

METALES PESADOS EN EL AGUA

**Contaminación por actividad minera
y reducción de plomo y zinc en río**

**Fabian Alexander Huaman Cerna
Antonio Manuel Otoyá Zelada
Guillermo David Evangelista Benites,
Percy Danilo Aguilar Rojas
Natalia Del Pilar Díaz Díaz**



Religación
Press

Colección Ingeniería

Metales pesados en el agua

Contaminación por actividad minera y
reducción de plomo y zinc en río

Fabian Alexander Huaman Cerna
Antonio Manuel Otoyá Zelada
Guillermo David Evangelista Benites,
Percy Danilo Aguilar Rojas
Natalia Del Pilar Díaz Díaz

Religación **P**ress

Engineering Collection

Heavy metals in water

**Contamination by mining activity and
reduction of lead and zinc in river**

Fabian Alexander Huaman Cerna
Antonio Manuel Otoyá Zelada
Guillermo David Evangelista Benites,
Percy Danilo Aguilar Rojas
Natalía Del Pilar Díaz Díaz

Religación **P**ress

Religación Press

Equipo Editorial / Editorial team

Eduardo Díaz R. Editor Jefe

Roberto Simbaña Q. | Director Editorial / Editorial Director |

Felipe Carrión | Director de Comunicación / Scientific Communication Director |

Ana Benalcázar | Coordinadora Editorial / Editorial Coordinator|

Ana Wagner | Asistente Editorial / Editorial Assistant |

Consejo Editorial / Editorial Board

Jean-Arsène Yao | Dilrabo Keldiyorovna Bakhronova | Fabiana Parra | Mateus

Gamba Torres | Siti Mistima Maat | Nikoleta Zampaki | Silvina Sosa

Religación Press, es parte del fondo editorial del Centro de Investigaciones CICSHAL-RELIGACIÓN | Religación Press, is part of the editorial collection of the CICSHAL-RELIGACIÓN Research Center |

Diseño, diagramación y portada | Design, layout and cover: Religación Press.

CP 170515, Quito, Ecuador. América del Sur.

Correo electrónico | E-mail: press@religacion.com

www.religacion.com

Disponible para su descarga gratuita en | Available for free download at | <https://press.religacion.com>

Este título se publica bajo una licencia de Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0)
This title is published under an Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license.



Metales pesados en el agua. Contaminación por actividad minera y reducción de plomo y zinc en río

Heavy metals in water. Contamination by mining activity and reduction of lead and zinc in river
Metais pesados na água. Contaminação por atividade de mineração e redução de chumbo e zinco nos rios

Derechos de autor Copyright:	Religación Press© Fabian Alexander Huaman Cerna©, Antonio Manuel Otoya Zelada©, Guillermo David Evangelista Benites©, Percy Danilo Aguilar Rojas©, Natalia Del Pilar Díaz Díaz©
Primera Edición: First Edition:	2024
Editorial: Publisher:	Religación Press
Materia Dewey: Dewey Subject:	660 - Ingeniería Química
Clasificación Thema: Thema Subject Categories	PNC - Química medioambiental
BISAC:	SCI013000 SCIENCE / Chemistry / General
Público objetivo: Target audience:	Profesional / Académico Professional / Academic
Colección: Collection:	Ingeniería Química
Soporte/Formato: Support/Format:	PDF / Digital
Publicación: Publication date:	2024-06-24
ISBN:	978-9942-664-03-7

Nota: el libro retoma y amplía, por un grupo de investigadores, lo mostrado en la tesis "Aplicación de agentes quelantes para la estabilización de plomo y zinc en las aguas del río Moche - Trujillo" presentada ante la Universidad Nacional De Trujillo por Fabian Alexander Huaman Cerna en 2024.

Note: the book takes up and expands, by a group of researchers, what was shown in the thesis "Aplicación de agentes quelantes para la estabilización de plomo y zinc en las aguas del río Moche - Trujillo" presented to the Universidad Nacional De Trujillo by Fabian Alexander Huaman Cerna in 2024.

APA 7

Huaman Cerna, F. A., Otoya Zelada, A. M., Evangelista Benites, G. D., Aguilar Rojas, P. D., y Díaz Díaz, N. del P. (2024). *Metales pesados en el agua. Contaminación por actividad minera y reducción de plomo y zinc en río*. Religación Press. <https://doi.org/10.46652/ReligacionPress.159>

[Revisión por pares]

Este libro fue sometido a un proceso de dictaminación por académicos externos (doble-ciego). Por lo tanto, la investigación contenida en este libro cuenta con el aval de expertos en el tema quienes han emitido un juicio objetivo del mismo, siguiendo criterios de índole científica para valorar la solidez académica del trabajo.

[Peer Review]

This book was reviewed by an independent external reviewers (double-blind). Therefore, the research contained in this book has the endorsement of experts on the subject, who have issued an objective judgment of it, following scientific criteria to assess the academic soundness of the work.

Sobre los autores/ About the authors

Fabian Alexander Huaman Cerna

<https://orcid.org/0009-0000-2096-2440>
Universidad Nacional De Trujillo | Trujillo | Perú
fhuaman@unitru.edu.pe

Asistente de cátedra en la Facultad de Ingeniería Química – UNT, en los cursos de Fenómenos de Transporte y Modelamiento, Simulación y Control de Procesos. Bachiller en Ingeniería Química. Cuenta con título profesional de Ingeniero Químico

[Teaching assistant at the Faculty of Chemical Engineering - UNT, in the courses of Transport Phenomena and Modeling, Simulation and Process Control. Bachelor in Chemical Engineering. He holds a professional degree in Chemical Engineering.]

Antonio Manuel Otoy Zelada

<https://orcid.org/0000-0001-6460-969X>
Universidad Nacional De Trujillo | Trujillo | Perú
amotoyaz@unitru.edu.pe

Doctor en Ingeniería Química Ambiental, Título profesional de Ingeniero Químico, experiencia docente en la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo (UNASAM), área ciencias básicas y en la Universidad Nacional de Trujillo (UNT), área de Ingeniería Química.

[Dr. in Environmental Chemical Engineering, professional degree in Chemical Engineering, teaching experience at the Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo (UNASAM), basic sciences area and at the Universidad Nacional de Trujillo (UNT), Chemical Engineering area.]

Guillermo David Evangelista Benites

<https://orcid.org/0000-0002-1955-6565>

Universidad Nacional De Trujillo | Trujillo | Perú

gevangelista@unitru.edu.pe

Especialista en métodos numéricos, transferencia de calor, mecánica de fluidos y simulación de procesos. Doctor en Ciencias e Ingeniería. Miembro de RENACYT.

[Specialist in numerical methods, heat transfer, fluid mechanics and process simulation. PhD in Science and Engineering. Member of RENACYT.]

Percy Danilo Aguilar Rojas

<https://orcid.org/0000-0001-9345-7955>

Universidad Nacional De Trujillo | Trujillo | Perú

paguilarr@unitru.edu.pe

Especialista en sistemas integrados de gestión, gestión y evaluación de proyectos.

[Specialist in integrated management systems, project management and evaluation.]

Natalia Del Pilar Díaz Díaz

<https://orcid.org/0000-0002-6564-4128>

Universidad Nacional De Trujillo | Trujillo | Perú

ndiazd@unitru.edu.pe

Ingeniero Ambiental y Recursos naturales, Maestro en Ciencias con mención en Gestión Ambiental, Doctor en Planificación y Gestión, Docente Auxiliar de la Universidad Nacional de Trujillo (UNT) Escuela de Ingeniería Ambiental.

[Environmental and Natural Resources Engineer, Master of Science in Environmental Management, PhD in Planning and Management, Assistant Professor at the Universidad Nacional de Trujillo (UNT) School of Environmental Engineering.]

Resumen

El agua es esencial para los seres humanos, ya que juega un papel crucial en los procesos orgánicos como la digestión de los alimentos, la absorción de nutrientes y la eliminación de desechos. En Perú, la mayoría de la población no puede acceder a tratamientos para mejorar la calidad del agua en áreas cercanas a sus comunidades, como el río Moche. En esta región, se han identificado niveles elevados de metales pesados debido a la actividad minera y otras acciones humanas. El propósito de este libro fue analizar el proceso de quelación utilizando EDTA y citrato de magnesio como agentes quelantes en las aguas del río Moche, en la ciudad de Trujillo, centrándose en los metales pesados plomo y zinc.

Palabras Clave: remoción; quelación; metales pesados; EDTA; citrato.

Abstract

Water is essential for humans, as it plays a crucial role in organic processes such as food digestion, nutrient absorption, and waste elimination. In Peru, most of the population cannot access treatment to improve water quality in areas close to their communities, such as the Moche River. In this region, elevated levels of heavy metals have been identified due to mining activity and other human actions. The purpose of this book was to analyze the chelation process using EDTA and magnesium citrate as chelating agents in the waters of the Moche river, in the city of Trujillo, focusing on the heavy metals lead and zinc.

Keywords: removal; chelation; heavy metals; EDTA; citrate.

Resumo

A água é essencial para os seres humanos, pois desempenha um papel fundamental nos processos orgânicos, como a digestão dos alimentos, a absorção de nutrientes e a eliminação de resíduos. No Peru, a maioria da população não tem acesso a tratamento para melhorar a qualidade da água em áreas próximas às suas comunidades, como o rio Moche. Nessa região, foram identificados níveis elevados de metais pesados devido à mineração e a outras ações humanas. O objetivo deste livro foi analisar o processo de quelação usando EDTA e citrato de magnésio como agentes quelantes nas águas do rio Moche, na cidade de Trujillo, com foco nos metais pesados chumbo e zinco.

Palavras-chave: remoção; quelação; metais pesados; EDTA; citrato.

Contenido

[Peer Review]	6
Sobre los autores/ About the authors	8
Resumen	10
Abstract	10
Resumo	11
Capítulo 1	18
Introducción	18
Investigaciones realizadas a nivel internacional	21
Investigaciones realizadas a nivel nacional	24
Capítulo 2	29
Fundamentos teóricos	29
Origen e importancia de los ríos	30
La Cuenca del río Moche	30
Ubicación Política	31
Ubicación Geográfica	31
Precipitación	32
Caudal	33
Temperatura	33
Hidrografía de la Cuenca	34
Compuestos de Coordinación	36
El Enlace de Coordinación	38
Los Ligandos	39
Ligandos Monodentados	39
Ligandos Bidentados	40
Quelatos	40
Quelación	45
Constante de Estabilidad	47
Espectroscopía	49
Espectroscopía de Absorción Atómica	50
Intensidad de Luz Absorbida átomo	51
Espectrofotometría UV-visible	52
Aplicación Edáfica	53
Capítulo 3	56
Métodos experimentales	56
Quelación con ion etilendiaminotetraacético	58
Quelación con ion citrato	59
Muestreo Aleatorio Simple:	61
Espectroscopía Absorción atómica	62
Espectrofotometría UV-Visible	62
Procedimiento	62
Caracterización de muestras de agua recolectadas	62

Acondicionamiento de las muestras	63
Preparación de soluciones EDTA (5%, 15%, 20% y 30%)	63
Preparación de soluciones de Citrato-Mg (5%, 15%, 20% y 30%)	63
Preparación de muestras patrón	64
Aplicación de soluciones de EDTA a diferentes concentraciones	64
Aplicación de soluciones de citrato de magnesio a diferentes concentraciones	64
Diseño Experimental	65
Matriz de Diseño	65
Variables y Niveles	66

Capítulo 4 **68**

Análisis experimentales	68
Caracterizar las muestras de agua	69
Preparación de soluciones EDTA y Citrato de magnesio	71
Formación de quelatos con EDTA	72
Quelato plomo-EDTA en muestra tratada con 300 ml de NaOH 0,1 N en solución de agua	73
Quelato plomo-EDTA en muestra tratada con 200 ml de NaOH 0,1 N en solución de agua	75
Quelato zinc-EDTA en muestra tratada con 300 ml de NaOH 0,1 N en solución de agua	77
Quelato zinc-EDTA en muestra tratada con 200 ml de NaOH 0,1 N en solución de agua	78
Formación de quelatos con Citrato de magnesio	79
Quelato de plomo-Citrato en muestra tratada con 300 ml de NaOH 0,1 N en solución de agua	80
Quelato de plomo-Citrato en muestra tratada con 200 ml de NaOH 0,1 N en solución de agua	82
Quelato de zinc-Citrato en muestra tratada con 200 ml de NaOH 0,1 N en solución de agua	84
Comparación del porcentaje de estabilización	86
Efectividad de la estabilización de iones metálicos de Pb^{2+} y Zn^{2+}	86
Eficiencia de %Quelación para iones metálicos de Pb^{2+} y Zn^{2+}	87
Eficiencia entre quelatos de Pb^{2+} y Zn^{2+} con EDTA y Citrato	89
Análisis Estadístico	90
Recomendaciones	96

Referencias **97**

Tablas

Tabla 1. Valor máximo, mínimo y promedio de la composición química del lixiviado del lodo	22
Tabla 2. Comparación de los resultados de la presente investigación con los ECA para Agua del MINAM	25
Tabla 3. Ligandos más frecuentes empleados	42
Tabla 4. Ligandos quelato más utilizados	44
Tabla 6. Cuadro comparativo de concentración de metales y los ECAS	70
Tabla 7. Variaciones porcentuales de la concentración de plomo y zinc	71
Tabla 8. Características de las soluciones de EDTA y Citrato de magnesio	72
Figura 22. Remoción de plomo por adición de Citrato para una muestra tratada con 300 ml NaOH 0,1 N	80
Tabla 9. Variación entre las constantes de estabilidad de iones metálicos	86
Tabla 10. Variación del Porcentaje de Quelación promedio de plomo-Quelatos	87
Tabla 11. Variación del Porcentaje de Quelación promedio de zinc-Quelatos	88
Tabla 12. Eficiencia entre quelatos de plomo y zinc con EDTA y Citrato	89

Figuras

Figura 1. Mapa de Ubicación Geográfica de la Cuenca del río Moche	32
Figura 2. Mapa de Ubicación Hidrográfica de la Cuenca del río Moche	35
Figura 3. Localidades con vertimiento de aguas residuales en la Cuenca del río Moche	36
Figura 4. Ejemplos de la estructura de un complejo de coordinación	37
Figura 5 A) Compuestos de coordinación M-quelato, B) Representación esquemática del complejo $[\text{Co}(\text{en})_3]^{2+}$	41
Figura 6. Representación de la formación del quelato	47
Figura 7. Espectro continuo, líneas de emisión y absorción	49
Figura 8. Partes constitutivas de un equipo de absorción atómica	51
Figura 9. Cubeta de un espectrofotómetro	53
Figura 10. Aplicación Edáfica	54
Figura 11. Base conjugada del ácido EDTA: ion etilendiaminotetraacético	58
Figura 12. Base conjugada del ácido cítrico: ion citrato	60
Figura 13. Diagrama de pretest y postest	65
Tabla 5. Niveles de variables de estudio	66
Figura 14. Remoción de plomo por adición de EDTA para una muestra tratada con 300 ml NaOH 0,1 N	73

