

Universidad Católica de Santa María
Facultad de Ciencias e Ingenierías Biológicas y Químicas
Escuela Profesional de Medicina Veterinaria y Zootecnia



**Determinación de la presencia de metales pesados en muestras provenientes
de palomas de Castilla (*Columba livia*) para monitoreo biológico de
contaminación ambiental mediante biocentinelas en la ciudad de
Arequipa, 2025**

Tesis presentada por el Bachiller:

Light Rodriguez, Nicholas

ORCID: 0009-0003-7893-7776

para optar el Título Profesional de Médico Veterinario y Zootecnista

Asesora:

Dra. Roman Coyla, Veronica Marianella

ORCID: 0000-0002-4398-0729

Arequipa - Perú

2026

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 19 de Noviembre del 2025

Dictamen: 012456-C-EPMVZ-2025

Visto el borrador del expediente 012456, presentado por:

2018185231 - LIGHT RODRIGUEZ NICHOLAS

Titulado:

DETERMINACIÓN DE LA PRESENCIA DE METALES PESADOS EN MUESTRAS PROVENIENTES DE PALOMAS DE CASTILLA (COLUMBA LIVIA) PARA MONITOREO BIOLÓGICO DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE BIOCENTINELAS EN LA CIUDAD DE AREQUIPA, 2025

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Título Profesional/Título de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

MÉDICO VETERINARIO Y ZOOTECNISTA

**16423061 - FERNANDEZ FERNANDEZ FERNANDO ALBERTO
DICTAMINADOR**



**29729675 - ZUÑIGA VALENCIA ELOISA GABRIELA
DICTAMINADOR**



**42960827 - MEDINA ESCALANTE CYNTHIA KARIN
DICTAMINADOR**



Determinación de la presencia de metales pesados en muestras provenientes de palomas de Castilla (Columba livia) para monitoreo biológico de contaminación ambiental mediante bioceñtinelas en la ciudad

INFORME DE ORIGINALIDAD

16%

INDICE DE SIMILITUD

14%

FUENTES DE INTERNET

7%

PUBLICACIONES

5%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Católica de Santa María	2%
	Trabajo del estudiante	
2	purl.org	1%
	Fuente de Internet	
3	mail.ues.edu.sv	1%
	Fuente de Internet	
4	repositorio.upsc.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
5	Ravelo, Alberto Santiago Gutierrez. "Estudio del Contenido de Metales Pesados Toxicos, Trazas, Esenciales Y Macronutrientes en Peces de la Costa de Tenerife", Universidad de La Laguna (Canary Islands, Spain), 2022	1%
	Publicación	
6	issuu.com	1%
	Fuente de Internet	

Dedicatoria

A mi familia, por ser mi pilar más firme. Especialmente mi abuelo Julio que me guio con su ejemplo.

A ustedes, que me enseñaron a luchar con constancia, a no rendirme ante las dificultades y a confiar en el valor del esfuerzo honesto. Este logro es también suyo, porque cada paso que he dado ha sido sostenido por su amor incondicional, sus consejos silenciosos y su ejemplo de vida.

A mis maestros y docentes, por haber encendido la chispa de la curiosidad científica, por desafiarme a pensar críticamente y por transmitirme la pasión por el conocimiento.

Y, sobre todo, a mis perros.



