

Estándar de calidad Ambiental para aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable

Parámetro	Unidad	Categoría 1		
		Aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable		
		A1	A2	A3
Cadmio	ppm	0.003	0.005	0.01

Fuente: D.S. 015-2016 MINAM

Tabla 2

Estándar de calidad Ambiental para aguas superficiales destinadas para la recreación

Parámetro	Unidad	Categoría 1	
		Aguas superficiales destinadas para la recreación	
		B1	B2
		Contacto Primario	Contacto Secundario
Cadmio	mg/L	0.01	**

Fuente: D.S. 015-2016 MINAM

** : No presenta valor en ese parámetro para la subcategoría.

Categoría 2: Actividades de Extracción y Cultivo Marino Costeras y Continentales

Sub categorías:

C1→ Extracción y cultivo de moluscos bivalvos en aguas marinas y costeras.

C2→ Extracción y cultivo de otras especies hidrobiológicas en aguas marino-costeras.

C3→ Otras actividades en aguas marino-costeras.

Diferencia a actividades C1 y C2, tales como infraestructura marina portuaria, de actividades industriales y de servicios de saneamiento.

C4→ Extracción y cultivo de especies hidrobiológicas en lagos y lagunas.

Tabla 3

Estándar de calidad Ambiental para aguas con extracción y cultivo Marino Costero y Continental

Parámetro	Unidad	Categoría 2			
		Agua de mar			Agua Continental
		C1	C2	C3	C4
Cadmio	mg/L	0.01	0.01	**	0.01

Fuente: D.S. 015-2016 MINAM

** : No presenta valor en ese parámetro para la subcategoría.

Categoría 3: Riego de vegetales y bebidas de animales.

Sub categorías:

D1 → Riego de cultivos de tallo alto y bajo.

D2 → Bebida de animales.

Tabla 4

Estándar de calidad Ambiental para aguas de riego de vegetales y bebidas de animales

Parámetro	Unidad	Categoría 3	
		Parámetro para Riego de Vegetales	Parámetro para bebidas de animales
		D1	D2
Cadmio	mg/mL	0.01	0.05

Fuente: D.S. 015-2016 MINAM

Categoría 4: Conservación del Ambiente Acuático.

Sub categorías:

E1→ Lagunas y Lagos

Comprenden todas las aguas que no presentan corriente continua, de origen y estado natural y lentico incluyendo humedades.

E2→ Bebida de animales.

E3→ Bebida de animales.

Tabla 5

Estándar de Calidad del Agua para la conservación del Ambiente Acuático

Parámetro	Unidad	Categoría 4				
		E1	E2	E3		
			Costa y Sierra	Selva	Estuarios	Marinos
Cadmio	mg/L	0.0025	0.0025	0.0025	0.0088	0.0088

Fuente: D.S. 015-2016 MINAM

2) Decreto Supremo 031-2010-SA

Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano

Consta de 10 títulos, 81 artículos, 12 disposiciones complementarias, transitorias y finales, y 05 anexos, cuyos textos forman parte integrante del presente decreto supremo.

El presente dispositivo legal, deroga la Resolución Suprema del 17 de diciembre de 1946 que aprobó el “Reglamento de los requisitos oficiales físicos, químicos y bacteriológicos que deben reunir las aguas de bebida para ser consideradas potables”, así como toda aquella disposición que

se le oponga.

El presente DS es refrendado por el Ministerio de Salud y de Vivienda, Construcción y Saneamiento.

Tabla 6

Límites Máximos Permisibles de Cadmio según el Reglamento de Calidad del Agua para consumo humano DS-031-2010-SA

Parámetros Inorgánicos	Unidad de medida	Límite Máximo Permissible
Cadmio	mg/L	0.003

Fuente: D.S. 031-2010 SA

3) Decreto Supremo 021-2009-VIVIENDA

Valores Máximos Admisibles de las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario.

Tabla 7

Valores Máximos Admisibles de las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado

Parámetro	UND	Expresión	VMA para descargas al sistema de alcantarillado
Cadmio	mg / L	Cd	0,2

Fuente: D.S. 021-2009 VIVIENDA

2.3. Conceptual

2.3.1. Elementos de la Celda de Electrodesionización

a. Electroodos

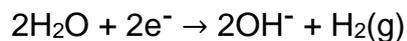
Los electrodos están formados por dos placas rectangulares de diferente material metálico, según corresponda al ánodo o al cátodo, a las cuales se les soldarán en su centro geométrico dos cilindros para conectar los bornes de la fuente de alimentación.

Una alta conductividad del electrodo facilitará una distribución uniforme de corriente y potencial en el electrodo, y contribuirá a disminuir el consumo específico de energía del proceso. Las propiedades fisicoquímicas del material electrónico deben ser resistentes a la corrosión, formación de óxidos aislantes en los ánodos, y a la deposición de películas orgánicas no conductoras. La disolución del metal se evita mediante la selección de un material resistente como el Platino, Platino recubierto sobre Titanio.

Cátodo

Las reacciones en el cátodo son relativamente moderadas con el desprendimiento de gas hidrógeno.

Reducción:



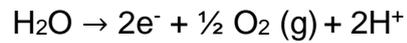
La disociación del agua incrementa sustancialmente el pH debido a los iones OH^- producidos.

Se utiliza generalmente acero inoxidable 316.

Ánodo

Los materiales de estos electrodos deben soportar las condiciones agresivas de sustancias oxidantes.

Oxidación:



b. Celda de Concentrado

Bajo los efectos de una corriente eléctrica los aniones y cationes pasan por las membranas y forman una solución electrolítica concentrada.