Figura 15. Porcentaje de Quelación de plomo por adición de EDTA para una muestra tratada con 300 ml NaOH 0,1 N	74
Figura 16. Remoción de plomo por adición de EDTA para una muestra tratada con 200 ml NaOH 0,1 N	75
Figura 17. Porcentaje de Quelación de plomo por adición de EDTA para una muestra tratada con 200 ml NaOH 0,1 N	76
Figura 18. Remoción de zinc por adición de EDTA para una muestra tratada con 300 ml NaOH 0,1 N	77
Figura 19. Porcentaje de Quelación de zinc por adición de EDTA para una muestra tratada con 300 ml NaOH 0,1 N	77
Figura 20. Remoción de zinc por adición de EDTA para una muestra tratada con 200 ml NaOH 0,1 N	78
Figura 21. Porcentaje de Remoción de zinc por adición de EDTA para una muestra tratada con 200 ml NaOH 0,1 N	79
Figura 23. Porcentaje de Quelación de plomo por adición de Citrato para una muestra tratada con 300 ml NaOH 0,1 N	81
Figura 24. Remoción de plomo por adición de Citrato para una muestra tratada con 200 ml NaOH 0,1 N	82
Figura 25. Porcentaje de Remoción de plomo por adición de Citrato para una muestra tratada con 200 ml NaOH 0,1 N	82
Figura 26. Remoción de zinc por adición de Citrato para una muestra tratada con 300 ml NaOH 0,1 N	83
Figura 27. Porcentaje de Remoción de zinc por adición de Citrato para una muestra tratada con 300 ml NaOH 0,1 N	84
Figura 28. Remoción de zinc por adición de Citrato para una muestra tratada con 200 ml NaOH 0,1 N	84
Figura 29. Porcentaje de Remoción de zinc por adición de Citrato para una muestra tratada con 200 ml NaOH 0,1 N	85
Figura 30. Concentración de ion plomo	90
Figura 31. Concentración de ion zinc	90
Figura 32. Porcentaje de Quelación de ion plomo	91
Figura 33. Porcentaje de Quelación de ion zinc	92

Metales pesados en el agua

Contaminación por actividad minera y
reducción de plomo y zinc en río

Capítulo 1

Introducción

Por muchos años las aguas de los ríos han sido sinónimo de desarrollo y progreso, las grandes culturas como Egipto se desarrolló en base al río Nilo. En el Perú, ciudades como Lima, Piura, Trujillo, entre otras, su desarrollo económico está vinculado a los ríos cercanos a ellas. En el transcurrir de los años la actividad económica, industrial y comercial de los pueblos han generado contaminación en sus aguas, que muchas veces ha ocasionado la pérdida de la diversidad ictiológica y lejos contribuir a la salud y bienestar del medio ambiente se convierte en fuente de contaminación y malestar en la población.

Existen diversos estudios que han tratado de caracterizar el nivel de contaminación en el agua de la cuenca del río Moche, por ejemplo, la Autoridad Administrativa del Agua, Sector Huarney-Chicama, que en sus informes de 32 puntos de muestreo reportaron concentraciones por encima de los valores establecidos en los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Aguas para metales como el plomo, cadmio, zinc, aluminio, manganeso, hierro, arsénico, cobre y sulfatos. El monitoreo también reportó la presencia de coliformes termotolerantes, potencial de hidrógeno (pH), elevado e incremento de acidez. En la acequia del río Moche existen diversas fuentes de contaminación debido a la presencia de industrias y ciudades. La actividad minera tiene una alta incidencia en la contaminación si no se desarrollan tratamientos a sus efluentes y relaves. Desde el año 2017, la minería informal e ilegal viene desarrollando actividades en la zona de Quiruvilca, lugar donde la empresa Minera Quiruvilca S.A., operaba. Esta forma de explotación no permite desarrollar actividades amigables al

medio ambiente como es el manejo responsable del movimiento de tierras y el tratamiento adecuado de los relaves provenientes de las pozas de cianuración. Estos hechos ponen en riesgo la calidad de las aguas del río Moche debido a que están expuestos a las condiciones meteorológicas del ambiente, las lluvias generan escorrentía que pueden infiltrarse y en el peor de los casos pueden llegar a un cuerpo de agua (INDECI, 2021).

El agua es de fundamental importancia para el ser humano, ya que es esencial para el desarrollo de procesos orgánicos como la digestión de alimentos que ingerimos, así como la asimilación de nutrientes y la eliminación de desechos. Sin embargo, para el consumo seguro de esta sustancia es necesario aplicar un tratamiento previo, ya que las fuentes naturales de donde se obtiene agua mayormente contienen contaminantes ya sea por acción de la naturaleza como por ejemplo erosiones volcánicas o por intervención del ser humano como los desechos industriales o la deforestación. En el Perú, la realidad actual en la que viven la mayoría de poblaciones, impide aplicar un tratamiento previo a las aguas naturales aledañas a la zona donde viven como es el caso del río Moche, donde existe presencia de metales pesados debido a la minería y otras actividades antropogénicas tal como lo reporta SEDALIB S.A que en su informe de monitoreo detectó un total de 61 fuentes de contaminación; de las cuales 49 (79%), correspondían a vertimientos de aguas residuales domésticas; 7 (11%), a botaderos de residuos sólidos; 3 (5%), a vertimientos de origen minero, 1 (2%), a vertimientos de origen hospitalario y 1 (2%), a vertimientos de origen industrial (SEDALIB S.A., 2018).

Con todo lo mencionado, la contaminación a causa de los metales pesados en el río Moche es en gran medida debida a la minería informal, generando cambios notorios en las características fisicoquímicas como el pH del agua del río y además se observa como estos metales pesados, afectan el color, la turbidez y el olor del agua que afecta a la salud de las poblaciones cercanas al río Moche y a las actividades que realizan como la agricultura, ganadería y gastronomía.

Ante la problemática de la contaminación de los cuerpos de agua, se han realizado diversos estudios de caracterización y de propuestas para regular el uso y disposición final de las aguas provenientes de las actividades productivas. A continuación, se presenta investigaciones realizadas por autores internacionales y nacionales.

Investigaciones realizadas a nivel internacional

Pérez et al. (2017), evaluaron a un total de seis alternativas de agentes solidificantes para el proceso de estabilización/solidificación que fue aplicado a lodos químicos generados como efluentes de la producción de cartón corrugado; y siendo la alternativa número seis que consistió en una mezcla cemento-(turba-silicato de sodio-lodo), con una relación lodo-cemento de 2:1 la que logró reducir los niveles de plomo en el lixiviado desde 42 mg/L hasta 0,45 mg/L, es decir un 98,9% de disminución en la concentración de plomo. A continuación, en la siguiente tabla se observa el resumen sus resultados respecto a la composición química del lixiviado del lodo:

Tabla 1. Valor máximo, mínimo y promedio de la composición química del lixiviado del lodo

Muestra	Concentración (mg/L)			
	Valor mínimo	Valor máximo	Valor promedio*	Máxima permisible**
Cromo	0,10	0,25	0,14	1,00
Cobre	0,077	0,9	0,23	10,00
Plomo	0,45	42	11,46	5,00
Zinc	0,015	2,8	0,86	10,00

Nota. Tomado de Pérez et al., 2017.

* Cuando la muestra presenta un valor por debajo del límite detectado por el equipo, se asumió este como valor de la variable.

** Exigida por el M.A.R.N.R. (“Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables”), Caracas-Venezuela.

En otra investigación realizada por Tapia Yépez (2017), afirmó que el EDTA (ácido etilendiaminotetraacético), como agente quelante es adecuado para inertizar metales pesados como el hierro, cobre, zinc, níquel y plomo en condiciones óptimas de pH básico, así atrapando de manera más estable al metal por diferencia de cargas formando un complejo estable. Cuando realizó su metodología experimental en las muestras de sedimento de la laguna de Limoncocha (provincia de Sucumbíos – Ecuador), reportó concentraciones significantes de zinc y plomo. En espectroscopia de absorción atómica de llama para el Zn^{2+} se encontró 1,891 ppm y se logró quelar el 48,64%, para Pb^{2+} se encontró 8.6 ppm y se logró quelar el 98,25%. En espectrofotometría de luz visible para el Zn^{2+} se encontró 0,32 ppm y se queló el 100% de la concentración inicial

del metal presente. Para el Pb^{2+} se encontró 4.7 ppm reduciendo su concentración en un 61.70% por quelación.

Ventura et al. (2021), enfocaron su investigación hacia la fauna de la laguna Carmen (Estado de Tabasco – México), siendo más preciso a una especie que pertenece a la clase bivalvos de moluscos llamada ostión *Crassostrea virginica*, ya que el deterioro de las pesquerías del ostión fue debido a la contaminación ambiental, antropogénica y a la aparición de metales pesados como cadmio zinc y plomo, que ocasionan daños perjudiciales a la economía y la salud de los pobladores ribereños. En sus pruebas por el método de espectrometría de absorción atómica aplicadas a 50 ostiones colectados por buceo para medir las concentraciones de metales pesados, los resultados referentes a los tres metales pesados reportaron lo siguiente, el rango de concentración del plomo fue de 8,96 – 9,90 $\mu\text{g/g}$, el rango de concentración del cadmio fue de 8,66 – 9,68 $\mu\text{g/g}$ y el rango de concentración del zinc fue de 372,32 a 478,35 $\mu\text{g/g}$; referente a las concentraciones de cadmio y plomo fueron mayores a los límites máximos permisibles en bivalvos de consumo, siendo de 1 ppm para el plomo y 0.5 ppm para el cadmio según las normas oficiales mexicanas (NOM-001-ECOL-1993 y NOM-027-SSA-1993), por lo cual, consideró que los ostiones *Crassostrea virginica* de la laguna Carmen pueden presentar un riesgo para la salud humana si se consume crudo.

Investigaciones realizadas a nivel nacional

Rivera (2021), estudia el contenido de metales presentes en las aguas de la laguna Patón, encontrando arsénico (0,0161 ppm), y zinc (0,0147 ppm), en concentraciones menores al ECA para agua y plomo (0,0094 ppm), en concentración superior a lo permitido; explicando también que dichos valores se deben a los contaminantes de las aguas residuales que resultan provenientes de la actividad minera y a las formaciones geológicas de la provincia de Oyón – Lima.

En otra investigación realizada por Huaranga et al. (2012), en zonas de la cuenca alta y baja del río Moche por el período de 1980, se comparó la concentración de metales pesados en el agua y los márgenes del río Moche. De dicha investigación obtuvieron resultados elevados en comparación a los valores de los Estándares de Calidad para Aguas establecido por el MINAM. Con respecto a los metales en cultivos, el hierro (0,6525 ppm), fue el de mayor concentración que apareció en la yuca (*Manihot esculentus*). La conclusión final a la que llegaron fue que la mayor contaminación a nivel del análisis de agua se presentó en la cuenca alta. En la siguiente tabla comparativa podemos observar los resultados de sus análisis:

Tabla 2. Comparación de los resultados de la presente investigación con los ECA para Agua del MINAM

	Investigación de Huaranga et al. (2012)		ECA para Agua		
	Concen- tración en Cuenca Alta (ppm)	Concen- tración en Cuenca Baja (ppm)	Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento avanzado (ppm)	Aguas para riego restrin- gido y no restringido (ppm)	Ríos de Costa y Sierra (ppm)
Hierro	557,700	83,400	5	5	*
Plomo	100,375	0,820	0,05	0,05	0,0025
Cadmio	4,550	0,012	0,01	0,01	0,00025
Cobre	6,900	1,240	2	0,2	0,1
Zinc	262,900	0,380	5	2	0,12
Arsénico	9,000	0,016	0,15	0,1	0,15

Nota. Datos tomados de Huaranga et al., 2012.

2017, Diario Oficial El Peruano.

* Parámetro no aplica para esta categoría.

Cerna et al. (2019), en este estudio demostró el impacto de la contaminación del agua del río Moche en la agricultura y las enfermedades en los pobladores del distrito rural de Moche, Trujillo. Reportaron la existencia de niveles altos de relaves mineros (48,2%), por la presencia de cadmio, mercurio, arsénico y plomo; un nivel alto de productos químicos (63,2%), como existencia de compuestos de cobre, hierro, mercurio, zinc, plomo, cadmio, existencia de ácido nítrico, clorhídrico, sulfúrico. Por la prueba de correlación “r” de rho spearman se determinó que la contaminación del río Moche influye significativamente ($p < 0,01$), en la abiota y las enfermedades

de los habitantes de la zona rural del distrito de Moche, cuyos valores generales son: $r=0,296$ (Correlación positiva baja) y $r^2=0,0876$. Además, existe relación significativa ($p<0,05$) entre relaves mineros con enfermedades ($r=0,135$); de los pobladores de la zona rural del distrito de Moche.

Con los estudios mencionados se hace la siguiente pregunta

¿Cómo se estabilizarán los elementos metálicos de plomo y zinc contenido en las aguas del río Moche para su aplicación edáfica?

La respuesta a la pregunta es la siguiente:

Aplicando el método de la quelación se conseguirá estabilizar elementos metálicos de plomo y zinc contenidos en las aguas del río Moche para su aplicación edáfica.

Con la pregunta y respuesta planteadas, se establecen los siguientes objetivos de estudio:

- Estabilizar elementos metálicos plomo y zinc contenidos en las aguas del río Moche por el método de quelación.
- Caracterizar el contenido de elementos metálicos de las aguas del río Moche.
- Preparar soluciones de EDTA y Citrato de magnesio a diferentes concentraciones.

- Aplicar las soluciones del ligando etilendiaminotetraacético (EDTA) para formar quelatos plomo-EDTA y zinc-EDTA.
- Aplicar las soluciones del ligando citrato de magnesio para formar quelatos plomo-Citrato y zinc-Citrato.
- Comparar el porcentaje de quelación entre los ligandos EDTA y Citrato.

Capítulo 2

Fundamentos teóricos

Origen e importancia de los ríos

Los ríos se han formado a consecuencia de la erosión de las aguas procedente de las lluvias que discurren en la superficie terrestre. En las zonas altas, debido a la pendiente pronunciada la erosión es mayor y con el transcurrir del tiempo han ido formando causes profundos denominados quebradas. Por lo general, las aguas de los ríos desembocan en el mar; un ejemplo de ello es el río Moche (Marrero Levi, 1981).