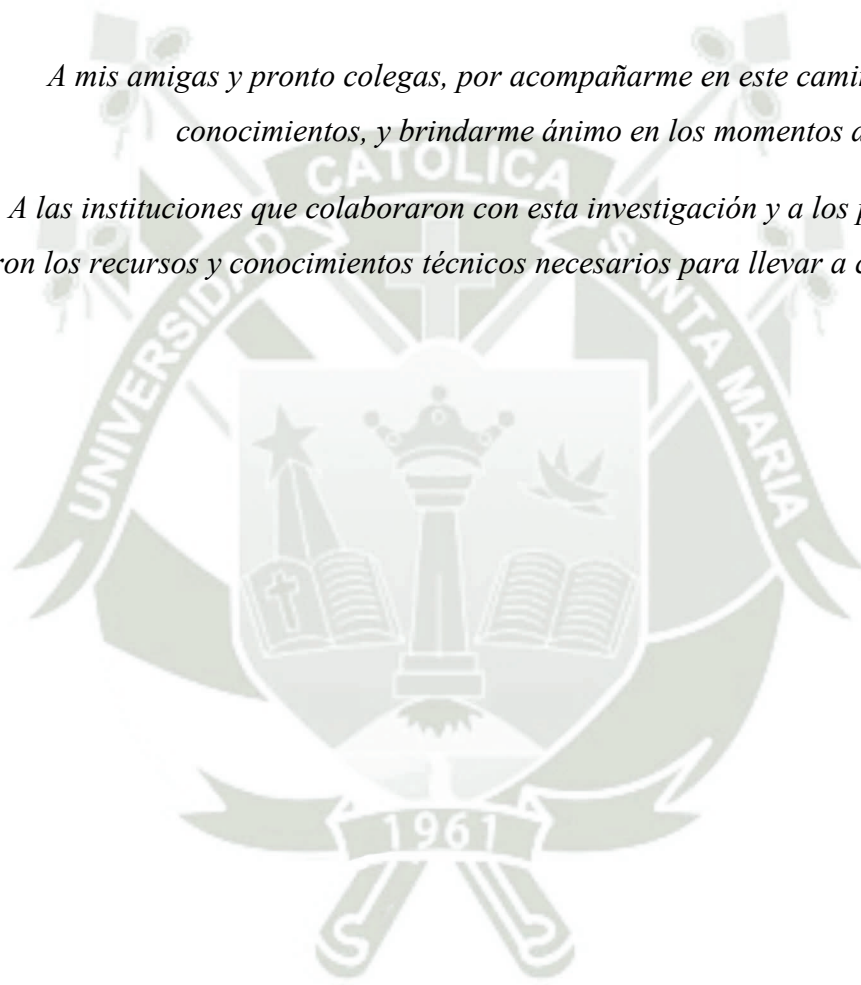
Agradecimientos

A mi familia, por su apoyo incondicional, comprensión y amor constante. Gracias por confiar en mí incluso en los días en que yo dudaba de mis propias capacidades.

A mi asesora de tesis, por su orientación precisa, su paciencia y su compromiso con la calidad académica de este trabajo. Gracias por cada sugerencia, corrección y palabra de aliento.

A mis amigas y pronto colegas, por acompañarme en este camino, compartir sus conocimientos, y brindarme ánimo en los momentos de mayor presión.

A las instituciones que colaboraron con esta investigación y a los profesionales que facilitaron los recursos y conocimientos técnicos necesarios para llevar a cabo este estudio.



RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo determinar la presencia de contaminación por metales pesados (arsénico, plomo, cadmio, zinc y mercurio) en palomas de Castilla (*Columba livia*) empleándolas como centinelas biológicas para el monitoreo ambiental en diversos distritos de la región Arequipa durante los primeros meses del 2025. Para ello, se recolectaron muestras de tejido hepático, muscular y óseo de un total de 20 palomas distribuidas equitativamente en los distritos de Cercado, Cerro Colorado, Tiabaya y Chivay. Las muestras fueron analizadas mediante espectroscopía de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES), siguiendo los protocolos establecidos por el laboratorio acreditado.

Los resultados mostraron que el arsénico estuvo presente de forma uniforme en todos los distritos evaluados, con valores constantes en el límite de cuantificación del método (3,00 mg/kg). El plomo mostró niveles más elevados en los distritos de Cercado y Chivay, alcanzando concentraciones máximas de hasta 23,70 mg/kg en este último. El mercurio presentó niveles bajos y homogéneos en la mayoría de zonas, con una ligera elevación en Cerro Colorado. En cuanto al zinc, se evidenció una alta concentración y dispersión en todos los distritos, siendo el metal más abundante, con valores máximos de hasta 189,97 mg/kg. El cadmio presentó niveles bajos en Cercado, Cerro Colorado y Tiabaya, pero mostró una acumulación significativa en Chivay, con valores que alcanzaron los 3,00 mg/kg.