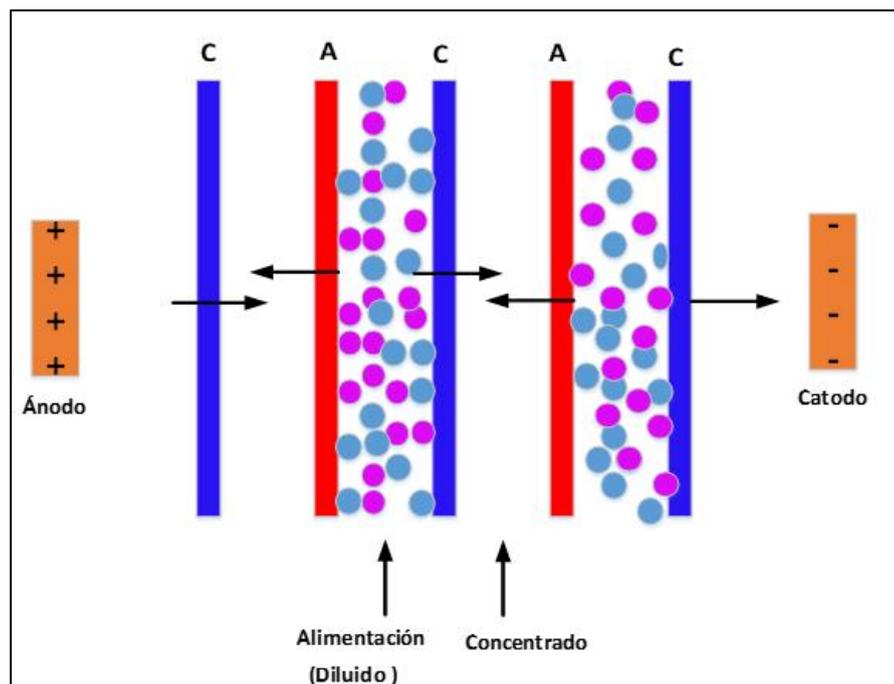
c. Celda de diluido

Es el producto obtenido, el tiempo de recirculación depende del nivel de desmineralización requerido.

En la figura 8 se indica el diagrama de las celdas concentrada y diluida.

Figura 8

Migración de iones de la Celda



2.4. Definición de Términos Básicos

- 1) **Ánodo:** Es un electrodo en el cual se produce la reacción de oxidación.
- 2) **Cátodo:** Es un electrodo donde se produce la reacción de reducción.
- 3) **Conductimetría:** Es un método que se utiliza para medir la conductividad de una disolución, determinada por su carga iónica, o salina, de gran movilidad entre dos puntos de diferente potencial.
- 4) **Membrana Aniónica:** Una membrana aniónica permitirá sólo el paso de aniones en este caso los grupos fijos son de carga positiva.
- 5) **Membrana Catiónica:** Es una lámina que contiene una matriz porosa como poliestireno en la cual están fijos grupos electronegativos.
- 6) **Electrodesionización:** Es una tecnología de tratamiento de agua que utiliza electricidad, intercambio iónico y resina para eliminar las especies ionizadas del agua.

III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis general y específica

3.1.1. Hipótesis general

La remoción de iones cadmio en solución acuosa empleando un equipo de Electrodesionización logra reducir los valores de iones Cadmio debajo de los límites máximos permisibles según la normativa peruana.

3.1.2. Hipótesis específicas

1. Al seleccionar los parámetros de operación como flujo y voltaje aplicados al equipo de Electrodesionización se logra evaluar su efecto con respecto a la concentración de iones cadmio.
2. Al analizar la concentración de iones cadmio después del tratamiento mediante Electrodesionización se obtendrá una solución final que cumpla los límites máximos permisibles de acuerdo con la norma de nuestro país.

3.2. Definición conceptual de variables

Variables independientes

En la figura 6 se muestra las variables independientes evaluadas durante la experimentación en el equipo de Electrodesionización.

X₁: Voltaje (V)

X₂: flujo (L/min)

X₃: Concentración Inicial de solución patrón (ppm).

Variable dependiente

La variable respuesta es la concentración y el porcentaje de separación de iones cadmio.

Y₁: Concentración final de iones cadmio.

Y₂: % de recuperación de flujo

Figura 9

Diagrama de Variables de la Investigación



3.2.1. Operacionalización de variables

Tabla 8

Variables Independientes

VARIABLE INDEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
X ₁ = Concentración inicial diluida a partir de solución patrón.	• Concentración inicial	• ppm	• Método instrumental ICP-Masa
	• Volumen	• L	• Uso de recipientes con volumen conocido
X ₂ = Flujo de alimentación	• Caudal	• (L/min)	• Cálculo mediante uso de probeta y cronómetro.
X ₃ = Voltaje aplicado	• Voltios	• V	• Lectura tomada del equipo de electrodesionización que cuenta con indicador del Voltaje aplicado.

Tabla 9

Variables Dependientes

VARIABLE DEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
Y ₁ =Concentración final de iones Cadmio (ppm).	• Concentración.	• ppm	• Método instrumental ICP-Masa Metales Totales: ISO 17294-2.2016. Water Quality-Application of inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS)-Part 2: Determination of selected elements including uranium isotopes.
Y ₂ =% Recuperación de flujo.	• Eficiencia	• %	• Cálculo numérico
	• Número de horas de trabajo.	• Horas tiempo de	• Uso instrumental mediante cronómetro.

IV. DISEÑO METODOLÓGICO

4.1. Tipo y diseño de investigación

Es una investigación aplicada de tipo experimental que permitirá evaluar la causa – efecto al modificar valores de parámetros para lograr la reducción de iones cadmio; además se demostrará la relación entre variables independiente y dependiente.

Diseño de la Investigación

La primera etapa de la investigación consiste la calibración de los instrumentos de medida y la evaluación del equipo experimental efectuando corridas preliminares con agua pura, para ajuste de voltaje, flujo. La segunda etapa consiste el desarrollo de la experimentación mediante diseño factorial, como se muestra en la tabla.

Tabla 10

Parámetros de operación y niveles de experimentación

Variable Independiente	Notación	Nivel bajo	Nivel alto
Voltaje	X_1	10	20
Flujo (L/min)	X_2	6	9
Concentración (ppm)	X_3	0.54	1,74

Tabla 11*Matriz de experimentación*

N°	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁	X ₂	X ₃	Y
1	-	-	-	10	6	0,54	Y1
2	+	-	-	20	6	0,54	Y2
3	-	+	-	10	9	0,54	Y3
4	+	+	-	20	9	0,54	Y4
5	-	-	+	10	6	1,74	Y5
6	+	-	+	20	6	1,74	Y6
7	-	+	+	10	9	1,74	Y7
8	+	+	+	20	9	1,74	Y8

4.2. Método de Investigación

El presente trabajo de tesis se puede clasificar como una investigación cuantitativa con datos sólidos y repetibles; es una investigación aplicada y experimental a nivel de laboratorio, la cual se realizó utilizando procedimientos y equipos, llegando a resultados que significan un aporte al conocimiento. La presente, está orientada a dar solución a un problema como la remoción de iones cadmio en solución acuosa.