Desde tiempos históricos se ha observado como las comunicaciones a través de los ríos han contribuido al establecimiento de poblaciones en los valles y las cuencas, un claro ejemplo son las provincias y distritos como es el caso de Otuzco con la cuenca del río Moche. Las aguas de ríos contribuyen a la alimentación humana al ser utilizadas para la irrigación de suelos cultivados desde el comienzo de la civilización (Marrero Levi, 1981).

La Cuenca del río Moche

Por la variabilidad del caudal del río según la estación del año, se clasifica como río estacional que alcanza caudales máximos en los meses de enero a marzo. Está localizado en el margen izquierdo de la Cordillera Occidental de los Andes, departamento de La Libertad – Perú, que constituye la línea divisoria de las aguas entre la cuenca de este río y del río Marañón con puntos altos sobre 4 000 m s. n. m (ONERN, 1973). Por la diversidad de los pisos altitudinales que

atraviesa desde la Laguna Grande (Provincia de Quiruvilca), hasta su desembocadura en el Océano Pacífico (Provincia de Trujillo), la cuenca se divide en alta, media y baja.

Ubicación Política

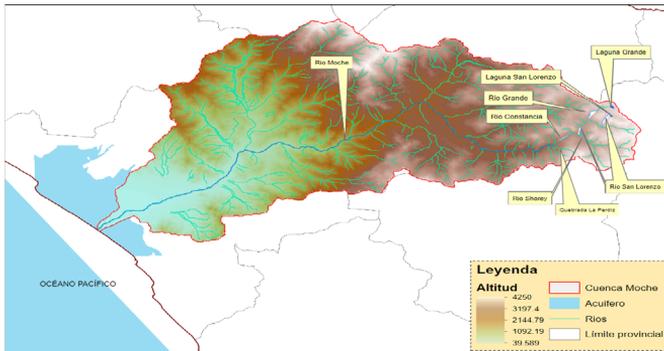
La cuenca del río Moche, políticamente está ubicada en el departamento de La Libertad y abarca 4 provincias (Julcán, Otuzco, Trujillo y Santiago de Chuco) y 22 distritos (SEDALIB S.A, 2018).

Ubicación Geográfica

El área total de la cuenca del río Moche es de 2 708 km², tiene un perímetro de 264,285 km y un ancho aproximado de 25 km. La cuenca húmeda se encuentra a más de 1 500 m s. n. m. y tiene una superficie de 1 418 km², lo que representa el 52% del área total de la cuenca, por lo que atribuye significativamente a la escorrentía superficial. La unión entre los ríos Shorey y San Lorenzo forman un nuevo río llamado Constancia, este río cambia el nombre a la altura de la quebrada Perdiz y se convierte en el río Moche (SEDALIB S.A., 2018).

El río Moche tiene una longitud de 102 km, posee una forma sinuosa y su nacimiento es en la laguna Grande, la cual se halla ubicada próxima a la localidad de Quiruvilca, a una altura aproximada de 3 898 m s. n. m. Las coordenadas de sus extremos comprenden los paralelos 7° 46' y 8° 15' de Latitud Sur y los meridianos 78° 16' y 79° 08' de Longitud Oeste de Greenwich (ONERN, 1973).

Figura 1. Mapa de Ubicación Geográfica de la Cuenca del río Moche



Nota. Se observa el nacimiento del río Moche desde el río Grande y el río Constanza. Adaptado de SEDALIB S.A, 2018.

En un reporte realizado por el Servicio de Agua Potable y Alcantarillado SEDALIB S.A en 2018 reportó la siguiente información en cuanto a propiedades físicas del río Moche:

Precipitación

La región se divide en dos sectores según la cantidad de las lluvias. La “cuenca húmeda” que se ubica en un área de escorrentía superficial al caudal de los ríos con límites superiores de 1 700 m s. n. m. y con precipitaciones que oscilan entre los 250 y 1 200 mm (milímetros de lluvia). Otra es la “cuenca seca” que se define con el espacio entre el mar y la costa de 1 700 m s. n. m. y con una precipitación anual menor a los 250 mm que resulta por la falta de una escorrentía superficial y en consecuencia un nulo aporte al caudal de los ríos (SEDALIB S.A, 2018).

Caudal

La mayoría de los ríos de la Costa del Perú como el caso del río Moche, presentan notorias diferencias en sus descargas; así por ejemplo el caudal máximo instantáneo medido fue de 53,02 m³/s, y en promedio es de 4,97 m³/s que equivale a un volumen medio anual de 154,587 millones de metros cúbicos (MMC) (SEDALIB S.A, 2018).

El estudio de ONERN (Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales), realizado entre 1931-1970, identificó tres períodos característicos dentro del ciclo anual, período de avenidas, período de estiaje y un período transicional entre avenidas y estiaje. Los resultados del análisis han permitido determinar que el río Moche drena el 74% de su cauda anual entre los meses de enero y mayo; y el 15% durante los meses de invierno. El 11% restante del volumen de agua anual corresponde al período de transición, lo que significa que el resto del año tiene un caudal promedio anual de 84 MMC debido a que en estos meses se descargan grandes volúmenes de agua (SEDALIB S.A, 2018).

Temperatura

La temperatura tiene un amplio rango de valores desde un promedio anual de 6 °C hasta los 20 °C (semicálido). El desplazamiento de la tierra hacia el interior hasta los 8 000 m s. n. m. causa que las temperaturas aumenten, pero a partir de ese nivel

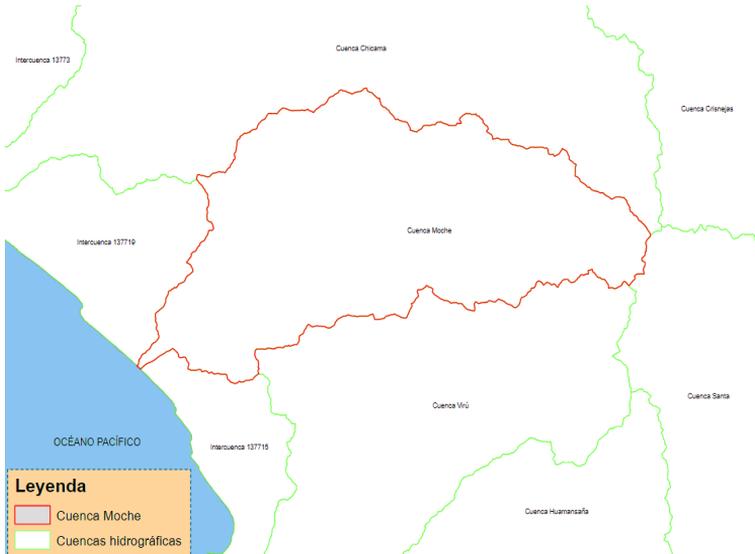
empieza a disminuir. La temperatura media anual en la zona del valle es de 19,5 °C, la más alta es en verano con 22,7 °C y la más baja en julio con 17 °C (SEDALIB S.A, 2018).

En el sector de los 1 800 y 2 800 m s. n. m. se reportó temperaturas que oscilan los 14 °C. La temperatura media entre los 2 800 y 3 700 m s. n. m. alcanza los 10 °C, mientras que en el área de los 3 700 y 4 200 m s. n. m. la temperatura promedio es de 8 °C, solo crecen pastos o gramíneas de forma natural (SEDALIB S.A, 2018).

Hidrografía de la Cuenca

En general, la cuenca tiene una forma alargada que va ampliando su ancho a medida que el río se aproxima a su desembocadura en el Océano Pacífico. En promedio, sus magnitudes son 25 km de ancho y 96 km de largo, la dirección de la corriente de la cuenca sigue un sentido longitudinal correspondiente a la línea de cumbres descendentes que la separa de las cuencas de los ríos Chicama (Norte), Virú (Sur), Santa (Este), y al Oeste con el Océano Pacífico (ONERN, 1973).

Figura 2. Mapa de Ubicación Hidrográfica de la Cuenca del río Moche



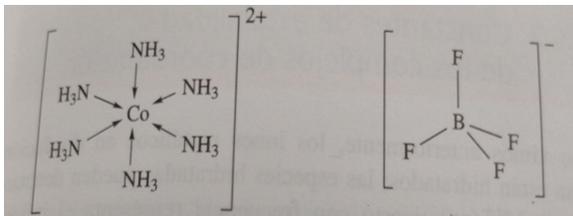
Nota. Como se observa en la leyenda la figura están delimitadas las cuencas Chicama (Norte), Virú (Sur), Santa (Este) y el Océano Pacífico (Oeste). Adaptado de SEDALIB S.A, 2018.

Los afluentes principales a la cuenca del río Moche se encuentran ubicados a la margen derecha e izquierda de la misma. Los ríos o quebradas Chota (98 km²), Motil (82 km²), Otuzco (184 km²), Catuay (106 km²) y Cumbray (496 km²), son correspondientes al borde derecho de la cuenca, mientras que al margen izquierdo corresponde el río Chanchacap (122 km²) (ONERN, 1973). Cada uno de estos ríos poseen localidades cercanas, las cuales tienen propagación de aguas residuales en la cuenca del río Moche.



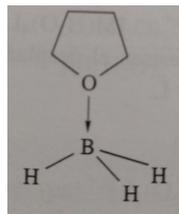
En la figura 4 se observa la estructura de los complejos de coordinación en las reacciones anteriormente mencionadas. En un complejo de coordinación, el átomo central está coordinado por una o más moléculas o iones (ligandos), que actúan como bases de Lewis y forman el enlace de coordinación con el ion central (Housecroft & Sharpe, 2006).

Figura 4. Ejemplos de la estructura de un complejo de coordinación



(A)

(B)



(C)

Nota. La línea se usa para denotar la interacción entre un ligando aniónico y el aceptor; la flecha es para mostrar la cesión de un par de electrones de un ligando neutro a un aceptor. Adaptado del capítulo

6: Complejos de coordinación: una introducción del libro: Química Inorgánica (p. 179), por Housecroft & Sharpe, 2006. Pearson Educación, S.A.

El Enlace de Coordinación

La manera más precisa de entender al enlace que se forma en un complejo de coordinación es la ya conocida reacción ácido-base de Lewis, cuando una base de Lewis dona un par de electrones a un ácido de Lewis, se forma un enlace coordinado y la especie resultante es un aducto. Si observamos la reacción 2.3.3, el compuesto de coordinación formado, $\overline{\text{H}_3\text{B} \cdot \text{THF}} \overline{\text{H}_3\text{B} \cdot \text{THF}}$, el punto central indica la formación de un aducto (Housecroft & Sharpe, 2006).

En la figura 4B, representa el complejo $\overline{[\text{BF}_4]^-} \overline{[\text{BF}_4]^-}$ formado en la reacción 2.3.2. El enlace $\overline{\text{F} - \text{B}} \overline{\text{F} - \text{B}}$ es similar a los tres enlaces $\overline{\text{B} - \text{F}} \overline{\text{B} - \text{F}}$; lo que significa que todos son enlaces covalentes. Sin embargo, como observamos en las otras estructuras de las figuras 4A y 4C, el enlace coordinado entre el átomo central y un ligando neutro es denotado por una flecha, pero en el caso de que el ligando sea aniónico, el enlace coordinado se indica con una línea. Aunque este arreglo se suele ignorar (Housecroft & Sharpe, 2006).

Definido lo que es un compuesto de coordinación y el enlace de coordinación, lo siguiente que debe mencionarse es los distintos ligandos que pueden formar un complejo coordinado y López Peinado et al. (2020), en el libro “Introducción a los compuestos de coordinación y organometálicos”, proporciona información acerca

de los ligandos y sus tipos, dentro de ellos menciona a los ligandos quelatos y cuáles son los más utilizados. Por lo tanto, tenemos:

Los Ligandos

Se denomina ligandos o ligantes a las moléculas o iones alrededor de un metal en un ion complejo, y a las interacciones de ambos se pueden explicar mediante reacciones ácido-base de Lewis; los ligandos pueden considerarse como moléculas que donar uno o más pares de electrones para actuar como una base de Lewis. Por consiguiente, los ligandos disponen de al menos un par de electrones de valencia libres (López Peinado et al., 2020).

Existen muchos criterios para la clasificación de los ligandos, el más utilizado o conocido es aquel que hace referencia al número de pares de electrones que cede o done el ligando; en consecuencia, pueden ser ligandos monodentados, bidentados y quelatos (López Peinado et al., 2020).

Ligandos Monodentados

Estos ligandos son los que ocupan una única posición de coordinación del metal, en general, iones monovalentes o moléculas neutras.

Iones monovalentes: F^- , Cl^- , Br^- , I^- , CN^- , SCN^- , OH^- , NO_3^- , NO_2^- , etc.

Moléculas neutras: H_2O , NH_3 , SO_2 , NO_2 , CO , N_2 , O_2 , alcoholes, aminas, fosfinas, etc. (López Peinado et al., 2020).

Ligandos Bidentados

Son ligandos que tienen dos pares de electrones ocupando dos posiciones de coordinación del metal, suelen ser iones bivalentes, aunque en algunos casos estos iones pueden ocupar solo un posicionamiento de coordinación.

Iones bivalentes: SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , $^-\text{O}_2\text{C-CO}_2^-$, etc.

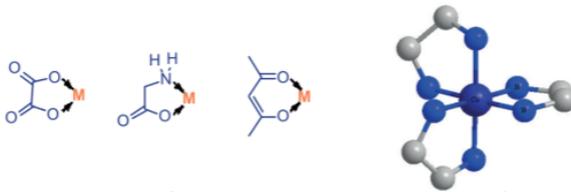
Quelatos

Los ligandos polidentados son aquellos que pueden ceder más de un par de electrones y pueden conducir a la llamada quelación para formar a lo que se denomina como “quelato”, término que en griego se conoce como garra o uña. En los quelatos, los ligandos polidentados forman un anillo que incluye el átomo metálico central. Cuando el anillo presenta cinco o seis miembros da lugar a quelatos más estables. La figura 5 muestra esquemáticamente el complejo $[\text{Co}(\text{en})_3]^{2+}$, donde tres ligandos etilendiamina bidentados están unidos al átomo central (Co) a través de pares de electrones libres de dos grupos amina, formando tres anillos de cinco miembros. El complejo presenta geometría octaédrica con una carga neta de +2 (López Peinado et al., 2020).

En las tablas 4 y 5, se muestran ligandos más empleados y están clasificados de acuerdo a si son especies iónicas o no y algunos ligandos quelatos, respectivamente.

Figura 5

A) Compuestos de coordinación M-quelato, B) Representación esquemática del complejo $[\text{Co}(\text{en})_3]^{2+}$



(A) (B)

Nota. En el gráfico 5B se presentan tres ligandos que forman quelatos. Adaptado del capítulo 1: Introducción a los compuestos de coordinación del libro: Introducción a los compuestos de coordinación y organometálicos (p. 25), por López Peinado et al., 2020. Universidad Nacional de Educación a Distancia.