Se concluye que *Columba livia* constituye una especie adecuada para el biomonitoreo ambiental en la ciudad de Arequipa, permitiendo identificar zonas con mayor carga de contaminación metálica, especialmente en relación al plomo y cadmio en el distrito de Chivay. La técnica empleada demostró ser eficaz para detectar variaciones en la bioacumulación de metales pesados en función del entorno urbano y rural. Se recomienda fortalecer el monitoreo en zonas de riesgo y utilizar estos resultados como base para políticas de gestión ambiental.

Palabras clave: Metales pesados, paloma de Castilla, centinelas biológicas.

ABSTRACT

This study aimed to determine the presence of heavy metal contamination (arsenic, lead, cadmium, zinc, and mercury) in rock pigeons (*Columba livia*) by using them as biological sentinels for environmental monitoring across various districts in the Arequipa region during the first months of the year 2025. Tissue samples—including liver, muscle and bone—were collected from a total of 20 pigeons, evenly distributed among the districts of Cercado, Cerro Colorado, Tiabaya, and Chivay. The samples were analyzed using inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES), following protocols established by an accredited laboratory.

Results showed that arsenic was uniformly present across all evaluated districts, consistently at the quantification limit of the method (3.00 mg/kg). Lead concentrations were higher in Cercado and Chivay, reaching up to 23.70 mg/kg in the latter. Mercury levels were low and homogeneous in most areas, with a slight elevation in Cerro Colorado. Zinc was the most abundant metal detected, exhibiting high concentration and variability across all districts, with maximum levels reaching 189.97 mg/kg. Cadmium levels remained low in Cercado, Cerro Colorado, and Tiabaya, but a significant accumulation was observed in Chivay, with values reaching up to 3.00 mg/kg.

It is concluded that *Columba livia* is a suitable species for environmental biomonitoring in the city of Arequipa, effectively identifying zones with a higher burden of metal contamination—particularly lead and cadmium in the district of Chivay. The applied analytical technique proved effective in detecting variations in heavy metal bioaccumulation based on urban and rural environmental conditions. Strengthened monitoring in high-risk areas is recommended, using these findings to inform environmental management policies.

Keywords: Heavy metals, rock pigeon, biological sentinels.

ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO TEÓRICO..... 2

1. DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA..... 3

1.1. Enunciado del problema 3

1.2. Descripción del problema..... 3

1.3. Justificación 4

2. OBJETIVOS 6

2.1. Objetivo general 6

2.2. Objetivos Específicos 6

3. MARCO TEÓRICO..... 7

3.1. Conceptos Básicos..... 7

3.1.1. Palomas de Castilla 7

3.1.2. Centinelas biológicos 11

3.1.3. Contaminación por metales pesados 12

3.1.4. Contaminación por metales pesados 18

3.2. Revisión de antecedentes investigativos..... 27

4. HIPÓTESIS..... 29

CAPÍTULO II PLANTEAMIENTO OPERACIONAL 30

1. TÉCNICAS, INSTRUMENTOS Y MATERIALES DE VERIFICACIÓN..... 31

1.1. Técnicas 31

1.2. Instrumentos 31

1.3. Materiales de verificación 31

1.3.1. Material biológico 31

1.3.2. Materiales de laboratorio..... 31

1.3.3. Materiales de campo..... 31

1.3.4. Materiales de escritorio 32

1.3.5. Equipos..... 32

1.3.6. Otros materiales.....	32
2. CAMPO DE VERIFICACIÓN	32
2.1. Ámbito.....	32
2.2. Unidades de estudio.....	32
2.2.1. Universo	33
2.2.2. Muestra.....	33
2.2.3. Procedimiento de muestreo	33
2.2.4. Métodos de evaluación.....	34
2.3. Temporalidad.....	34
3. ESTRATEGIAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	35
3.1. Organización.....	35
3.2. Recursos.....	35
3.3. Evaluación Estadística.....	35
3.4. Análisis estadístico	36
3.5. Financiamiento	36
CAPÍTULO III RESULTADOS	37
CONCLUSIONES	70
RECOMENDACIONES	71
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Taxonomía de la Paloma de Castilla	7
Tabla 2. Clasificación de los metales pesados	13
Tabla 3. Metodologías para la determinación de metales pesados en muestras biológicas clasificadas en base a la propiedad del analito que miden.....	15
Tabla 4. Efectos de la exposición crónica a mercurio	22
Tabla 5. Identificación de las muestras	33
Tabla 6. Diseño no-experimental	35
Tabla 7. Niveles de arsénico, plomo, cadmio, zinc y mercurio en muestras de tejido hepático, muscular, óseo y sanguíneo provenientes de palomas de Castilla (<i>Columba livia</i>) Medel Cercado de Arequipa mediante espectroscopía para monitoreo biológico de contaminación ambiental por bio-centinelas	38
Tabla 8. Niveles de arsénico, plomo, cadmio, zinc y mercurio en muestras de tejido hepático, muscular, óseo y sanguíneo provenientes de palomas de Castilla (<i>Columba livia</i>) Medel de Cerro Colorado mediante espectroscopía para monitoreo biológico de contaminación ambiental por bio-centinelas	41
Tabla 9. Niveles de arsénico, plomo, cadmio, zinc y mercurio en muestras de tejido hepático, muscular, óseo y sanguíneo provenientes de palomas de Castilla (<i>Columba livia</i>) Medel de Tiabaya mediante espectroscopía para monitoreo biológico de contaminación ambiental por bio-centinelas.....	44
Tabla 10. Niveles de arsénico, plomo, cadmio, zinc y mercurio en muestras de tejido hepático, muscular, óseo y sanguíneo provenientes de palomas de Castilla (<i>Columba livia</i>) Medel de Chivay mediante espectroscopía para monitoreo biológico de contaminación ambiental por bio-centinelas.....	47
Tabla 11. Niveles de arsénico en muestras de tejido hepático, muscular, óseo y sanguíneo provenientes de palomas de Castilla (<i>Columba livia</i>) Medel mediante espectroscopía para monitoreo biológico de contaminación ambiental por bio-centinelas	50
Tabla 12. Niveles de plomo en muestras de tejido hepático, muscular, óseo y sanguíneo provenientes de palomas de Castilla (<i>Columba livia</i>) Medel mediante espectroscopía para monitoreo biológico de contaminación ambiental por bio-centinelas	53