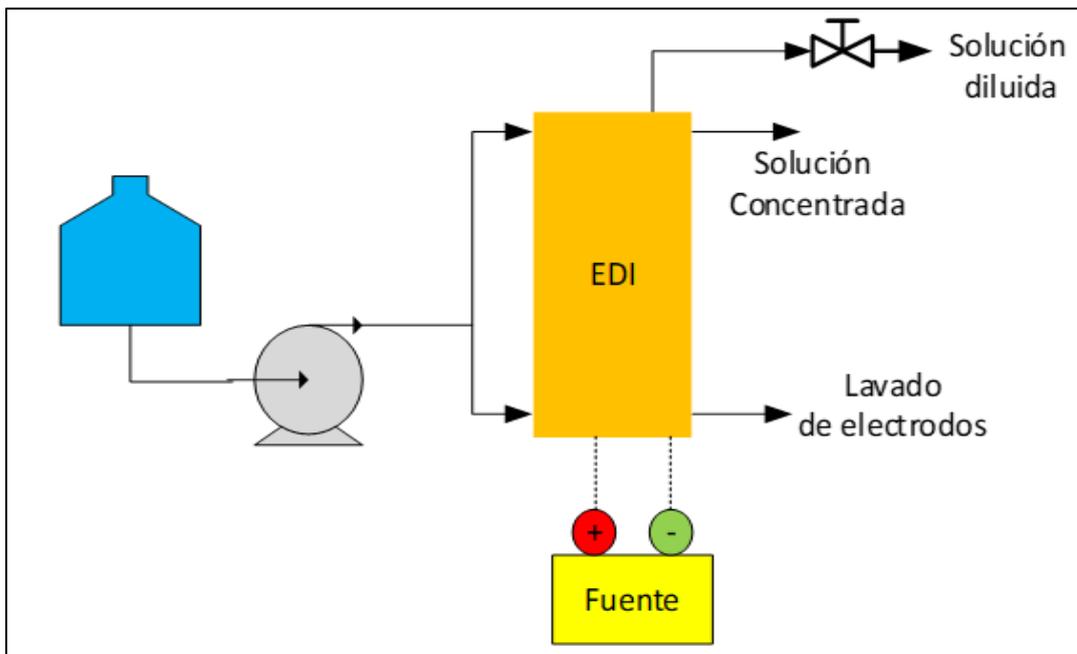
4.2.1. Equipo experimental

Es una investigación aplicada de tipo experimental que permitirá evaluar la causa – efecto y la relación entre variables independiente y dependiente.

El esquema del equipo experimental se muestra en la Figura 10. La unidad de electrodesionización (EDI), consta de un tanque de solución de alimentación, una bomba centrífuga y la fuente de corriente directa. La celda de EDI consta de tres compartimentos separados: compartimentos de lavado de electrodos, diluida (central) o permeado y el compartimento concentrado. El compartimiento diluido contiene una cierta cantidad de resina de intercambio iónico. Los compartimentos de cátodo y ánodo y el compartimento de diluyente se separaron usando una membrana de intercambio catiónico y membrana de intercambio aniónico.

Figura 10

Equipo experimental



4.2.2. Procedimiento experimental

Primero, Las soluciones de iones cadmio se prepararon usando agua desionizada obtenida por osmosis inversa.

Segundo, mediante una fuente eléctrica de corriente continua conectada al cátodo y ánodo, se aplicó una diferencia de potencial eléctrico que fue regulado a 2 niveles de experimentación.

La solución de alimentación se divide en tres corrientes, lavado de electrodos, diluida y concentrado, el flujo volumétrico de la solución diluida es controlado mediante una válvula manual.

Tercero, los experimentos se llevaron a cabo por un tiempo de 10 min en modo batch para cada experimento de acuerdo con el diseño experimental propuesto. Todas las pruebas se realizaron a temperatura ambiente.

Cuarto, se tomó muestras en la corriente diluida para su respectivo análisis en el laboratorio.

Quinto, se registró el flujo de alimentación y permeado mediante lectura del flujo metro incorporado en la celda de electrodesionización (EDI).

4.3. Población y Muestra

Población: Para la presente investigación no aplica el criterio población.

Muestra: Para el desarrollo de las pruebas experimentales se ha preparado 500 litros de solución sintética utilizando agua ultrapura y nitrato de cadmio de grado analítico, se preparó soluciones sintéticas de concentraciones similares a los efluentes vertidos. Las soluciones tienen una concentración inicial de 0.54 ppm y 1.74 ppm.

4.4. Lugar de estudio y periodo desarrollado

El presente trabajo ha sido realizado en Lima -Perú, utilizando una muestra patrón del distribuidor MERCK de $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ en HNO_3 en concentración 0.5mol/L en 1000mg/L de Cd, presentación de 500mL.

4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información

4.5.1. Técnica

Se ha efectuado un análisis químico mediante un equipo instrumental de Electrodesionización para reducir la concentración de iones cadmio. Se tomaron muestras del diluido y el voltaje de alimentación se midió en forma directa del equipo, se analizó la concentración de cadmio mediante el equipo instrumental ICP-Masa utilizando el método "ISO 17294-2.2016. Water Quality-Application of inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS)-Part 2: Determination of selected elements including uranium isotopes", en el laboratorio Cerper.

4.5.2. Instrumentos

Se utilizaron los siguientes equipos e instrumentos de medición:

- Equipo experimental de Electrodesionización.
- Fuente eléctrica para generar corriente continua
- Equipo de ICP-Masa.
- El voltaje se ha medido directamente del equipo de electrodesionización que tiene un visor incorporado para la lectura directa de los voltios aplicados.
- Cronómetro

4.6. Análisis y procesamientos de datos

El análisis estadístico de los resultados de las pruebas experimentales se efectuó mediante el SOFTWARE MINITAB, mediante su aplicación se realizó una serie de gráficas, análisis de varianza (ANOVA) para determinar los factores que influyen en la respuesta promedio y, análisis de regresión lineal.

Se ha investigado la influencia de tres parámetros principales: potencial eléctrico, flujo de la corriente diluida y concentración inicial de iones cadmio utilizando la metodología de diseño experimental factorial.