En consecuencia, existen ligandos monovalentes, que son monodentados, bivalentes, que pueden ser monodentados o bidentados, ligandos neutros monodentados y finalmente ligandos puentes, que actúan como vía de enlace entre dos centros metálicos de un complejo de coordinación, por lo tanto, siempre son polidentados. Se debe señalar que algunos ligandos pueden funcionar como monodentados o bidentados (López Peinado et al., 2020).

La tabla 3 muestra a los ligandos más frecuentes. Sin embargo,

existe un caso especial denominado ligandos ambidentados, son aquellos que se coordinan al átomo central (un metal por lo general) a través de átomos diferentes. Un ejemplo es el caso del ion $\overline{\text{NO}_2}$ $\overline{\text{NO}_2}$ que se coordina por el átomo de oxígeno o el nitrógeno, en función de la posición de coordinación al metal recibe su nombre:

Coordinación a través del O: $\overline{\text{ONO}}$ ligando **Nitrito**,

Coordinación a través del N: $\overline{\text{NO}_2}$ ligando **Nitro**.

Otro ejemplo, es el caso del $\overline{\text{SCN}}$ $\overline{\text{SCN}}$ y $\overline{\text{NCS}}$ $\overline{\text{NCS}}$, cuando la posición de coordinación al metal es por medio del S (azufre) es llamado S-tiocianato o tiocianato y cuando se coordina por el N (nitrógeno) es nombrado N-tiocianato o isotiocianato.

Tabla 3. Ligandos más frecuentes empleados

Ligando	Nombre	Tipo
Ligandos neutros		
H ₂ O	Acuo	Monodentado
NH ₃	Amino	Monodentado
PPh ₃	Trifenilfosfina	Monodentado
N ₂	Dinitrógeno	Monodentado
O ₂	Dioxígeno	Monodentado
NO	Nitrosilo	Monodentado
CH ₂ =CH ₂	Etileno	Monodentado
NH ₂ CH ₂ CH ₂ NH ₂	Etilendiamina	Bidentado
Ligandos monovalentes		
F-	Fluoro	Monodentado
Cl-	Cloro	Monodentado
Br-	Bromo	Monodentado

Ligando	Nombre	Tipo
I-	Yodo	Monodentado
C5H5-	Ciclopentadienilo	Pentadentado
Ligandos bivalentes*		
CO32-	Carbonato	
NO3-	Nitrato	
SO32-	Sulfito	
S2O32-	Tiosulfato	
C6H8O4N24-	EDTA1	Hexadentado
Ligandos puente		
SO42-	Sulfato	
CO	Carbonilo	
O2-	Oxo	
OH	Hidroxio	
NH2-	Amido	
CN-	Ciano	
SCN-**	Tiocianato	
NO2-**	Nitro	

Nota. Tomado de Introducción a los compuestos de coordinación y organometálicos (p. 26), por López Peinado et al., 2020, Universidad Nacional de Educación a Distancia.

* En algunas ocasiones estos iones pueden ocupar una sola posición de coordinación comportándose como ligandos bivalentes monodentados.

** Ligando ambidentado.

1 El ligando etilendiaminotetraacético, EDTA, tiene por fórmula:
 $(-OOC-CH_2)_2(NCH_2CH_2N)(CH_2COO-)_2$

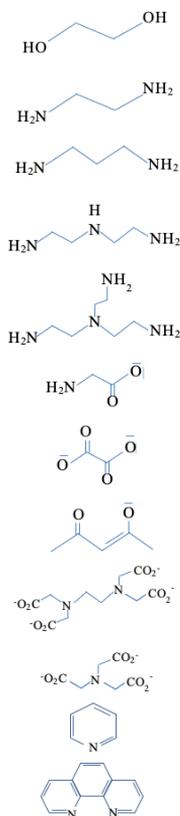


Tabla 4. Ligandos quelato más utilizados

Nombre	Tipo
Etilenglicol	Bidentado
Etilendiamina (en)	Bidentado
Propilendiamina (pn)	Bidentado
Dietilentriamina (dien)	Tridentado
Trietilentetraamina (trien)	Tetradentado
Ion glicinato	Bidentado
Ion oxalato (ox)	Bidentado
Ion acetilacetato (acac)	Bidentado

Nombre	Tipo
Ion etilendiaminotetraacético (EDTA)	Hexadentado
Ion amíntriacetato (NTA)	Tetradentado
Piridina (py)*	Monodentado
Fenantrolina (fen)	Bidentado

Nota. Tomado de Introducción a los compuestos de coordinación y organometálicos (p. 27), por López Peinado et al., 2020. Universidad Nacional de Educación a Distancia.

* No es un quelato; es un heterociclo nitrogenado que frecuentemente forma complejos de coordinación.

La piridina, aunque no es un quelato, se trata de un ligando monodentado que puede formar complejos de coordinación (López Peinado et al., 2020).

En los complejos con quelatos, el ligando orgánico se coordina con el metal central por medio de los pares electrones sin compartir del ligando con carga negativa (ligando aniónico); este es el caso de la etilendiamina, este ligando se coordina con el metal por los pares de electrones de los dos átomos N (nitrógeno) de los grupos amino. Otro caso, es el ligando EDTA, que se coordina por medio de los pares de electrones de los átomos de nitrógeno y también por los del oxígeno, dando carga negativa en los grupos carboxilato.

Quelación

La quelación se define como un tipo de reacción química que da lugar a la configuración de complejos de iones metálicos en

presencia de agentes químicos (ligandos) que producen precipitados en soluciones acuosas. Las reacciones de este tipo, se asocian al término “secuestración”, ya que son parte de un proceso en el cual se desea promover o inhibir las reacciones producidas por un ion metálico que ocurren de manera independiente a las reacciones de coordinación, o para alterar el efecto de los iones metálicos sobre la estabilidad del producto o componente. Por ejemplo, el hierro que pueden asimilar las plantas es el Fe^{2+} (ferroso), el cual se disuelve en el agua del suelo y como el sustrato es muy poroso y rico en oxígeno, el hierro se convierte en Fe^{3+} (férrico), y tiende a precipitar como hidróxido férrico, pero este no es absorbido por la planta. Por lo tanto, la respuesta a este problema es aportar el hierro Fe^{2+} en forma de quelato para estabilizarlo y no se convierta a su forma de Fe^{3+} (Vimbert, 2012).

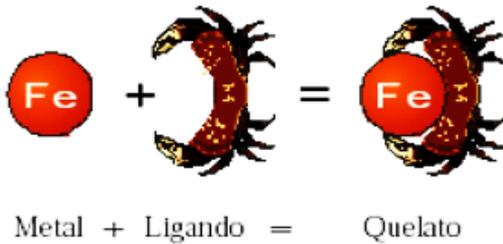
Existen tres razones principales para utilizar complejos quelatos (micronutrientes), las cuales son las siguientes:

- para evitar que los elementos no sean precipitados y desencadenen reacciones oxidativas,
- para una mejor asimilación de los elementos, y
- para aportar dosis elevadas, pero evitando intoxicaciones (Vimbert, 2012).

Los diversos agentes quelantes disponibles comercialmente se clasifican generalmente como orgánicos e inorgánicos, siendo los polifosfatos condensados los agentes quelantes inorgánicos

más utilizados; respecto a los agentes quelantes orgánicos, existen dos grupos que son económicamente importantes. Estos son los ácidos amino-policarboxílicos, por ejemplo, el ácido etilendiaminotetraacético (EDTA), y el otro grupo es de los ácidos hidroxí-carboxílicos tales como el ácido cítrico, glucónico y tartárico. Una nueva clase de agentes quelantes solubles en aceite (oleosolubles) se han ido introduciendo últimamente (Vimbert, 2012).

Figura 6. Representación de la formación del quelato

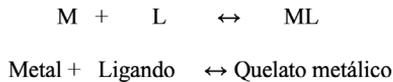


Nota. El ligando actúa sobre el metal pesado como agente quelante para formar el quelato, la apariencia es de una garra por el significado de la palabra quelato en griego . Adaptado de Fernández J, 2014, scykness.wordpress.com. CC BY 2.0

Constante de Estabilidad

La constante de estabilidad o también llamada de formación o unión (K_f), representa al equilibrio en la reacción de formación de complejos, como el caso de formación de los quelatos metálicos por reacción de quelación con ligandos. De otra manera, la inversa matemática de esta constante de formación de complejo metálico,

se le conoce como constante de disociación (K_d), la cual indica el equilibrio en la reacción inversa, es decir descomponer el complejo metálico (Flowers et al., 2022).



Constante de estabilidad (o formación):

$$K_f = \frac{[ML]}{[M][L]}$$

Constante de disociación:

$$K_d = \frac{1}{K_f}$$

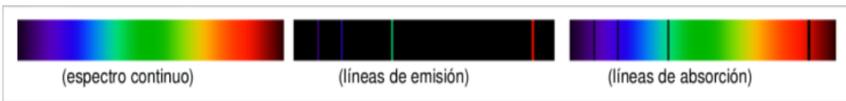
En el caso de que un ácido sea fuerte, la disociación es completa, lo que significa que el equilibrio de la reacción queda indeterminado; y respecto al pH de un ácido fuerte, dependerá solo de la concentración de dicho ácido disuelto. Ejemplos de ácidos fuertes: HNO_3 , H_2SO_4 , HCl , entre otros (Garritz et al., 2005).

Por otra parte, si el ácido es débil, la disociación no se da por completo. Para el caso de los ácidos débiles se determina la constante de equilibrio; y respecto al pH de un ácido débil, dependerá de la concentración y de la capacidad de disociación (constante de acidez). Ejemplos de ácidos débiles: EDTA (ácido etilendiaminotetraacético), NH_4^+ , ácido cítrico, entre otros (Garritz et al., 2005).

Espectroscopía

La espectroscopía es el estudio de la interacción entre la radiación electromagnética y la materia. Cuando la materia es excitada por energía térmica, eléctrica, nuclear o radiación, la materia normalmente se relaja y vuelve a su estado elemental, así emitiendo radiación electromagnética, creando espectros de emisión. Adicional a esto, es posible estudiar la interacción del continuo de la radiación electromagnética con la materia para observar cuales frecuencias se absorben y las que faltan absorber aparecerán en el espectro, estos son los espectros de absorción (San Fabian, 2023).

Figura 7. Espectro continuo, líneas de emisión y absorción



Nota. De izquierda a derecha: espectro continuo, líneas de emisión y líneas de absorción. Adaptado del capítulo: Características generales de la Espectroscopía del libro: Química Cuántica y Espectroscopía (p. 73), por San Fabian, 2023. Universidad de Alicante.

Se puede definir a un espectro como la forma gráfica de la distribución de intensidad de radiación electromagnética que emite o absorbe una sustancia en función a la longitud de onda de esa radiación. Los instrumentos que miden a los espectros se les conoce como espectrómetros, varían según el espectro a examinar (espectrómetro, espectrofotómetro o espectrógrafo) (San Fabian, 2023).

Espectroscopía de Absorción Atómica

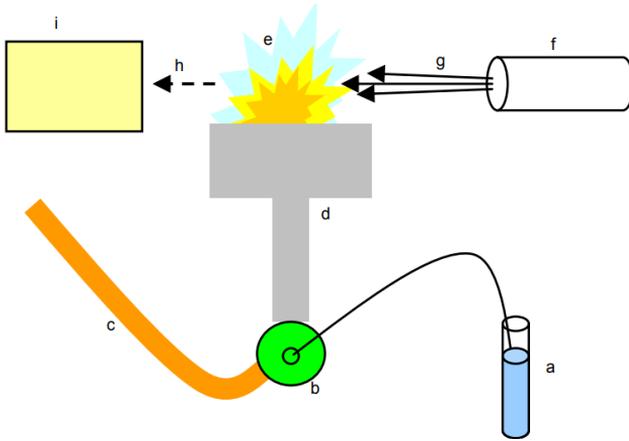
La espectroscopía de absorción atómica es una técnica que permite cuantificar la concentración de átomos característicos de una muestra con la mayor precisión posible (partes por millón). El método se basa en iluminar la muestra con luz emitida por los propios átomos que se desea cuantificar. Los siguientes procesos ocurren en este método de cuantificación (Universidad de Buenos Aires, 2022):

- Nebulización de la muestra líquida en microgotas.
- Mezcla de las microgotas con el combustible y el oxidante.
- Vaporización del solvente a la temperatura de la llama.
- Atomización de las entidades moleculares.

La excitación de la unidad atómica de interés (dependiendo de la lámpara utilizada) proporcionada por la energía radiante emitida por la lámpara de cátodo hueco del mismo elemento que se desea cuantificar. El proceso involucra la absorción de radiación de lámparas de cátodo hueco. La cuantificación cumple con la siguiente relación de proporcionalidad:

Intensidad de Luz Absorbida_{átomo} \propto **Concentración**_{átomo}

Figura 8. Partes constitutivas de un equipo de absorción atómica



Nota. Imagen esquemática de un espectrómetro de absorción atómica de llama. a) muestra, b) nebulizador, c) manguera de introducción de gas, d) cabeza del quemador, e) llama, f) lámpara de cátodo hueco, g) luz de la fuente de luz, h) luz transmitida/emitada, i) sistema de detección. Adaptado de Sundman, 2008. Departamento de Química, Universidad Umeå. Suecia.

En el interior de la lámpara, hay un cátodo cilíndrico de metal que contiene al metal a excitar además de un ánodo. Los átomos de metal en el catalizador excitan y crean luz con una longitud determinada específicamente en el eje cuando se aplica un alto voltaje a través del ánodo y el catalizador (correspondiente al elemento de estudio). El tipo de tubo catalítico que se utiliza dependen del metal que se examina. Un tubo de cobre catalítico se para analizar concentración de cobre en un material, y de manera similar para

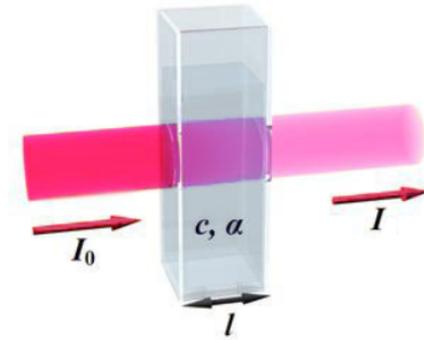
cualquier otro metal que se desea analizar (Universidad de Buenos Aires, 2022).