Tabla 13. Niveles de mercurio en muestras de tejido hepático, muscular, óseo y sanguíneo provenientes de palomas de Castilla (<i>Columba livia</i>) Medel mediante espectroscopía para monitoreo biológico de contaminación ambiental por bio-centinelas	56
Tabla 14. Niveles de zinc en muestras de tejido hepático, muscular, óseo y sanguíneo provenientes de palomas de Castilla (<i>Columba livia</i>) Medel mediante espectroscopía para monitoreo biológico de contaminación ambiental por bio-centinelas	59
Tabla 15. Niveles de cadmio en muestras de tejido hepático, muscular, óseo y sanguíneo provenientes de palomas de Castilla (<i>Columba livia</i>) Medel mediante espectroscopía para monitoreo biológico de contaminación ambiental por bio-centinelas	62
Tabla 16. Niveles de arsénico en muestras de tejido hepático, muscular y óseo provenientes de palomas de Castilla (<i>Columba livia</i>) Medel mediante espectroscopía para monitoreo biológico de contaminación ambiental por bio-centinelas	65
Tabla 17. Niveles de plomo en muestras de tejido hepático, muscular y óseo provenientes de palomas de Castilla (<i>Columba livia</i>) Medel mediante espectroscopía para monitoreo biológico de contaminación ambiental por bio-centinelas	66
Tabla 18. Niveles de mercurio en muestras de tejido hepático, muscular y óseo provenientes de palomas de Castilla (<i>Columba livia</i>) Medel mediante espectroscopía para monitoreo biológico de contaminación ambiental por bio-centinelas	67
Tabla 19. Niveles de zinc en muestras de tejido hepático, muscular y óseo provenientes de palomas de Castilla (<i>Columba livia</i>) Medel mediante espectroscopía para monitoreo biológico de contaminación ambiental por bio-centinelas	68
Tabla 20. Niveles de cadmio en muestras de tejido hepático, muscular y óseo provenientes de palomas de Castilla (<i>Columba livia</i>) Medel mediante espectroscopía para monitoreo biológico de contaminación ambiental por bio-centinelas	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Niveles de arsénico, plomo, cadmio, zinc y mercurio en muestras de tejido hepático, muscular, óseo y sanguíneo provenientes de palomas de Castilla (<i>Columba livia</i>) Medel Cercado de Arequipa mediante espectroscopía para monitoreo biológico de contaminación ambiental por bio-centinelas.....	40
Figura 2.	Niveles de arsénico, plomo, cadmio, zinc y mercurio en muestras de tejido hepático, muscular, óseo y sanguíneo provenientes de palomas de Castilla (<i>Columba livia</i>) Medel de Cerro Colorado mediante espectroscopía para monitoreo biológico de contaminación ambiental por bio-centinelas.....	43
Figura 3.	Niveles de arsénico, plomo, cadmio, zinc y mercurio en muestras de tejido hepático, muscular, óseo y sanguíneo provenientes de palomas de Castilla (<i>Columba livia</i>) Medel de Tiabaya mediante espectroscopía para monitoreo biológico de contaminación ambiental por bio-centinelas	46
Figura 4.	Niveles de arsénico, plomo, cadmio, zinc y mercurio en muestras de tejido hepático, muscular, óseo y sanguíneo provenientes de palomas de Castilla (<i>Columba livia</i>) Medel de Chivay mediante espectroscopía para monitoreo biológico de contaminación ambiental por bio-centinelas	49
Figura 5.	Niveles de arsénico en muestras de tejido hepático, muscular, óseo y sanguíneo provenientes de palomas de Castilla (<i>Columba livia</i>) Medel mediante espectroscopía para monitoreo biológico de contaminación ambiental por bio-centinelas	52
Figura 6.	Niveles de plomo en muestras de tejido hepático, muscular, óseo y sanguíneo provenientes de palomas de Castilla (<i>Columba livia</i>) Medel mediante espectroscopía para monitoreo biológico de contaminación ambiental por bio-centinelas	55
Figura 7.	Niveles de mercurio en muestras de tejido hepático, muscular, óseo y sanguíneo provenientes de palomas de Castilla (<i>Columba livia</i>) Medel mediante espectroscopía para monitoreo biológico de contaminación ambiental por bio-centinelas	58
Figura 8.	Niveles de zinc en muestras de tejido hepático, muscular, óseo y sanguíneo provenientes de palomas de Castilla (<i>Columba livia</i>) Medel mediante	

espectroscopía para monitoreo biológico de contaminación ambiental por bio-centinelas.....	61
Figura 9. Niveles de cadmio en muestras de tejido hepático, muscular, óseo y sanguíneo provenientes de palomas de Castilla (<i>Columba livia</i>) Medel mediante espectroscopía para monitoreo biológico de contaminación ambiental por bio-centinelas	64
Figura 10. Locaciones de toma de muestra dentro de la ciudad de Arequipa	78
Figura 11. Locación de toma de muestras fuera de la ciudad de Arequipa	78
Figura 12. Captura de palomas en el distrito de Cerro Colorado. Imagen propia, 2025	84
Figura 13. Captura de palomas en el distrito de Tiabaya. Imagen propia, 2025	84
Figura 14. Captura de palomas en el distrito de Cercado (Plaza Central). Imagen propia, 2025	85
Figura 15. Enfoque de la trampa empleada para la captura. Imagen propia, 2025.....	85
Figura 16. Marcaje de las palomas capturadas. Imagen propia, 2025	86
Figura 17. Captura de palomas en el distrito de Chivay (Plaza Central). Imagen propia, 2025	86
Figura 18. Necropsia para toma de muestras. Imagen propia, 2025.....	87
Figura 19. Eutanasia de los especímenes recopilados. Imagen propia, 2025	87
Figura 20. Muestras rotuladas. Imagen propia, 2025	88
Figura 21. Almacenamiento de muestras para envío a laboratorio. Imagen propia, 2025	88