4.6.1. Ecuaciones Básicas

a) Porcentaje de recuperación de flujo

El porcentaje flujo de la corriente diluida es evaluado mediante la siguiente ecuación

$$R = \frac{q_d}{q_f} \times 100\%$$

Donde, q_d es el flujo de la corriente diluida, q_f flujo de alimentación.

b) Porcentaje de remoción de iones Cadmio

El porcentaje de remoción de iones cadmio es evaluado mediante la ecuación siguiente:

$$\% S = \left(\frac{C_i - C_f}{C_i} \right) \times 100\%$$

Donde C_i (mg/L) es la concentración inicial del ion cadmio y C_f (mg/L) es la concentración final del ion.

c) Consumo específico de energía

El consumo de energía (KWh / m³), se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$C.E = \frac{V I}{q_p}$$

Donde:

V: es el voltaje aplicado (V)

Qp: es el caudal de agua producida (mL / min).

t: tiempo en (min)

V. RESULTADOS

5.1. Resultados descriptivos

En la tabla 12 se presenta el diseño del experimento y el porcentaje de remoción de iones cadmio en dos niveles de los parámetros estudiados.

Tabla 12

Porcentaje de remoción de cadmio

N°	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁	X ₂	X ₃	Y ₁	Y ₂
1	-	-	-	10	6	0.54	0.00025	99.953%
2	+	-	-	20	6	0.54	0.00005	99.990%
3	-	+	-	10	9	0.54	0.00030	99.944%
4	+	+	-	20	9	0.54	0.00005	99.990%
5	-	-	+	10	6	1.74	0.00020	99.988%
6	+	-	+	20	6	1.74	0.00015	99.991%
7	-	+	+	10	9	1.74	0.00025	99.985%
8	+	+	+	20	9	1.74	0.00018	99.989%

Tabla 13*Porcentaje de recuperación de flujo del compartimiento diluido*

N°	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁	X ₂	X ₃	Y ₁	Y ₂
1	-	-	-	10	6	0.54	3,5	58.3%
2	+	-	-	20	6	0.54	3,5	58.3%
3	-	+	-	10	9	0.54	6.2	68.889%
4	+	+	-	20	9	0.54	6.2	68.889%
5	-	-	+	10	6	1.74	3.45	57.5%
6	+	-	+	20	6	1.74	3.5	58.33 %
7	-	+	+	10	9	1.74	6	66.667%
8	+	+	+	20	9	1.74	6	66.667%

Tabla 14*Estadísticas descriptivas*

Variable	Media	Desv.Est	Varianza	Mínimo	Máximo
Porcentaje de remoción	99.979	0.0189	0.00036	99.944	99.991
Porcentaje de recuperación de flujo	62.9427	5.24360	27.4953	57.5	68.889