Espectrofotetría UV-visible

En espectroscopia, se llama espectrofotetría a los métodos que utilizan la absorción de radiación electromagnética en el rango ultravioleta y visible del espectro molecular. En esta técnica, se mide la cantidad y el tipo de luz absorbida por una molécula determinada. Las moléculas se iluminan con la luz que corresponde a la región ultravioleta o visible del espectro electromagnético pueden absorber esta radiación. La absorción de radiación UV o visible dependerá de la estructura química de cada molécula. Esta energía emitida o absorbida promueve la transición electrónica de la molécula del analito a un estado excitado. Los electrones que han alcanzado el estado excitado vuelven al estado fundamental, pero en este caso se libera calor en lugar de radiación. Por lo tanto, la espectrofotetría utiliza el resultado de la absorción de luz analizando los fotones transmitidos en lugar de los absorbidos (Universidad de Buenos Aires, 2022).

El siguiente esquema muestra la celda o cubeta de un espectrofotómetro, la cual contiene a la muestra que se desea analizar. De color rojo se observa a la radiación incidente (I_0), la cual llega a la muestra con energía y cantidad determinada. Los fotones de esta radiación que exciten los electrones de las moléculas de las muestras son absorbidos, lo que resta pasará y llega al detector (I) (Universidad de Buenos Aires, 2022).

Figura 9. Cubeta de un espectrofotómetro



Nota. Adaptado de Fernández G, 2015.

La ley de Lambert-Beer, relaciona la absorbancia (A) de la muestra como:

$$A = \log \frac{I_0}{I} = \epsilon \times c \times l$$

Donde “l” es longitud de la cubeta (cm), “c” es concentración (mol/l) y ϵ es absorptividad molar (l/mol.cm) (Fernández, 2015)

Aplicación Edáfica

La fertilización edáfica, también conocida como aplicación directa al suelo ya que consiste en aplicar fertilizantes al fondo de la base de una planta. A este tipo de fertilización se recurre mucho al utilizar quelatos, ya que de esta manera las plantas pueden absorber micronutrientes esenciales por su sistema radicular (vía de nutrición de la planta). Generalmente, para que la planta absorba

adecuadamente los nutrientes, se debe tomar en cuenta que los elementos en la solución pueden darse en rangos de 100 a 1 y 200 a 1. Por este motivo, lo ideal es que se aplique en la misma frecuencia tanto los quelatos de elementos menores como los mayores (WALCO S.A., 1997).

Las plantas (flora), de un hábitat necesitan de micronutrientes para su desarrollo como es el caso del hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn), entre otros que generalmente son más solubles en medio ácido que en básico. En zonas aledañas a ríos donde existen contaminantes por minería informal o por otras industrias, se llega a medir una acidez del suelo demasiado alta que afecta de manera negativa a la distribución edáfica. Un ejemplo, la nitración (proceso microbiano), inasible a pH de 4.5, pero a pH 6 – 6.5 se da óptimamente (Jordán López, 2005).

Figura 10. Aplicación Edáfica



Nota. Aplicación de fertilizante directamente a la base de la planta, lo más cercano a la zona de absorción radicular. Adaptado de Herrera Peña, 2021.

Capítulo 3

Métodos experimentales

Precipitación de Fe^{3+} con NaOH

La adición del hidróxido de sodio (NaOH), es necesaria, ya que la muestra al ser rica en oxígeno puede formar el Fe^{3+} el cual según la teoría tiene una constante de estabilidad mayor que el Pb^{2+} y Zn^{2+} en cuanto al ácido cítrico y lo mismo con el EDTA respecto a la constante de estabilidad o formación. Por lo cual, significaría que al agregar los ligandos en su forma de bases conjugadas del ácido cítrico (ion citrato), y EDTA (ion etilendiaminotetraacético), se concentrarían más en quelar al hierro en su forma Fe^{3+} (férico). Lo contrario ocurre con el hierro en su forma Fe^{2+} (ferroso), que tiene una constante de estabilidad menor a la del Pb^{2+} y Zn^{2+} .

Quelación de Pb^{2+} y Zn^{2+} con EDTA y citrato de magnesio

Determinación de la concentración de plomo y zinc en forma de compuestos de coordinación (Quelatos).

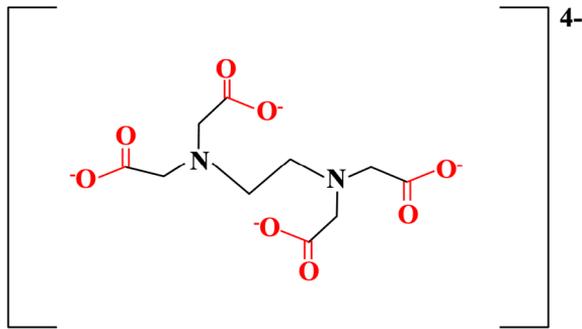


La reacción es del tipo reversible y la estequiometría es 1:1. Por lo cual, la remoción del metal libre se desplazará a la izquierda.

Quelación con ion etilendiaminotetraacético

Paralareacciónconelmetal,actúa elionetilendiaminotetraacético ($[\text{H}_{12}\text{C}_{10}\text{N}_2\text{O}_8]^{4-}$), que corresponde a la base conjugada del ácido etilendiaminotetraacético (EDTA).

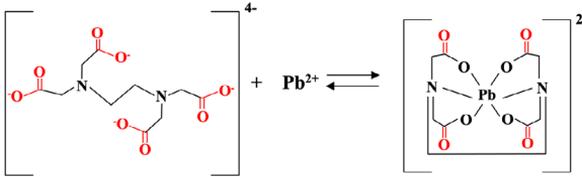
Figura 11. Base conjugada del ácido EDTA: ion etilendiaminotetraacético



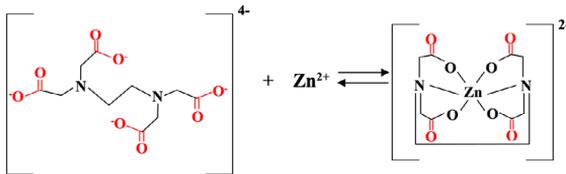
Nota. Adaptado de (Rojas Reyes et al., 2018).

Los esquemas de reacción entre la base conjugada de EDTA con el Pb^{2+} y Zn^{2+} serán los siguientes:

Reacción de ion etilendiaminotetraacético con Pb^{2+} :



Reacción de ion etilendiaminotetraacético con Zn^{2+} :

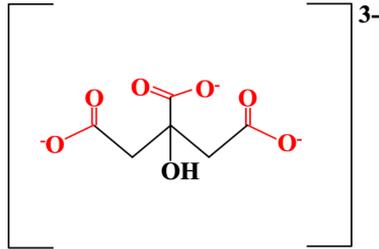


El ligando EDTA es un agente quelante muy fuerte, ya que es hexadentado, es decir posee seis espacios libres para la unión del metal, estos son los átomos de oxígenos libres (cuatro), y los átomos de nitrógeno (dos).

Quelación con ion citrato

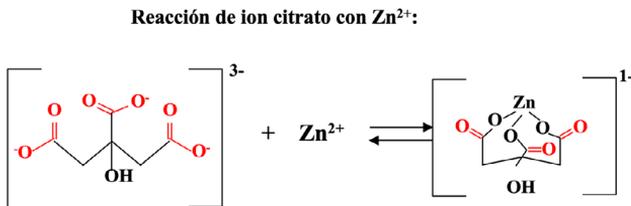
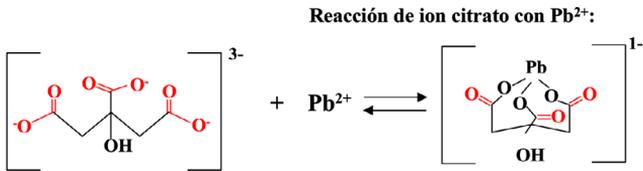
Para la reacción con el metal, actúa el ion citrato ($[\text{H}_5\text{C}_6\text{O}_7]^{3-}$), que corresponde a la base conjugada del ácido cítrico.

Figura 12. Base conjugada del ácido cítrico: ion citrato



Nota. Adaptado (Rojas Reyes et al., 2018).

Los esquemas de reacción entre la base conjugada de ácido cítrico con el Pb^{2+} y Zn^{2+} serán los siguientes:



El ligando ion Citrato es un agente quelante medio, es tridentado, es decir posee tres espacios libres para la unión del metal, estos son los átomos de oxígenos libres.

La relación es la siguiente:



Metal + Ligando \rightleftharpoons Quelato metálico

$$\text{Constante de Estabilidad} = K = \frac{[ML]}{[M][L]}$$

Como la constante de estabilidad suele ser un número muy grande, es común expresarlo como Log K.

$$\text{Log } K = \text{Log} \left(\frac{[ML]}{[M][L]} \right) = \frac{\text{Metal quelado}}{\text{Metal libre} \times \text{Ligando}}$$

En un mecanismo, donde hay más de un metal presente, el quelato metálico con la mayor constante de estabilidad relegará a los metales de constante de estabilidad menor (WALCO S.A., 1997).

Para el desarrollo de los métodos experimentales, se usaron las siguientes técnicas:

Muestreo Aleatorio Simple:

El muestreo es un conjunto de operaciones para elegir una muestra. En el caso de la presente investigación, la toma de muestras de las aguas del río Moche se emplea el muestreo aleatorio simple, este método es una técnica en la que todos los elementos (muestras de agua), que conforman una población (río Moche), tienen igual probabilidad de ser seleccionados. De esta manera, se tiene una muestra compuesta de los tres puntos seleccionados en la Cuenca Alta para conocer características de las aguas del río Moche como el pH y la temperatura (Ortiz Uribe, 2004).

Espectroscopía Absorción atómica

En el Laboratorio Químico Metalúrgico “LAPROMIN”, se utiliza la técnica de espectrometría de absorción atómica (AAS) y/o ICP-OES para determinar las concentraciones iniciales de plomo (Pb), zinc (Zn), y hierro (Fe).

Espectrofotometría UV-Visible

Una vez realizado el tratamiento a las muestras, que incluyen la precipitación con NaOH del Fe^{3+} en forma de hidróxido de hierro, la quelación de plomo y zinc con EDTA y citrato, en el Laboratorio de Química Analítica Cuantitativa de la Universidad Nacional de Trujillo, se utiliza el espectrofotómetro para medir la absorbancia de hierro, plomo y zinc por sus longitudes de onda respectivas.

Procedimiento

Caracterización de muestras de agua recolectadas

Se seleccionará tres puntos en la trayectoria del río Moche que serán transportadas al laboratorio para ser analizadas. Para lo cual, los puntos seleccionados son Shiran, Motil y Quiruvilca.

Acondicionamiento de las muestras

- Adición hidróxido de sodio para precipitar el hierro
- Medición de pH
- Medición de temperatura
- Análisis por absorción atómica

Preparación de soluciones EDTA (5%, 15%, 20% y 30%)

Procedimiento de preparación:

$\% \text{ m/v} = \text{Masa de soluto/Volumen de solución}$

- Pesar 5; 15; 20 y 30 gramos de sal sódica de EDTA
- Disolver en agua destilada
- Trasvasar a un matraz aforado o fiola y aforar a 100 ml.
- Guardar en un frasco y etiquetar.

Preparación de soluciones de Citrato-Mg (5%, 15%, 20% y 30%)

Procedimiento de preparación:

$\% \text{ m/v} = \text{Masa de soluto/Volumen de solución}$

- Pesar 5; 15; 20 y 30 gramos de Citrato de magnesio en polvo
- Disolver en agua destilada

- Trasvasar a un matraz aforado o fiola y aforar a 100 ml.
- Guardar en un frasco y etiquetar.

Preparación de muestras patrón

- De las muestras iniciales de agua, diluimos con agua destilada para reducir a concentraciones de 0,75; 0,5; 0,25 y 0,125.
- Medición de pH y temperatura.
- Espectrofotometría UV-visible.

Aplicación de soluciones de EDTA a diferentes concentraciones

- Preparar muestras de 50 ml de agua libre de hierro.
- Aplicar las soluciones de EDTA de 20 ml.
- Medición de pH y temperatura.
- Espectrofotometría UV-Visible.

Aplicación de soluciones de citrato de magnesio a diferentes concentraciones

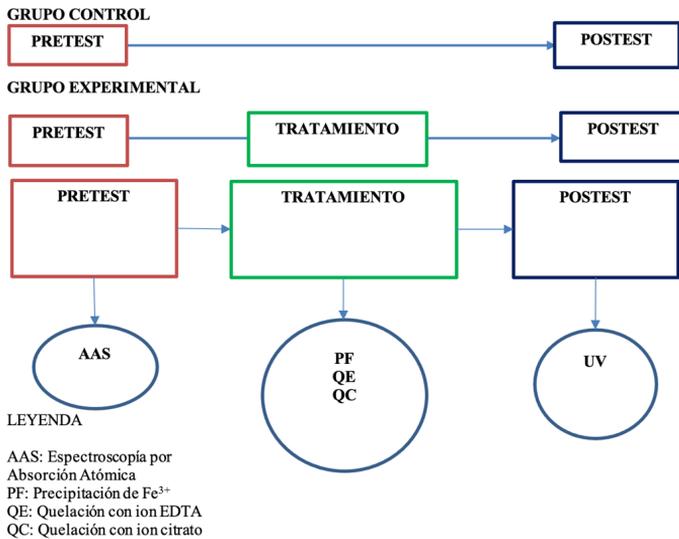
- Preparar muestras de 50 ml de agua libre de hierro.
- Aplicar las soluciones de Citrato de magnesio de 20 ml.
- Medición de pH y temperatura.
- Espectrofotometría UV-Visible.

Diseño Experimental

Matriz de Diseño

En la figura 13, se ejemplifica a la matriz de diseño para el grupo control y grupo experimental en el método pre y post test.

Figura 13. Diagrama de pretest y posttest



Nota. La presente figura denota el proceso experimental del trabajo de investigación Huaman Cerna, 2024.

Variables y Niveles

Tabla 5. Niveles de variables de estudio

Variables independientes	Niveles de estudio
Cantidad de Citrato	5%,15%,20%,30%
Cantidad de EDTA	5%,15%,20%,30%
Variable Dependiente	Concentración de Plomo y Zinc

Nota. Huaman Cerna, 2024.