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Mapas de ubicación.....	78
Anexo 2. Dictamen favorable por parte del Comité de Ética de Investigación de la UCSM.....	79
Anexo 3. Matriz de datos	82
Anexo 4. Secuencia fotográfica	84
Anexo 5. Informe y certificación de laboratorio.....	89



INTRODUCCIÓN

La contaminación ambiental por metales pesados representa una de las principales amenazas emergentes para la salud pública y la estabilidad de los ecosistemas urbanos en todo el mundo. A diferencia de otros contaminantes, los metales pesados como el plomo (Pb), cadmio (Cd), mercurio (Hg), arsénico (As) y zinc (Zn) no se degradan fácilmente en el ambiente, por lo que tienden a acumularse en los suelos, cuerpos de agua, organismos vivos y cadenas tróficas, generando efectos tóxicos a largo plazo tanto en fauna como en seres humanos. Estos elementos tóxicos provienen, en gran medida, de fuentes antropogénicas como las emisiones vehiculares, actividades industriales, vertido de residuos y la combustión de combustibles fósiles.

La identificación de zonas contaminadas requiere métodos de vigilancia ambiental sensibles, accesibles y sostenibles. En este contexto, el uso de bioindicadores ha cobrado gran relevancia, siendo las aves urbanas —en particular la paloma doméstica (*Columba livia*)— uno de los organismos más utilizados para estos fines. Esta especie, ampliamente distribuida en áreas urbanas, presenta hábitos sedentarios, elevada tolerancia a condiciones ambientales adversas, y contacto constante con contaminantes presentes en el aire, suelo y agua, lo que la convierte en una centinela biológica ideal para evaluar la calidad ambiental urbana.

Diversos estudios internacionales han demostrado que *Columba livia* puede acumular metales pesados en sus tejidos, como hígado, riñones, músculos y plumas, reflejando así la exposición crónica a contaminantes presentes en su entorno. Esta capacidad de bioacumulación ha sido utilizada para establecer niveles de contaminación ambiental en zonas industriales, mineras y de alto tráfico vehicular. En países de América Latina, incluidos Perú, México, Colombia y Chile, investigaciones recientes han confirmado la utilidad de esta especie como herramienta de biomonitorio ambiental, generando evidencia que puede orientar políticas públicas de control ambiental y prevención en salud.

A nivel local, la ciudad de Arequipa presenta un crecimiento urbano acelerado y una creciente densidad vehicular, especialmente en distritos como Cerro Colorado, lo que incrementa el riesgo de contaminación atmosférica por partículas y metales pesados. Sin embargo, son escasos los estudios que han evaluado de manera sistemática la presencia de estos elementos tóxicos en fauna urbana, y menos aun los que han utilizado a *Columba livia* como bioindicador. Ante esta necesidad, se plantea la presente investigación con el objetivo de evaluar la bioacumulación de metales pesados en palomas urbanas del distrito de Cerro Colorado y analizar su utilidad como indicador del estado de contaminación ambiental de la zona.



CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO TEÓRICO

1. DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA

Los metales pesados son una fuente de contaminación ambiental, dado que al no ser degradable ni química ni biológicamente pueden permanecer en el ambiente muchos años, constituyendo un peligro para los seres vivos que entran en contacto con estos. Así también, se ha demostrado que su concentración en los organismos aumenta mientras son ingeridos, provocando degradación y muerte en caso de animales, y problemas de varios tipos como cáncer y problemas renales en los seres humanos (1).

Las aves han sido un foco de estudio bastante usado como indicador de monitoreo de interés ambiental, siendo la más idónea la paloma común (*Columbia livia*), en razón que es una especie que abunda en los radios urbanos, en poblaciones de mayor tamaño y que actualmente es una especie que no se considera como vulnerable desde una perspectiva conservacionista (2). Además, se debe considerar que esta especie ha sido un referente de bioindicador en la evaluación de metales pesados ya sea en sus plumas u otros tejidos en diversos estudios de investigación (2; 3; 4).

Dadas las razones expuestas, se plantea la factibilidad de determinar la presencia de contaminación por metales pesados (arsénico, plomo, cadmio, zinc y mercurio) en la ciudad de Arequipa empleando palomas bravías silvestres como centinelas biológicas recurriendo a la técnica de espectroscopía ICP OES para la evaluación de muestras de tejido muscular, óseo y sangres provenientes de la especie de estudio planteada.