5.2. Resultados inferenciales

Figura 11

Diagrama de Pareto de los efectos

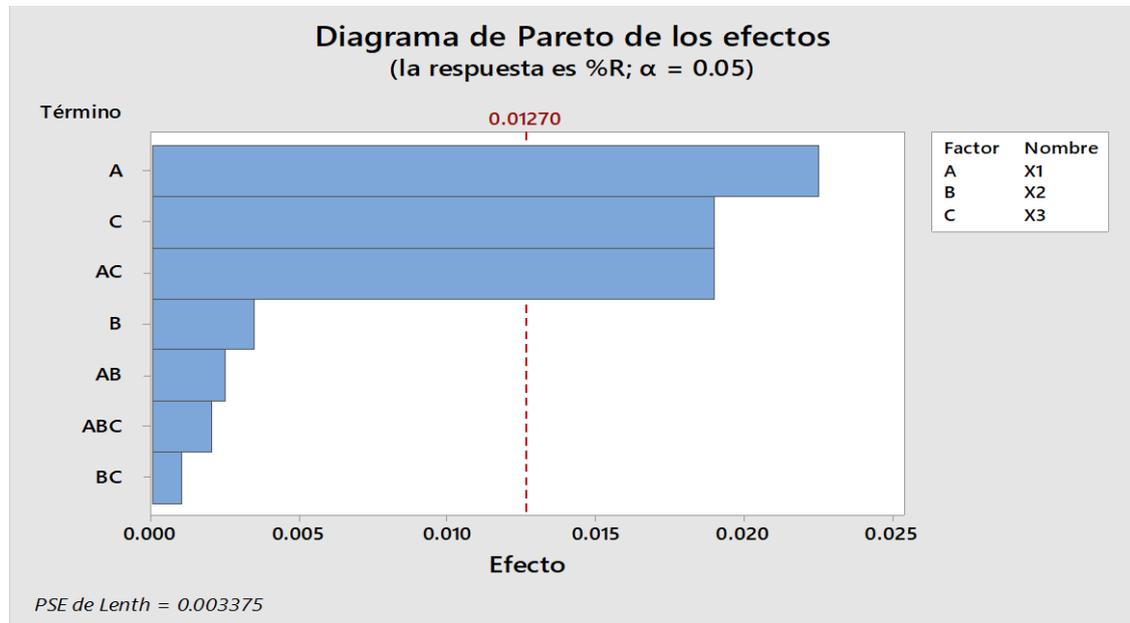


Figura 12

Gráfica Normal de los efectos

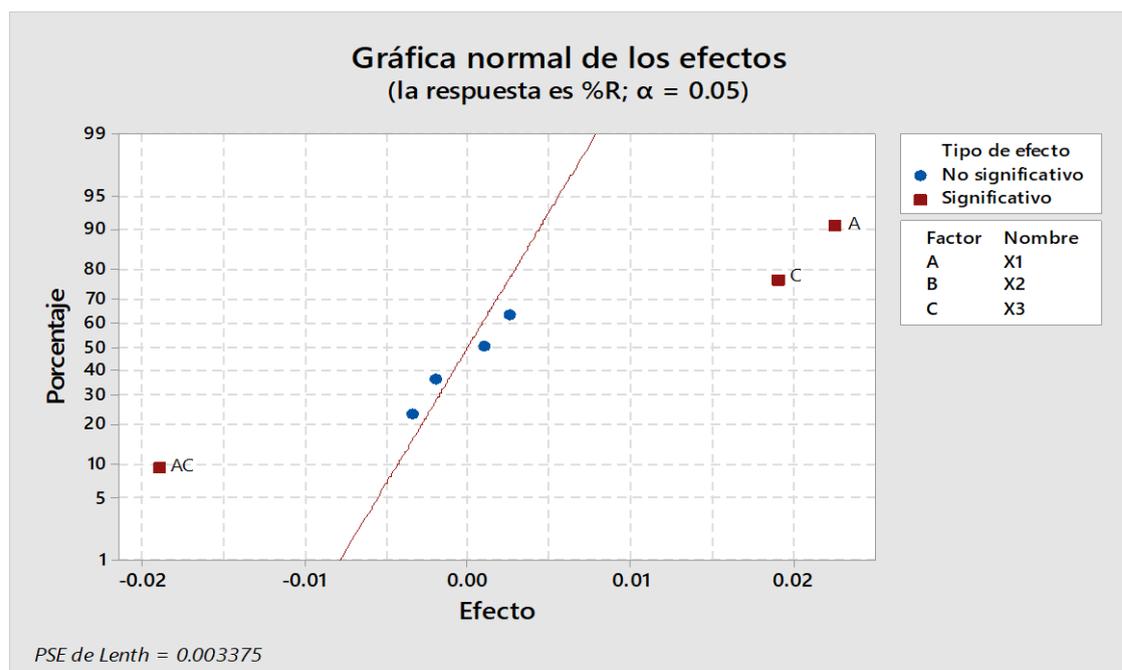


Figura 13

Media de Porcentaje de Separación de Iones cadmio

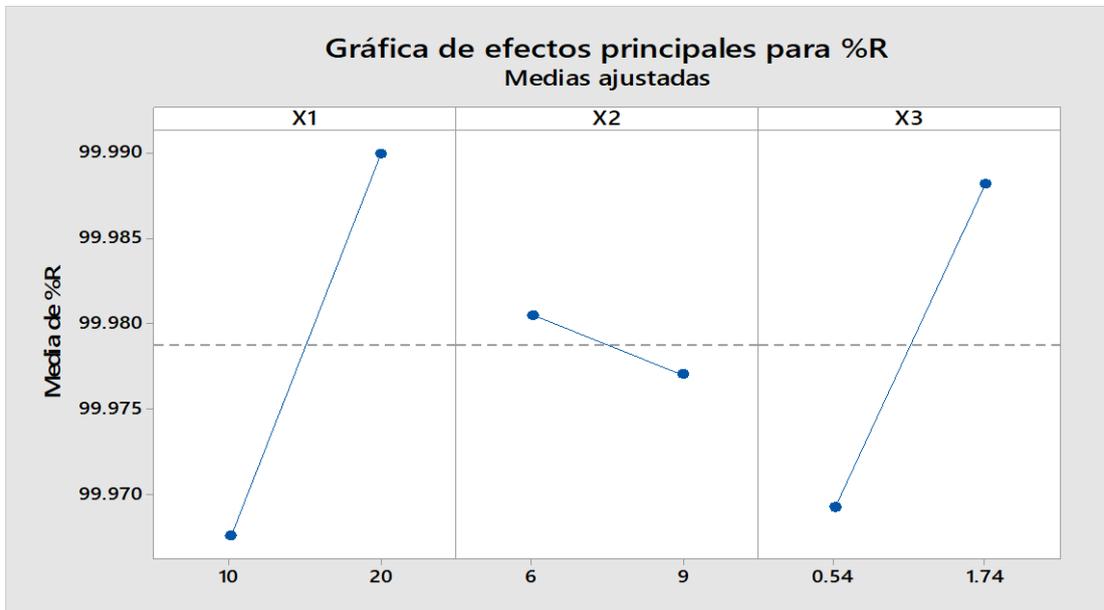


Tabla 15**Análisis de varianza**

Fuente contribución	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	%
Modelo	7	0.002503	0.000358	
Lineal	3	0.001759	0.000586	
X1	1	0.001012	0.001012	40.4
X2	1	0.000024	0.000024	0.9
X3	1	0.000722	0.000722	28.8
Interacciones de 2 términos	3	0.000736	0.000245	
X1*X2	1	0.000013	0.000013	0.00000243
X1*X3	1	0.000722	0.000722	0.000073
X2*X3	1	0.000002	0.000002	0.0000017
Interacciones de 3 términos	1	0.000008	0.000008	
X1*X2*X3	1	0.000008	0.000008	
0.00000000175				
Error	0			
Total	7	0.002503		

Figura 14

Diagrama de Pareto del porcentaje de los Efectos del Porcentaje de recuperación de flujo

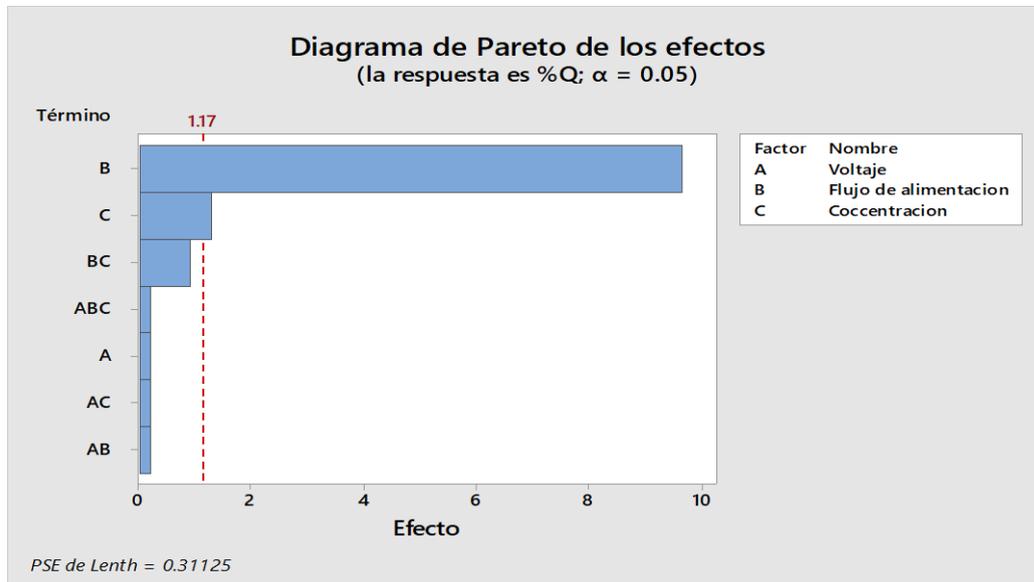


Figura 15

Gráfica de Efectos Normales (Absolutos)