Capítulo 4

Análisis experimentales

Caracterizar las muestras de agua

Las muestras de agua recolectadas tienen las siguientes características:

- Color: amarillo rojizo
- Aspecto: Turbio
- pH: 3
- Temperatura: 18 °C

De acuerdo con el análisis cualitativo, el color rojizo evidencia la presencia de hierro, la turbiedad se debe a la presencia material particulado disuelto y en suspensión, el pH indica un nivel de acidez medio, la temperatura corresponde con la temperatura ambiente. Posteriormente, al realizar dos acondicionamientos a las muestras con NaOH (hidróxido de sodio) en solución de agua con concentración 0,1 N valorizada. El primer acondicionamiento constó de agregar 300 ml de solución de NaOH a 500 ml de muestra de agua del río moche y 200 ml de la misma solución a 500 ml de la muestra respectiva, luego realizar la filtración debida para ambos acondicionamientos con papel filtro, las muestras tendrán las siguientes características:

- Color: incoloro
- Aspecto: cristalino
- pH: básico (9-10)
- Temperatura: 24 °C

El color y el aspecto es debido a que se remueve partículas de hierro férrico, y adicionalmente a la filtración que se realizó, logra eliminarse las partículas sobrantes. La presencia del hierro férrico y ferrosos siguen en la muestra de agua, pero ya en una proporción muy escasa, lo que permite que los ligandos EDTA y Citrato absorban más ion metálico de plomo y de zinc.

Tabla 6. Cuadro comparativo de concentración de metales y los ECAS

MUESTRA		ESTÁNDAR DE CALIDAD AMBIENTAL (ppm)			
Metal	Concentración (ppm)	ACH	ARV	ACA	AAAR
Pb	0,25	0,05	0,05	0,05	0,0025
Zn	0,188	5	2	24	0,12

Nota. Huaman Cerna, 2024.

La concentración de plomo es superior a los Estándares de Calidad Ambiental para el agua de consumo humano (ACH), agua para riego de vegetales (ARV), agua para consumo animal (ACA) y el agua para conservación del ambiente acuático en ríos (AAAR).

La concentración del zinc es menor a lo establecido en los ECAS para ACH, ARV y ACA, pero al ser mayor para AAAR, indica que no es apta para la conservación del ambiente acuático en ríos.

Tabla 7. Variaciones porcentuales de la concentración de plomo y zinc

MUESTRA		VARIACIÓN PORCENTUAL			
Metal	Concentración (ppm)	ACH	ARV	ACA	AAAR
Pb	0,25	400	400	400	9900
Zn	0,188	-96,2	-90,6	-99,2	56,7

Nota. Huaman Cerna, 2024.

La concentración de plomo supera el Estándar de Calidad Ambiental para el agua de consumo humano y riego de vegetales y consumo animal en 400%. Pero al comparar con Tabla 17 referida a la categoría cuatro (Conservación del ambiente acuático), se encuentra una variación porcentual en exceso de 9900%.

En el caso del zinc se han calculado porcentajes negativos lo que confirma que la concentración está debajo de los estándares. Pero para el agua conservación del ambiente acuático supera en 56,7%.

Preparación de soluciones EDTA y Citrato de magnesio

Se prepararon soluciones al 5%, 10%, 15% y 20%, en proporción peso – volumen (%p/v), de EDTA y Citrato de magnesio. Las soluciones de EDTA son cristalinas y las de Citrato son opacas que se acentúan cuando se incrementa el %p/v. En las pruebas de laboratorio, ambas disoluciones producen reacciones exotérmicas, aunque las muestras tratadas con citrato generaron más calor.

Tabla 8. Características de las soluciones de EDTA y Citrato de magnesio

Características	SOLUCIÓN EDTA			
Concentración porcentual	5%	15%	20%	30%
pH	4,1	4,4	4,5	4,7
Características	SOLUCIÓN CITRATO			
Concentración porcentual	5%	15%	20%	30%
pH	7,9	8,0	8,1	8,3

Nota. Huaman Cerna, 2024.

El aumento de pH es debido a que ambos agentes quelantes están en forma de sal, es decir son las bases conjugadas de ácidos, en este caso son ácidos débiles

Formación de quelatos con EDTA

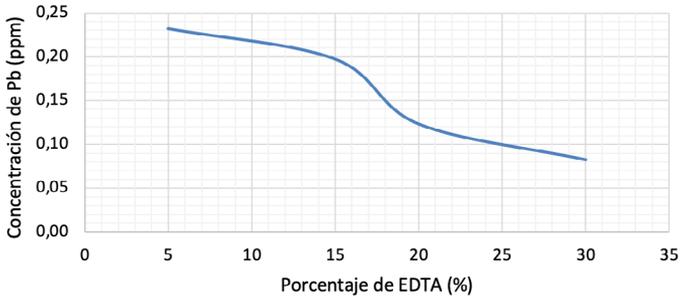
La formación de quelatos de EDTA seguirá el orden de acuerdo con las constantes de formación para plomo (Pb^{2+}) y zinc (Zn^{2+}), según la teoría estudiada, se tiene los siguientes datos:

- K_f de Pb^{2+} = 18,04
- K_f de Zn^{2+} = 16,50

En un sistema que presenta dos o más metales en solución, el metal de mayor constante de formación desplazará a los de menor constante. Esto significa que el quelato de plomo-EDTA se formará primero que el quelato zinc-EDTA.

Quelato plomo-EDTA en muestra tratada con 300 ml de NaOH 0,1 N en solución de agua

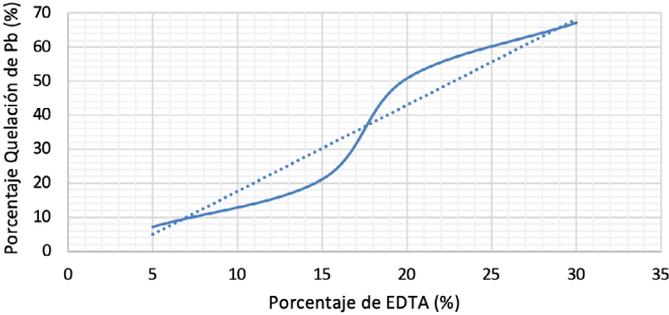
Figura 14. Remoción de plomo por adición de EDTA para una muestra tratada con 300 ml NaOH 0,1 N



Nota. Huaman Cerna, 2024.

En la figura 14, la concentración del ion metálico disminuye a medida que se incrementa el porcentaje masa-volumen (%m/v), de las soluciones del agente quelante, el resultado determinado es que la concentración mínima de plomo 0,0821 ppm se logra con solución EDTA al 30%.

Figura 15. Porcentaje de Quelación de plomo por adición de EDTA para una muestra tratada con 300 ml NaOH 0,1 N

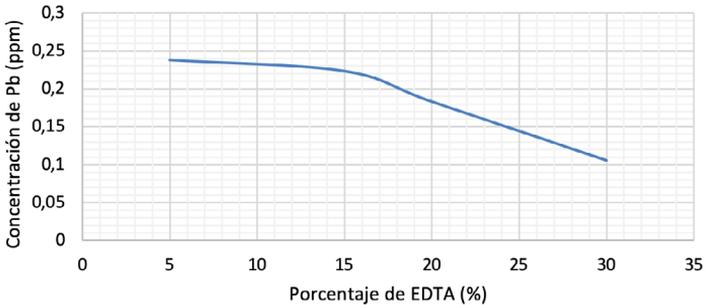


Nota. Huaman Cerna, 2024.

En la figura 15, la quelación del contenido metálico se mide por la concentración removida del metal, es decir que la quelación de plomo máxima es de un 67,16%, este valor es calculado por la diferencia de la concentración determinada en la figura anterior respecto a la concentración inicial en la muestra de 0,25 ppm, utilizando solución EDTA al 30%.

Quelato plomo-EDTA en muestra tratada con 200 ml de NaOH 0,1 N en solución de agua

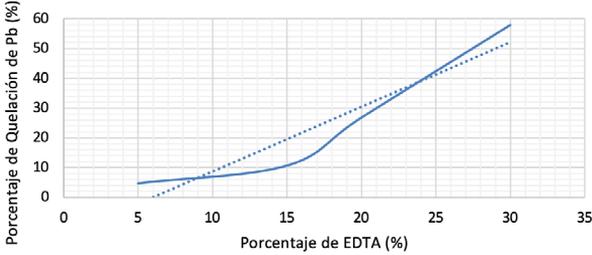
Figura 16. Remoción de plomo por adición de EDTA para una muestra tratada con 200 ml NaOH 0,1 N



Nota. Huaman Cerna, 2024.

En la figura 16, la concentración del ion metálico disminuye a medida que se incrementa el porcentaje masa-volumen (%m/v), de las soluciones del agente quelante, el resultado determinado es que la concentración mínima de plomo 0,1054 ppm se logra con solución EDTA al 30%.

Figura 17. Porcentaje de Quelación de plomo por adición de EDTA para una muestra tratada con 200 ml NaOH 0,1 N

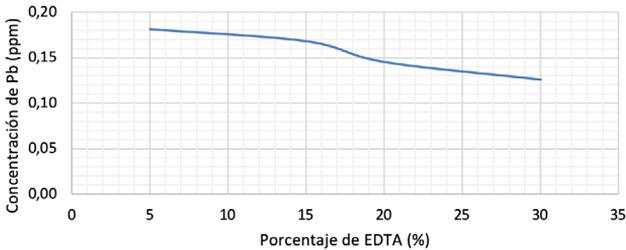


Nota. Huaman Cerna, 2024.

En la figura 17, la quelación del contenido metálico se mide por la concentración removida del metal, es decir que la quelación de plomo máxima es de un 57,84%, este valor es calculado por la diferencia de la concentración determinada en la figura anterior respecto a la concentración inicial en la muestra de 0,25 ppm, utilizando solución EDTA al 30%.

Quelato zinc-EDTA en muestra tratada con 300 ml de NaOH 0,1 N en solución de agua

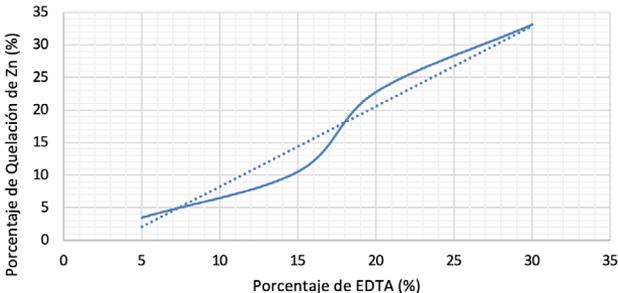
Figura 18. Remoción de zinc por adición de EDTA para una muestra tratada con 300 ml NaOH 0,1 N



Nota. Huaman Cerna, 2024.

En la figura 18, la concentración del ion metálico disminuye a medida que se incrementa el porcentaje masa-volumen (%m/v), de las soluciones del agente quelante, el resultado determinado es que la concentración mínima de zinc 0,1258 ppm se logra con solución EDTA al 30%.

Figura 19. Porcentaje de Quelación de zinc por adición de EDTA para una muestra tratada con 300 ml NaOH 0,1 N

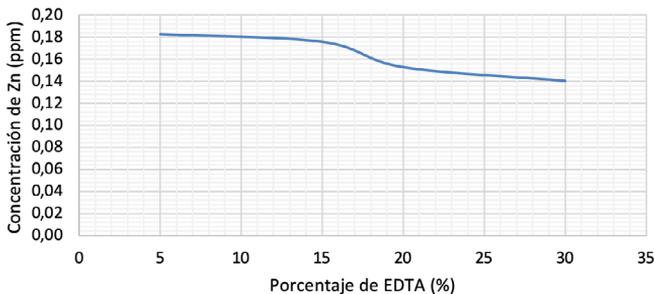


Nota. Huaman Cerna, 2024.

En la figura 19, la quelación del contenido metálico se mide por la concentración removida del metal, es decir que la quelación de zinc máxima es de un 33,10%, este valor es calculado por la diferencia de la concentración determinada en la figura anterior respecto a la concentración inicial en la muestra de 0,188 ppm, utilizando solución EDTA al 30%.

Quelato zinc-EDTA en muestra tratada con 200 ml de NaOH 0,1 N en solución de agua

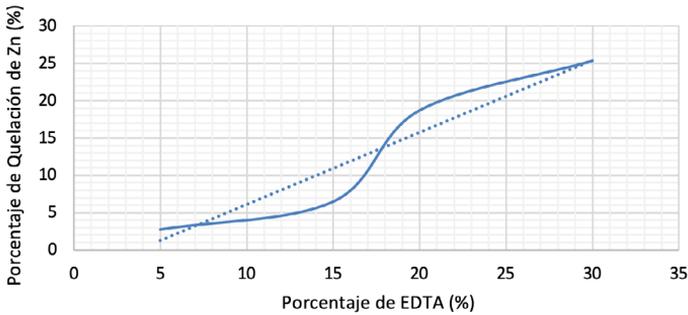
Figura 20. Remoción de zinc por adición de EDTA para una muestra tratada con 200 ml NaOH 0,1 N



Nota. Huaman Cerna, 2024.

En la figura 20, la concentración del ion metálico disminuye a medida que se incrementa el porcentaje masa-volumen (%m/v), de las soluciones del agente quelante, el resultado determinado es que la concentración mínima de zinc 0,1403 ppm se logra con solución EDTA al 30%.

Figura 21. Porcentaje de Remoción de zinc por adición de EDTA para una muestra tratada con 200 ml NaOH 0,1 N



Nota. Huaman Cerna, 2024.

En la figura 21, la quelación del contenido metálico se mide por la concentración removida del metal, es decir que la quelación de zinc máxima es de un 25,39%, este valor es calculado por la diferencia de la concentración determinada en la figura anterior respecto a la concentración inicial en la muestra de 0,188 ppm, utilizando solución EDTA al 30%.

Formación de quelatos con Citrato de magnesio

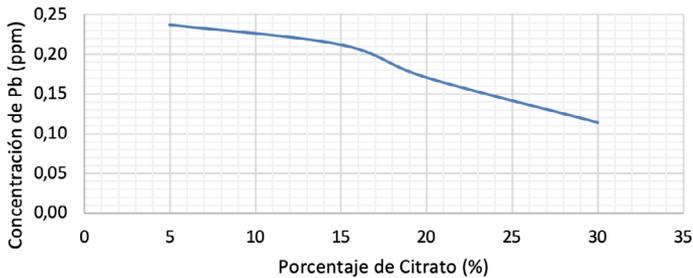
La formación de quelatos de Citrato seguirá el orden de acuerdo a las constantes de estabilidad de los quelatos de Ácido cítrico para plomo (Pb^{2+}), y zinc (Zn^{2+}), ya que el ion Citrato es la base conjugada del Ácido cítrico, según la teoría estudiada, se tiene los siguientes datos:

- K_1 de $Pb^{2+} = 6,50$
- K_1 de $Zn^{2+} = 4,71$

De manera similar para la constante de estabilidad, también llamada constante de formación o de unión, se formará primero el quelato plomo-Citrato y luego el quelato zinc-Citrato.