1.1. Enunciado del problema

Determinación de la Presencia de Metales Pesados en Muestras Provenientes de Palomas Bravías (*Columba livia*) para Monitoreo Biológico de Contaminación Ambiental mediante Biocentinelas en la Ciudad de Arequipa, 2025.

1.2. Descripción del problema

La contaminación ambiental es un problema de escala mundial que continúa agravándose con el paso del tiempo y cuya solución no es ni simple, ni unívoca, ni factible considerando el panorama internacional actual (5). Dicho problema supone muchas veces una amenaza para la salud humana y animal, generando múltiples patologías que se asocian a distintos contaminantes y actividades que contribuyen a su expansión tales como la minería y el aumento desenfrenado de los censos vehiculares, particularmente en las ciudades y centros urbanos afines, donde se concentra la mayoría de la población mundial (6). Dentro de dichos centros urbanos las palomas domésticas

(*Columba livia*) son una de las especies más frecuentemente encontradas a nivel mundial. Por ese motivo, las palomas bravías son una especie que ha sido comúnmente utilizada como indicador de contaminación ambiental o como centinelas biológicos, lo que permite la detección y el monitoreo de la presencia de contaminantes en un determinado espacio geográfico (5). En nuestra región Sur, especialmente Arequipa, el crecimiento del parque automotor (6) y las actividades mineras que se realizan en zonas aledañas a esta contribuyen a un aumento de la contaminación por metales pesados localmente, lo que incide tanto en la salud humana como en el ecosistema y en la fauna urbana. Determinando la presencia de metales pesados en el organismo de estos animales silvestres, ampliamente expandidos por toda la ciudad, se puede llegar a concluir si es que existe contaminación por metales pesados en la ciudad de Arequipa, los cuales resultan nocivos para la salud de los pobladores locales.

El desarrollo de esta tesis buscó contribuir a determinar si es que la expansión del parque automotor y de la industria minera local se están dando de forma sostenible de tal forma que se puedan tomar las precauciones necesarias para salvaguardar la integridad física de los habitantes de la ciudad de Arequipa, todo esto empleando como centinelas biológicos a las palomas de Castilla, una especie de amplia distribución en la ciudad, en consecuencia, la determinación de la existencia de metales pesados en la misma, contribuirá a desarrollar estrategias para salvaguardar la salud de la población arequipeña.

1.3. Justificación

a) Aspecto general

El presente estudio buscó hacer posible que se logre determinar la idoneidad de emplear a las palomas bravías como centinelas biológicos para identificar la presencia de contaminación por metales pesados en la ciudad de Arequipa como se ha realizado previamente de forma eficaz en otras partes del mundo, pero no del mismo modo en el área de estudio, donde no existen investigaciones de esta índole realizadas con anterioridad en la misma que hayan sido publicados hasta la actualidad.

b) Aspecto tecnológico

Los resultados permitieron obtener información sobre la relevancia de las muestras de tejidos de músculo, hueso y sangre como fuentes para determinar depósitos de

metales pesados tanto en la especie de estudio como en otras especies silvestres en las cuales por motivos de conservación no sea posible la recopilación de muestras post-mortem.

Adicionalmente, se buscó comprobar la aptitud del método ICP OES como procedimiento para la detección de metales pesados en muestras biológicas provenientes de animales silvestres, al ser un procedimiento validado por el INACAL para muestras de alimento y productos agrícolas en el laboratorio de elección, así como en otros laboratorios similares a nivel nacional.

c) Aspecto social

La contaminación por metales pesados puede representar un peligro potencial para la población de Arequipa dado que existe una alta probabilidad que de acuerdo a los niveles identificados estos estén presentes también en organismos humanos, ayudando de este modo a plantear un método eficaz para la determinación temprana de contaminación ambiental potencialmente nociva para la salud de la población arequipeña y el ambiente de forma general.