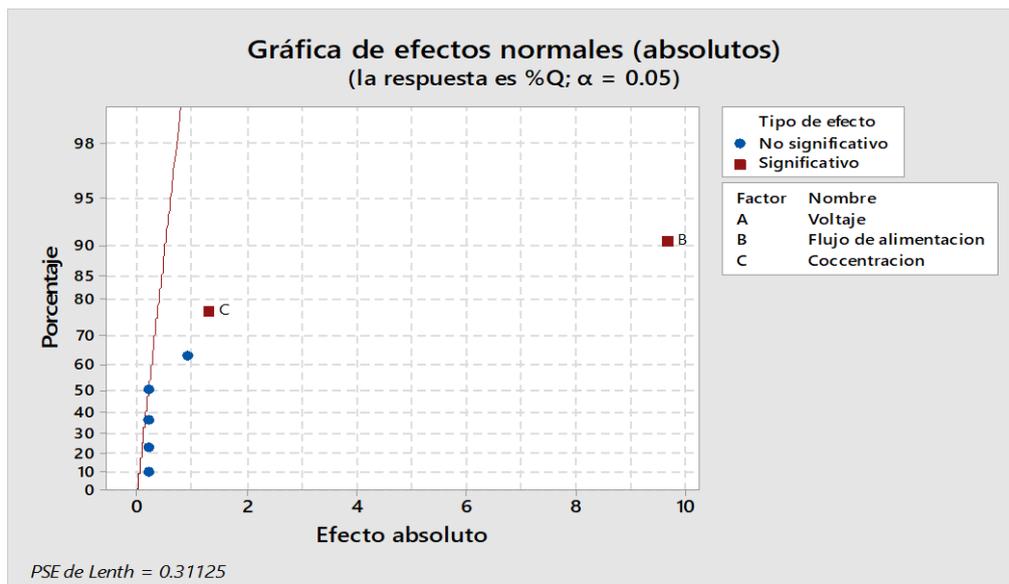


Figura 16

Media de Porcentaje de recuperación de flujo del compartimiento diluido

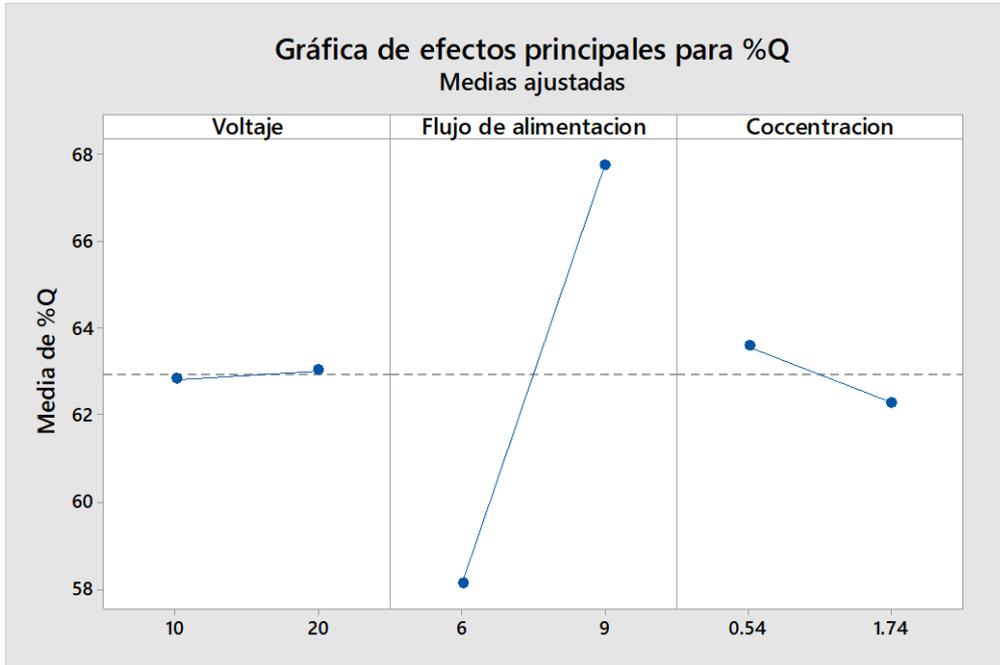


Tabla 16*Análisis de varianza*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.
Contribución			
Modelo	7	192.512	27.502
Lineal	3	190.572	63.524
Voltaje	1	0.086	0.086
Flujo de alimentación	1	187.095	187.095
Concentración	1	3.390	3.390
Interacciones de 2 términos	3	1.854	0.618
Voltaje*Flujo de alimentación	1	0.086	0.086
Voltaje*Concentración	1	0.086	0.086
Flujo de alimentación*Concentración	1	1.682	1.682
Interacciones de 3 términos	1	0.086	0.086
Voltaje*Flujo de alimentación*Concentración	1	0.086	0.086
Error	0	*	*
Total	7	192.512	

VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1 Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados

El Efecto del potencial aplicado a la celda de EDI se muestra en la figura 13, se observa a medida que aumenta el potencial se logra mayor porcentaje de separación de iones cadmio.

En la figura 11 de Pareto se observa que los factores que tiene mayor significancia son el potencial aplicado a la celda de EDI y la concentración de alimentación de iones cadmio.

En la figura 12 de efectos normales también confirma que los factores más significativos son el potencial aplicado y concentración de alimentación en el porcentaje de separación de iones cadmio.

En la tabla 15 de ANOVA el potencial eléctrico contribuye un 40,4 % como factor principal.

6.2 Contrastación de los resultados con otros estudios similares

En el trabajo de investigación cuyo autor Wardani, (2017) En el estudio, llevaron a cabo varios experimentos en un sistema de electroionización en modo batch a concentraciones iniciales de iones níquel de 300 mg/L a diferentes potenciales aplicados al módulo de EDI.

Los resultados se muestran en la tabla 16. Donde se observa que el porcentaje de remoción de iones níquel está en función del tiempo de operación y el aumento del potencial eléctrico aplicado a la celda.