Quelato de plomo-Citrato en muestra tratada con 300 ml de NaOH 0,1 N en solución de agua

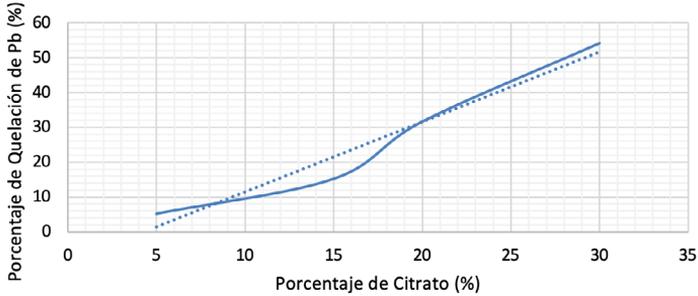
Figura 22. Remoción de plomo por adición de Citrato para una muestra tratada con 300 ml NaOH 0,1 N



Nota. Huaman Cerna, 2024.

En la figura 22, la concentración del ion metálico disminuye a medida que se incrementa el porcentaje masa-volumen (%m/v), de las soluciones del agente quelante, el resultado determinado es que la concentración mínima de plomo 0,1145 ppm se logra con solución Citrato al 30%.

Figura 23. Porcentaje de Quelación de plomo por adición de Citrato para una muestra tratada con 300 ml NaOH 0,1 N

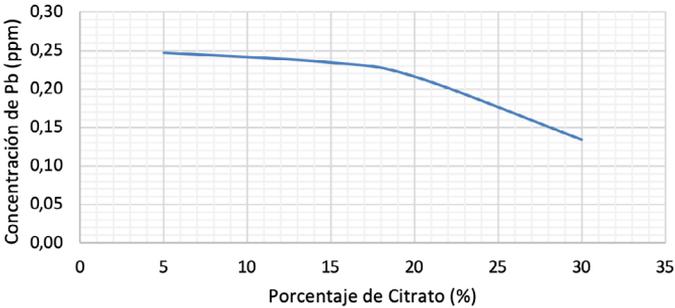


Nota. Huaman Cerna, 2024.

En la figura 23, la quelación del contenido metálico se mide por la concentración removida del metal, es decir que la quelación de plomo máxima es de un 54,18%, este valor es calculado por la diferencia de la concentración determinada en la figura anterior respecto a la concentración inicial en la muestra de 0,25 ppm, utilizando solución Citrato al 30%.

Quelato de plomo-Citrato en muestra tratada con 200 ml de NaOH 0,1 N en solución de agua

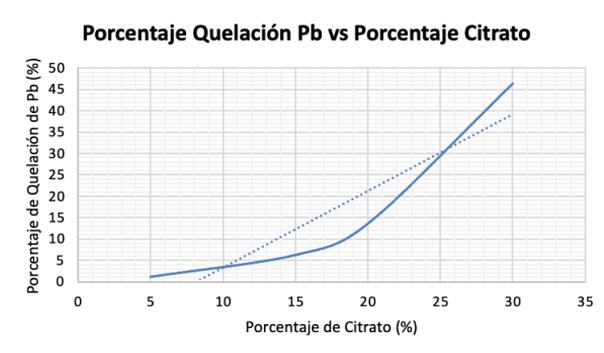
Figura 24. Remoción de plomo por adición de Citrato para una muestra tratada con 200 ml NaOH 0,1 N



Nota. Huaman Cerna, 2024.

En la figura 24, la concentración del ion metálico disminuye a medida que se incrementa el porcentaje masa-volumen (%m/v), de las soluciones del agente quelante, el resultado determinado es que la concentración mínima de plomo 0,1343 ppm se logra con solución Citrato al 30%.

Figura 25. Porcentaje de Remoción de plomo por adición de Citrato para una muestra tratada con 200 ml NaOH 0,1 N

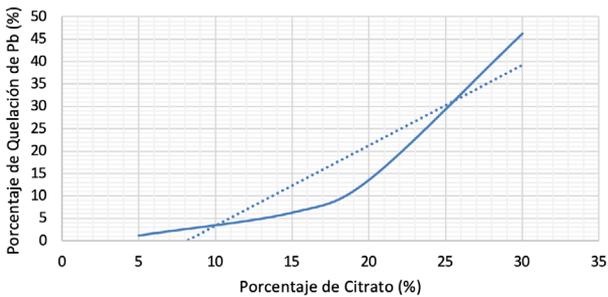


Nota. Huaman Cerna, 2024.

En la figura 25, la quelación del contenido metálico se mide por la concentración removida del metal, es decir que la quelación de plomo máxima es de un 46,28%, este valor es calculado por la diferencia de la concentración determinada en la figura anterior respecto a la concentración inicial en la muestra de 0,25 ppm, utilizando solución Citrato al 30%.

Quelato de zinc-Citrato en muestra tratada con 300 ml de NaOH 0,1 N en solución de agua

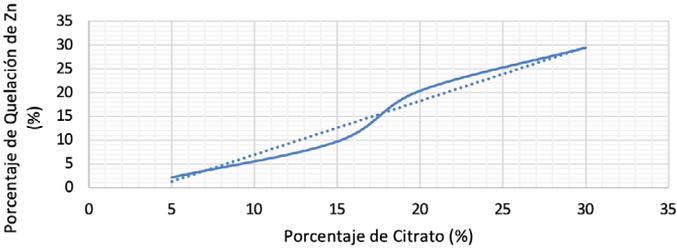
Figura 26. Remoción de zinc por adición de Citrato para una muestra tratada con 300 ml NaOH 0,1 N



Nota. Huaman Cerna, 2024.

En la figura 26, la concentración del ion metálico disminuye a medida que se incrementa el porcentaje masa-volumen (%m/v), de las soluciones del agente quelante, el resultado determinado es que la concentración mínima de zinc 0,1326 ppm se logra con solución Citrato al 30%.

Figura 27. Porcentaje de Remoción de zinc por adición de Citrato para una muestra tratada con 300 ml NaOH 0,1 N

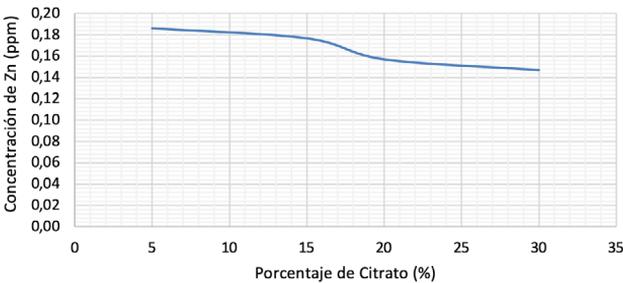


Nota. Huaman Cerna, 2024.

En la figura 27, la quelación del contenido metálico se mide por la concentración removida del metal, es decir que la quelación de plomo máxima es de un 29,48%, este valor es calculado por la diferencia de la concentración determinada en la figura anterior respecto a la concentración inicial en la muestra de 0,188 ppm, utilizando solución Citrato al 30%.

Quelato de zinc-Citrato en muestra tratada con 200 ml de NaOH 0,1 N en solución de agua

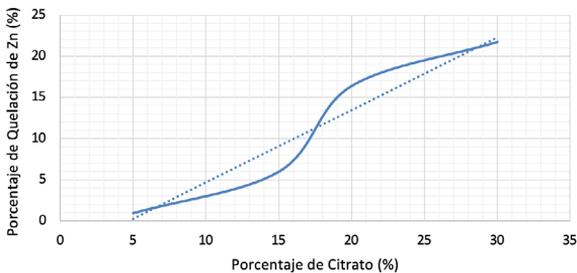
Figura 28. Remoción de zinc por adición de Citrato para una muestra tratada con 200 ml NaOH 0,1 N



Nota. Huaman Cerna, 2024.

En la figura 28, la concentración del ion metálico disminuye a medida que se incrementa el porcentaje masa-volumen (%m/v), de las soluciones del agente quelante, el resultado determinado es que la concentración mínima de zinc 0,1472 ppm se logra con solución Citrato al 30%.

Figura 29. Porcentaje de Remoción de zinc por adición de Citrato para una muestra tratada con 200 ml NaOH 0,1 N



Nota. Huaman Cerna, 2024.

En la figura 29, la quelación del contenido metálico se mide por la concentración removida del metal, es decir que la quelación de plomo máxima es de un 21,73%, este valor es calculado por la diferencia de la concentración determinada en la figura anterior respecto a la concentración inicial en la muestra de 0,188 ppm, utilizando solución Citrato al 30%.

Comparación del porcentaje de estabilización

Efectividad de la estabilización de iones metálicos de Pb^{2+} y Zn^{2+}

Para determinar la efectividad, comparamos las constantes de estabilidad de quelatos de EDTA y de ácido cítrico (tomado como referencia para Citrato, ya que el ion Citrato es la base conjugada del ácido cítrico), de los iones metálicos con Pb^{2+} y Zn^{2+} , se tiene la siguiente tabla:

Tabla 9. Variación entre las constantes de estabilidad de iones metálicos

ION METAL	EDTA	CITRATO	%VARIACION
	CONST. ESTABILIDAD		
Pb^{2+}	18,04	6,5	63,97
Zn^{2+}	16,5	4,71	71,45

Nota. Huaman Cerna, 2024.

La variación entre las constantes de estabilidad del metal plomo con agentes quelantes EDTA y Citrato es del 63,97%, la cual es menor a la variación de las constantes del metal zinc de 71,45% con los mismos agentes quelantes.

Eficiencia de %Quelación para iones metálicos de Pb²⁺ y Zn²⁺

La eficiencia de la remoción o quelación de los metales plomo y zinc en las muestras, es determinada por el promedio de los porcentajes de quelación como se habían determinado en los gráficos de resultados, donde se consideró el acondicionamiento con NaOH 0,1 N en solución de 300 y 200 ml y utilizando agentes quelantes EDTA y Citrato respectivamente.

Tabla 10. Variación del Porcentaje de Quelación promedio de plomo-Quelatos

Volumen NaOH 0,1 N en solución					
300 ml			200 ml		
Quelato-plomo	%Quelación promedio	%VARIACION	Quelato-plomo	%Quelación promedio	%VARIACION
E-Pb	36,58	27,34	E-Pb	24,95	32,62
C-Pb	26,58		C-Pb	16,81	

Nota. Huaman Cerna, 2024.

El porcentaje de quelación promedio para metal plomo es mayor al utilizar al agente quelante EDTA y hay una diferencia considerable respecto al agente quelante Citrato.

Tabla 11. Variación del Porcentaje de Quelación promedio de zinc-Quelatos

Volumen NaOH					
300 ml			200 ml		
Quelato-zinc	%Quelación promedio	%VARIACION	Quelato-zinc	%Quelación promedio	%VARIACION
E-Zn	17,47	11,54	E-Zn	13,33	15,49
C-Zn	15,46		C-Zn	11,26	

Nota. Huaman Cerna, 2024.

El porcentaje de quelación promedio para metal zinc es mayor al utilizar al agente quelante EDTA, aunque la diferencia es menor respecto al agente quelante Citrato.

Como se observa en las tablas 12 y 13 respectivamente, la variación es menor al utilizar 300 ml de NaOH 0,1 N en solución, lo que determina que hay mayor eficiencia para la formación de quelatos de plomo y zinc al utilizar dicho volumen de la solución de NaOH. Esto se debe a lo mencionado anteriormente, la presencia de hierro en su forma Fe^{3+} tiene una constante de estabilidad mayor para formación de quelatos con EDTA y Citrato, por lo que estos agentes quelantes atacan al ion hierro férrico antes que a los iones metálicos plomo (Pb^{2+}), y zinc (Zn^{2+}).

Eficiencia entre quelatos de Pb^{2+} y Zn^{2+} con EDTA y Citrato

Para comparar la eficiencia entre la formación de quelatos de los metales plomo y zinc, se toma como referencia al volumen de 300 ml de NaOH 0,1 N en solución, mencionado anteriormente que es la cantidad donde se obtiene mayor eficiencia para la quelación.

Tabla 12. Eficiencia entre quelatos de plomo y zinc con EDTA y Citrato

QUELATOS EDTA		
%Qp E-Pb	%Qp E-Zn	EFICIENCIA
36,58	17,47	52,24
QUELATOS CITRATO		
%Qp C-Pb	% Qp C-Zn	EFICIENCIA
26,58	15,46	41,85

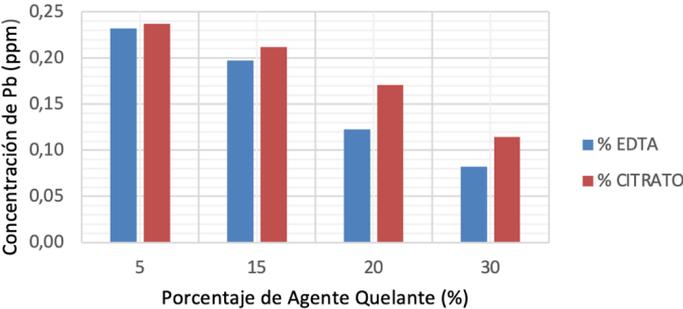
Nota. Huaman Cerna, 2024.

La formación de quelatos de plomo es eficiente en un 52,24% a los quelatos de zinc con el agente quelante EDTA. En el caso del Citrato como agente quelante, la formación de quelatos de plomo es eficiente en un 41,85% a los quelatos de zinc. En general, la quelación del metal plomo es más eficiente que la de metal zinc, lo que confirma que el orden de quelación se da de manera correcta ya que las constantes de estabilidad con plomo son mayores a la del zinc.

Análisis Estadístico

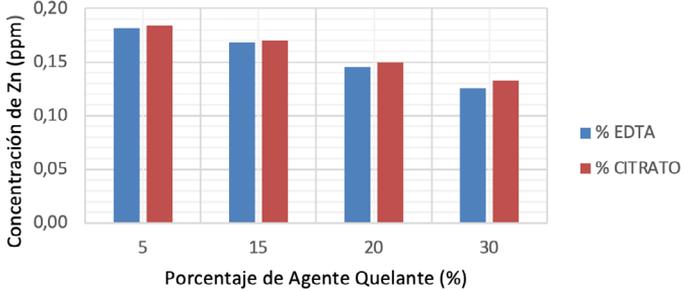
En el primer análisis se comparan las concentraciones de los iones metálicos y los porcentajes peso-volumen (%p/v), de los agentes quelantes EDTA y Citrato.

Figura 30. Concentración de ion plomo



Nota. Huaman Cerna, 2024.

Figura 31. Concentración de ion zinc

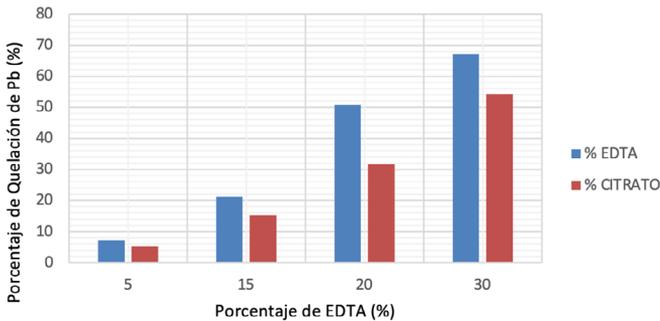


Nota. Huaman Cerna, 2024.