Tabla 17*Porcentaje de remoción de iones Níquel*

Tiempo (min)	Potencial eléctrico aplicado a la celda EDI (voltios)	
	85	100
10	45,76 %	55,67%
30	90,67%	94,67%
60	99,67%	99,67

Fuente: Wardani (2017)

6.3. Responsabilidad ética de acuerdo con los Reglamentos Vigentes

La autora de la investigación se responsabiliza por la información emitida en el presente trabajo de investigación de acuerdo al Reglamento del Código de Ética de Investigación de la Universidad Nacional del Callao, Resolución de Consejo Universitario N° 260-2019-CU.

CONCLUSIONES

1. Se concluye que se han establecido de manera certera las condiciones de operación en el experimento a nivel de laboratorio para lograr niveles reducidos de Cadmio, los cuales han sido removidos hasta valores menores a los requeridos por la normativa legal peruana vigente.
2. Los principales parámetros experimentales que determinan el porcentaje de separación del módulo de electrodesionización (EDI), son el potencial eléctrico aplicado, la velocidad del flujo en los compartimentos diluido y concentración inicial de iones cadmio, la temperatura se mantuvo constante durante la experimentación a 28°C.

De los parámetros evaluados experimentalmente se demostró que el EDI da un resultado sobresaliente en términos de la separación de iones a partir de una concentración inicial entre (0.54 – 1.74) de solución de alimentación, el potencial eléctrico aplicado a la celda de EDI es una variable de mayor significancia en el mayor porcentaje de separación de iones cadmio.

3. Los resultados mostraron que el rendimiento de EDI aumentó con un aumento en el potencial eléctrico alcanzado un porcentaje de remoción de 99,9 % a 20 Voltios la concentración de cadmio en la cámara de diluido disminuyó hasta un 99% en un modo continuo de operación.

Además, los resultados de este experimento cumplen con el requisito del ministro de acuerdo al D.S. 015-2016 MINAM donde la concentración de iones cadmio está por debajo de la norma.

La variable influyente en el porcentaje de recuperación de flujo es el flujo de alimentación en el nivel alto de la experimentación obteniéndose un valor de 68 % de recuperación.

RECOMENDACIONES

1. Para trabajos futuros evaluar la separación de ion cadmio con aguas residuales reales de la industria galvánica para ver su efecto con otras sustancias contaminantes.
2. Se debe tomar las medidas de seguridad en el proceso experimental para evitar contaminación con cadmio.
3. Se debe evaluar el consumo específico de energía para evaluar la viabilidad económica del proceso.
4. Evaluar el corriente límite del proceso, potencial aplicado a la celda de EDI con respecto a la intensidad de corriente eléctrica, para la obtención del potencial máximo que debe operar la celda de EDI.
5. Hacer un estudio de la evaluación a las variables operativas a tres niveles de experimentación para tener una tendencia más exacta en el porcentaje de remoción del ion Cadmio.
6. Analizar la influencia de otras variables operativas como presión de alimentación y pH de la solución de alimentación para ver la influencia en el porcentaje de separación y flujo de recuperación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarado Lucía, Chen Aicheng (2014). **“Electrodeionization: Principles, Strategies and Applications”**, *Electrochimica Acta*. Department of Chemistry, Lakehead University, vol 132, pp 538-597, Canadá. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013468614007087>
- Arar, Ö., Yüksel, Ü., Kabay, N., & Yüksel, M. (2011). **“Removal of Cu²⁺ ions by a micro-flow electrodeionization (EDI)” system**. *Desalination*, 277(1-3), 296-300, Turkía
- Bhadja Vaibhavee, Makwana Babubhai S, Maiti Subarna, Sharma Saroj, Chatterjee Uma (2015) **“Comparative Efficacy Study of different Types of Ion Exchange Membranes for Production of Ultrapure Water via Electrodeionization”**. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, ACS Publication by American Chemical Society, pp 1-23, Washington D.C. Estados Unidos de América
- Bouhidel Kamel-Eddine, Lakehal Aicha (2005), **“Influence of voltage and flow rate on electrodeionization (EDI) process efficiency”**, *Chemistry and Environmental Chemistry Laboratory (Team of Water Chemistry, Desalination and Environment)*, Department of Chemistry, Faculty of Science, University of Batna, vol 193, pp 411-421, Algeria.
- Brbootl, Mahmood M., Balasim A. AbiD, and Najah M. Al-Shuwaikl (2011), **“Removal of heavy metals using chemicals precipitation.”** *Eng. Technol*. J 29.3 (2011): 595-612, Iraq.
- Dalla Costa Roni F., Klein Cláudia, Bernardes Andrea, Zoppas Jane(2002), **“Evaluation of the Electrodialysis Process for the Treatment of Metal Finishing Wastewater”**, *Sociedade Brasileira de Quimica*, vol. 13, pp. 540-547, Brasil.
- Colantonio Natalie, Kim Younggy, (2016), **“Cadmium (II) removal mechanism in microbial electrolysis cells”** *Journal and Hazardous Materials* 311.

- Huaranga Moreno Félix, Méndez García Eduardo, Quilcat León Vito, Félix Huaranga Arévalo (2012), **“Contaminación por metales pesados en la Cuenca del río Moche, 1980-2010”**, Scientia Agropecuaria, volumen 3, pg.235-247, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Trujillo, Perú.
- Khoiruddin, Widiassa I.N., Wenten I.G. (2014), **“Removal of inorganic contaminants in sugar refining process using electrodeionization”**, Journal of Food Engineering, vol 133, pp 40-45, Indonesia.
- Marín Gloria M, García MM (2015), **“Contaminación por Cadmio en alimentos marinos”**; Facultad de Farmacia y Bioquímica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú.
- Pyrzynska, Krystyna (2019), **“Removal of cadmium from wastewaters with low-cost adsorbents.” Journal of Environmental Chemical Engineering”** 7.1:102795, Polonia.
- Santarosaa V.E., Perettia F., Caldarta V., Zoppasb J., Zenia M. (2002), **“Study of ion-selective membranes from electrodialysis removal of industrial effluent metals II: Zn and Ni”**, Desalination 149, pp. 389-391, Brasil.
- Sarıçiçek, E. N., Tuğaç, M. M., Özdemir, V. T., İpek, İ. Y., & Arar, Ö. (2021). **“Removal of boron by boron selective resin-filled electrodeionization”**, Environmental Technology & Innovation, 101742.Turquía.
- Simonescu, Claudia Maria,(2020) et al. **“Experimental and modeling of cadmium ions removal by chelating resins.”** Journal of Molecular Liquids 307 (2020): 112973, Rumania.
- Sun kou, m.r.; apolaya, m.; balvin, e.; neira,(2004) e. **“Procesos para el tratamiento de las aguas residuales en Plantas Galvánicas y Metalúrgicas”**. PUCP, Perú.
- Tonni Agustiono, Kurniawan Gilbert, Y.S.Chan Wai-Hung Lo Sandhya Babel , (2006) eds. **“Physico–chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals.”** Hong Kong, China.

- Vasudevan, Alexander, (2017). **“The Autonomous City: A History of Urban Squatting”** Londres: Verso, 304 p.
- Waalkes, M.P. (2000). **“Cadmium Carcinogenesis in Review”**. Journal of Inorganic Biochemistry, 79, 241-244. Research Triangle Park, NC 27706, USA.
- Wardani Anita K., Hakim Ahmad N., Khoiruddin, Destifen Welsen, Goenawan Albertus, Wenten I G. (2007), **“Removal of metal ions from electroplating effluent by EDI process and recycle of purified water”**, Departmet of Enviromental Engineering, Zhejiang University, China.
- Wardani, A. K., Hakim, A. N., Khoiruddin, Destifen, W., Goenawan, A., & Wenten, I. G. (2017), **“Study on the influence of applied voltage and feed concentration on the performance of electrodeionization in nickel recovery from electroplating wastewater”**. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1805, No. 1, p. 030004). AIP Publishing LLC. Indonesia.
- Wong, Chun-Wai, (2014) et al., **“Kinetics and equilibrium studies for the removal of cadmium ions by ion exchange resin”** Journal of Environmental Chemical Engineering 2.1: 698-707. Hong Kong, China.
- Xiao Feng, Zucheng Wu, Xuefeng Chen (2007), **“Removal of metal ions from electroplating effluent by EDI process and recycle of purified water”**, Departmet of Enviromental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China.
- Zahakifar, F., Keshtkar, A. R., Souderjani, E. Z., & Moosavian, M. A. (2020). **“Use of response surface methodology for optimization of thorium (IV) removal from aqueous solutions by electrodeionization (EDI)”**. Progress in Nuclear Energy, 124, 103335, Theran, Iran.
- Wang, Y., Zhuang, G., Tang, A., Yuan, H., Sun, Y., Chen, S., & Zheng, A. (2005). **The Ion Chemistry and the Source of PM_{2.5} Aerosol in Beijing**. Atmospheric Environment, 39, 3771-3784.

Páginas

DIGESA. Estándares de calidad ambiental del agua para riego y consumo de animales. Disponible en:

http://www.digesa.minsa.gob.pe/DEPA/informes_tecnicos/GRUPO%20DE%20USO%203.pdf_ Artículo web consultado el 21 de noviembre del 2017.

MINISTERIO DE VIVIENDA PERUANO. Valores Máximos Admisibles de las descargas de aguas residuales en el sistema de alcantarillado sanitario (20 Nov. 2009). Disponible en:

http://www3.vivienda.gob.pe/direcciones/Documentos/DS_2009_021.pdf, consultada el 22 de noviembre 2017.

SUNASS. Parámetros de calidad y límites máximos permisibles para el agua potable.[http://www.sunass.gob.pe/doc/normas%20legales/legisla%20web\(cambio\)/normas/calidad%20de%20agua/Oficio%20677.pdf](http://www.sunass.gob.pe/doc/normas%20legales/legisla%20web(cambio)/normas/calidad%20de%20agua/Oficio%20677.pdf) , 22 de Noviembre 2017.

Anexos

1. Matriz de consistencia

" REMOCION DE IONES CADMIO EN SOLUCIÓN ACUOSA EMPLEANDO UN EQUIPO DE ELECTRODESIONIZACION"						
PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPOTESIS GENERAL	VARIABLE DEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
¿Cuáles serán las condiciones de operación más adecuadas del equipo de electrodesionización para la remoción de iones cadmio en solución acuosa?	Estabecer las condiciones de operación más adecuadas del equipo de electrodesionización para la remoción de iones cadmio en solución acuosa.	La remoción de iones cadmio en solución acuosa empleando un equipo de electrodesionización logra reducir los valores de iones Cadmio por debajo de los límites máximos permisibles según la normativa peruana.	Y ₁ =Concentración final de iones Cadmio (ppm). Y ₂ =% Recuperación de flujo.	<ul style="list-style-type: none"> Concentración Eficiencia Número de horas de trabajo. 	<ul style="list-style-type: none"> ppm % Horas tiempo 	<ul style="list-style-type: none"> Método Instrumental ICP-Masa. ISO 17294-2.2016 Cálculo numérico Electrodesionización.
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECIFICOS	HIPOTESIS ESPECIFICAS	VARIABLE INDEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
<p>a)¿Cuáles serán los parámetros de operación y niveles de experimentación (concentración inicial de iones cadmio, voltaje, flujo volumétrico) del equipo de electrodesionización que permita la remoción de iones cadmio?.</p> <p>b) ¿Cuál será el porcentaje de remoción de iones cadmio alcanzado mediante el proceso de electrodesionización?</p>	<p>a) Seleccionar los parámetros de operación y niveles de experimentación (concentración inicial de iones cadmio, voltaje, flujo volumétrico) del equipo de electrodesionización.</p> <p>b)Determinar el % de remoción de iones cadmio mediante el proceso de tratamiento por electrodesionización.</p>	<p>a) Al seleccionar los parámetros de operación como flujo y voltaje aplicados al equipo de electrodesionización se logra evaluar su efecto con respecto a la concentración de iones cadmio.</p> <p>b) Al analizar la concentración de iones cadmio después del tratamiento mediante electrodesionización se obtendrá un solución final que cumplan los límites máximos permisibles de acuerdo con la norma de nuestro país.</p>	<p>X₁= Concentración inicial diluida a partir de solución patrón.</p> <p>X₂= Flujo de alimentación</p> <p>X₃= Voltaje Aplicado</p>	<ul style="list-style-type: none"> Concentración inicial. Volumen Caudal Voltios 	<ul style="list-style-type: none"> ppm L L/s V 	<ul style="list-style-type: none"> Método Instrumental ICP-Masa. ISO 17294-2.2016 Uso de recipientes con volumen conocido Cálculo mediante uso de probeta y cronómetro Lectura tomada del equipo de electrodesionización que cuenta con indicador del Voltaje Aplicado