En las gráficas de las figuras 30 y 31, se observa que a medida aumenta el porcentaje de las soluciones de los agentes quelantes, la concentración de iones de los metales plomo y zinc va disminuyendo. Además, existe una diferencia entre los agentes quelantes, se observa que con el ligando ion EDTA la concentración restante de los metales pesados es menor a la del ligando ion Citrato; lo que significa que con el agente quelante EDTA se está removiendo más contenido metálico.

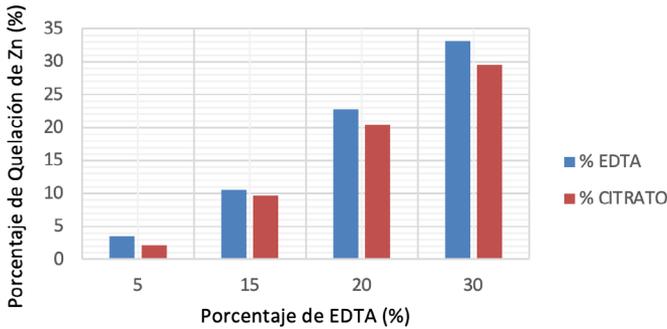
En el segundo análisis se comparan los porcentajes de quelación de ambos iones metálicos y los porcentajes peso-volumen (%p/v), de los agentes quelantes EDTA y Citrato.

Figura 32. Porcentaje de Quelación de ion plomo



Nota. Huaman Cerna, 2024.

Figura 33. Porcentaje de Quelación de ion zinc



Nota. Huaman Cerna, 2024.

En las gráficas de las figuras 32 y 33, se observa que a medida aumenta el porcentaje de las soluciones de los agentes quelantes, el porcentaje de quelación de los iones metálicos va aumentando. Además, existe una diferencia entre los agentes quelantes, se observa que con el ligando ion EDTA el porcentaje de quelación es mayor al del ligando ion Citrato; lo que significa que con el agente quelante EDTA se está logrando quelar más contenido metálico, lo que confirma la teoría de que mientras más espacios libres (iones libres), tenga el ligando, puede retener a más iones metálicos. El ligando ion EDTA es hexadentado (seis espacios libres), y el ligando ion Citrato es tridentado (tres espacios libres).

La efectividad del uso de agentes quelantes EDTA y Citrato quedó comprobada por los siguientes trabajos realizados por los autores Villa et al., 2018, que realizó el análisis termodinámico de

lixiviación de plomo en baterías recicladas usando citrato de sodio, en el cual logró porcentajes elevados de extracción de plomo utilizando citrato de sodio (ion citrato). En otra investigación realizada en 2018 por Rojas Reyes et al., quienes determinaron a base de pruebas de lixiviación de plomo en baterías recicladas con bases conjugadas de ácido cítrico (ion citrato), y ácido etilendiaminotetraacético (ion EDTA), forman complejos de plomo estables. Las extracciones de plomo son 77% y 99% respectivamente, en comparación a lo determinado en el presente trabajo de investigación con una quelación máxima de 67,16% con agente quelante EDTA y 54.18% con agente quelante Citrato.

Al analizar los porcentajes de quelación para metales plomo y zinc, se reportó que la tendencia es positiva a medida que se aumenta la concentración de los agentes quelantes EDTA y Citrato. Al hacer una comparación con los resultados encontrados por Tapia, 2017 en su investigación de quelación de metales pesados, se confirma esta tendencia, ya que a medida se aumentaba la concentración de EDTA, el porcentaje de quelación aumentaba. En el caso del plomo se registró que con 0,1 M de EDTA se lograba quelar el 61,7% del metal. En la presente investigación usando EDTA al 30% p/v se logró quelar el 67,16%. Respecto al zinc el porcentaje de quelación del metal fue alto y en comparación al determinado en el presente trabajo de investigación se obtuvo el 33, 1%; esto es debido a la diferencia de las muestras estudiadas, ya que la presencia de hierro (Fe^{3+}), afecta a la reacción con el agente quelante debido a la constante de estabilidad.

En la presente investigación, la formación de quelatos de plomo es más eficiente que la de quelatos de zinc, ya sea utilizando cualquiera de las dos variables de estudio, es decir los agentes quelantes EDTA y Citrato (citrato de magnesio). Esto se determina de acuerdo al promedio del porcentaje de quelación (%Quelación), la cual indica la remoción del metal en las muestras de agua del río Moche. En el caso del agente quelante EDTA, la formación de quelatos de plomo es más eficiente en un 52,24% a la formación de quelatos de zinc, y en el caso del agente quelante Citrato, se da la misma situación con una eficiencia del 41,85%; lo que confirma, según la teoría, que el orden de quelación se da de mayor a menor constante de estabilidad (o formación), de complejos con agentes quelantes, en ambos casos con EDTA y Citrato, la constante de estabilidad del plomo (Pb^{2+}), es mayor a la del zinc (Zn^{2+}). Además, la formación de quelatos con EDTA es más eficiente que con Citrato, y esto es debido a que las constantes de estabilidad de complejos EDTA son mayores a las de Citrato (base conjugada del ácido cítrico).

De acuerdo a los análisis experimentales realizados, se da una solución a los objetivos de estudio planteados:

Se reportó las características de las muestras de agua del río moche dando las concentraciones iniciales promedio de los elementos metálicos de plomo que fue de 0,25 ppm y de zinc que fue de 0,188 ppm. Se consideró los tres puntos Shiran, Motil y Quiruvilca, donde la variación de las concentraciones de los elementos metálicos fue del rango de 5% – 8%.

Se preparó soluciones de EDTA y Citrato de magnesio al 5%, 15%, 20% y 30% en porcentaje peso – volumen (%p/v), utilizando como solvente al agua destilada. Para cada uno de los agentes quelantes se utilizó 100 ml de agua destilada, con lo cual se pesó 5 g, 15 g, 20 g, y 30 g respectivamente para cada soluto.

Se aplicó las soluciones preparadas de EDTA a diferentes concentraciones (%p/v), para formar los quelatos de plomo-EDTA y zinc-EDTA. En el caso del plomo al usar solución EDTA al 30% pudo quelar un máximo de 67,16% del metal; para el zinc al mismo porcentaje de peso – volumen, el porcentaje de quelación máximo del metal fue del 33,10%.

Se aplicó las soluciones preparadas de Citrato a diferentes concentraciones (%p/v), para formar los quelatos de plomo-Citrato y zinc-Citrato. En el caso del plomo al usar solución Citrato al 30% pudo quelar un máximo de 54,18% del metal; para el zinc al mismo porcentaje de peso – volumen, el porcentaje de quelación máximo del metal fue del 29,48%.

Se comparó el porcentaje de quelación de los elementos metálicos en las muestras de agua del río Moche para estabilizarlos utilizando los ligandos EDTA y Citrato. La comparación se determinó mediante el promedio de los porcentajes de quelación con soluciones de EDTA y Citrato de magnesio a diferentes concentraciones (%p/v); para el caso del EDTA, el promedio de quelación máximo de plomo fue de 36,58% y del zinc fue 17,47%. En el caso del Citrato, el promedio de quelación máximo del plomo fue de 26,58% y del zinc fue 15,46%.

Por lo tanto, la máxima remoción para plomo metálico y zinc metálico se logró con el ligando EDTA.

Recomendaciones

Si la muestra que deseamos analizar presenta dos o más metales, se debe investigar sobre las constantes de formación de los metales con el agente quelante respectivo que se utilice antes de realizar el proceso experimental, ya que las constantes de formación nos dan el orden en que se da la quelación de los metales, aquello con constantes de formación mayor desplazan a los de menor constante.

Existe una enorme variedad de agentes quelantes, pero los más adecuados son los que posean mayores espacios libres (iones), para retener al metal, como el caso del ligando EDTA que al ser hexadentado puede absorber al metal en seis de sus electrones libres, lo que es adecuado para elementos metálicos perjudiciales para la salud como el plomo metálico. Es por este motivo que para las personas que sufren intoxicaciones por plomo, se les hace tratamientos con EDTA en forma de sal (el ion etilendiaminotetraacético unido a una base fuerte como el magnesio o el sodio).

Referencias

- Basolo, F., Johnson, R., & Busch, R. H. (1980). *Química de los compuestos de coordinación*. Editorial Reverté
- Cerna Muñoz, C. A., Espinoza Polo, F. A., & Chunga Pingo, G. E. (2019). Contaminación del río Moche y su impacto en la abiota y las enfermedades. *Agroindustrial Science*, 9(1), 19–27. <https://doi.org/10.17268/agroind.sci.2019.01.03>
- Fernández, G. (2015, mayo 19). Ley De Lambert-Beer. Química Orgánica.Net. <https://www.quimicaorganica.net/ley-de-lambert-beer.html>
- Fernández, J. (2014, mayo 8). Agentes quelantes y su función terapéutica. Scykness. <https://scykness.wordpress.com/2014/05/08/agentes-quelantes-y-su-funcion-terapeutica/>
- Flowers, P., Theopold, K., Langley, R., & Robinson, W. (2022). *Equilibrios de otras clases de reacción*. OpenStax.
- Garriz, A., Gasque, L., & Martínez, A. (2005). Equilibrios ácido-base. En M. de Anta (ed.). *Química Universitaria* (p.571). https://sitios.quimica.unam.mx/profesor/vmus/QGII/Teo/clases/Quimica_Universitaria_Cap16.pdf
- Herrera Peña, G. (2021, agosto 19). Técnicas de aplicación de fertilizantes. Terramía. <https://terramia.com.co/tecnicas-de-aplicacion-de-fertilizantes/>
- Housecroft, C. E., & Sharpe, A. G. (2006). Complejos de coordinación: una introducción. En *Química Inorgánica* (pp. 179–178). Pearson Educación, S.A.
- Huanan Cerna, F. A. (2024). *Aplicación de agentes quelantes para la estabilización de plomo y zinc en las aguas del río Moche - Trujillo* [Tesis ingeniería, Universidad Nacional de Trujillo].
- Huaranga Moreno, F., Méndez García, E., Quilcat León, V., & Huaranga Arévalo, F. (2012). Contaminación por metales pesados en la Cuenca del Río Moche, 1980–2010, La Libertad–Perú. *Scientia Agropecuaria*, 3(3), 235–247. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2012.03.05>

- INDECI. (2021). Reporte De Peligro Inminente N° 179–14/9/2021 / COEN–INDECI / 10:30 HORAS (Reporte N° 13) Por Contaminación Hídrica Del Río Moche En Las Provincias Del Departamento De La Libertad.
- Jordán López, A. (2005). *Manual de Edafología*. Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola de la Universidad de Sevilla. <https://avdiaz.files.wordpress.com/2008/08/suelo-completo.pdf>
- López Peinado, A., Pérez Mayoral, M., & Rojas Cervantes, M. L. (2020). *Introducción a los compuestos de coordinación y organometálicos*. Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- Marrero Levi. (1981). Los Ríos y Los Lagos. En *La Tierra y sus Recursos*. Cultural Venezolana S.A.
- MINAM. (2017, junio 7). Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias DECRETO SUPREMO N° 044-2017-MINAM. Diario Oficial El Peruano. <https://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-supremo-n-004-2017-minam/>
- MOL LABS LTDA. (2017, julio). Ficha Técnica Sodio Hidróxido 0.1 N. Quios SAS. <https://www.quios.com.co/wp-content/uploads/2017/07/SOLUCION-SODIO-HIDROXIDO-0.1N.pdf>
- Montalvan, C. (2021, enero 14). *Articulan acuerdos para remediación de contaminación del río Moche*. [Blog] Prensa Total. <https://www.prensatotal.com/articulan-acuerdos-para-remediation-de-contaminacion-del-rio-moche/>
- ONERN. (1973). *Inventario, Evaluación y uso racional de los recursos naturales de la Costa*. ANA. <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/980>
- Ortiz Uribe, F. G. (2004). *Diccionario de Metodología de la Investigación Científica*. Editorial Limusa, S.A.

- Pérez, J. A., Noguera, Y., & Paricaguán, M. B. (2017). Evaluación de agentes solidificantes en el proceso estabilización/solidificación aplicada a lodos químicos. *Revista Ingeniería*, 24(3).
- Rojas Reyes, N. R., Echeverry Vargas, L., & Sierra Pérez, S. (2018). Termo-cinética de la lixiviación de plomo a partir de baterías recicladas. *Ingeniería y Desarrollo*, 36(1), 155–171.
- San Fabian, E. (2023). *Química Cuántica y Espectroscopía*. Universidad de Alicante.
- SEDALIB S.A. (2018). *Diagnóstico Hídrico Rápido de la Cuenca del Río Moche como Fuente de Agua Y Servicios Ecosistémicos Hídricos para la EPS SEDALIB S.A.* Sedalib S.A. <http://sedalib.com.pe/upload/drive/32019/20190305-5683862528.pdf>
- Sundman, O. (2008). *Cation adsorption properties of substituted kraft fibres – an experimental and thermodynamic modelling study*. Umeå University. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:142326/FULLTEXT01.pdf>
- Tapia Yépez, X. P. (2017). *Aplicación de las reacciones de Quelación para disminuir la Contaminación por Metales Pesados en los Sedimentos de la Laguna de Limoncocha*. Universidad Internacional SEK.
- Ventura Lázaro, C., Brito Manzano, N. P., Vargas Falcón, P. M., Gómez Vázquez, A., & Bernat Rodríguez, J. (2021). Cadmio, Plomo y Zinc en el ostión *Crassostrea virginica* de la Laguna El Carmen, Tabasco, México. *Brazilian Journal of Animal and Environment Research*, 4(4), 5372–5981.
- Villa, L. C., Saldarriaga Agudelo, W., & Rojas, N. R. (2018). Estudio termodinámico de la lixiviación de plomo reciclado con citrato de sodio. *Ciencia en Desarrollo*, 9(2), 119–126. <http://www.scielo.org.co/pdf/cide/v9n2/0121-7488-cide-9-02-119.pdf>

Vimbert, R. (2012). *¡Esos pesados metales!: La acción quelante de los nutrientes*. Masterclass Solgar. <https://eshealth.eu/documents/EsosMetalesPesadosDr.ROBERTOVIMBERT.pdf>

Walco S.A. (1997). *Quelatación. La Teoría de los Ligandos*.



Religación

Press

Ideas desde el Sur Global



Religación
Press

ISBN: 978-9942-664-03-7