d) Aspecto económico

Una alta concentración de niveles pesados en las palomas bravías representa un riesgo para el medio ambiente y la salud humana. Esto puede ser un gasto inesperado que puede afectar la economía local, dado que los gobiernos locales invierten cuantiosas sumas de dinero anualmente para la contingencia de problemas por contaminación aérea al ser un problema de Salud Pública que puede afectar a trabajadores de diversos sectores reduciendo su productividad. Por ello, el tener conocimiento de los datos y niveles de presencia de metales pesados en palomas bravías puede extrapolarse a otras especies como la humana, facilitando de tal modo la prevención y representando un aporte al cuidado del ambiente y a la salud pública. De igual forma, la actividad minera representa (1) una parte importante de la economía local, por lo que es importante asegurarse de que esta se esté desarrollando de forma sostenible y amigable con las especies locales, de tal forma que pueda continuar teniendo lugar sin interrupción, lo que afectaría negativamente al capital regional (1).

e) **Importancia**

La posible detección de metales pesados en la ciudad de Arequipa implica que se identifique un riesgo latente tanto para la salud pública de los habitantes locales como para los animales, silvestres y domésticos, que se encuentran dentro de la ciudad y su periferia incluidos los animales de producción.

El monitoreo biológico de la contaminación ambiental es una técnica que facilita la conservación, puesto que se puede implementar fácilmente escogiendo como referencia una especie como la paloma de Castilla para toma de muestras que no requieran el sacrificio de los sujetos de prueba tales como músculo, sangre o hueso de animales muertos y de las cuales se determine su aptitud para dicho estudio de tal forma que se lleve a cabo un control similar en zonas donde habitan otras especies amenazadas o en peligro de extinción que no puedan ser sacrificadas durante el muestreo.

Los resultados obtenidos de esta investigación dan lugar a una revisión de la normativa local en materia de control de polución ambiental tanto por el parque automotor como por las actividades mineras colindantes, poniendo de manifiesto la importancia de un control estricto de la misma para la mantención de la salud de los pobladores de la ciudad de Arequipa.

2. **OBJETIVOS**

2.1. **Objetivo general**

Determinar la presencia de contaminación por metales pesados (arsénico, plomo, cadmio, zinc y mercurio) empleando palomas bravías silvestres (*Columba livia*) como centinelas biológicos recurriendo a la técnica de espectroscopía ICP OES para la evaluación de muestras de tejido hepático, muscular y sanguíneo provenientes de la especie de estudio planteada.

2.2. **Objetivos Específicos**

- Identificar los niveles de arsénico, plomo, cadmio, zinc y mercurio en muestras de tejido hepático, muscular, óseo y sanguíneo provenientes de palomas de Castilla (*Columba livia*) mediante espectroscopía para monitoreo biológico de contaminación ambiental por bio-centinelas.
- Determinar la diferencia en los niveles detectados de metales pesados en las muestras en relación al lugar de procedencia de las mismas.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Conceptos Básicos

3.1.1. Palomas de Castilla

a) Características de la especie

- Taxonomía

Tabla 1.
Taxonomía de la Paloma de Castilla

Clase	Columbidae
Orden	Columbiformes
Familia	Columbidae
Género	<i>Columba</i>
Especie	<i>Columba livia</i>

* Tomado de Rafiq, H et al., 2020 (2; 7).

- Características fisio-anatómicas relevantes

Su plumaje es esencialmente gris, aunque puede presentar una amplia gama de coloraciones que varían desde el blanco, el negro hasta el marrón debido al cruzamiento con otras especies de palomas como las palomas mensajeras y de exhibición (8). Existe una evidente dimorfia de género que ocasiona que los machos sean de mayor tamaño que las hembras y más robustos en comparación, presentando plumas verdeazuladas y/o moradas en la región cervical. Igualmente, los machos muestran una hipertrofia de la cera en las narinas. El pico de machos y hembras es carnoso y presenta un gancho en la parte superior que lo asemeja al de algunas aves raptoras (8). Los pichones presentan un plumón en mechones ásperos al tacto y de coloración amarilla y son alimentados con la leche de buche. Las hembras colocan 1 o 2 huevos, los cuales poseen una apariencia elipsoidal y eclosionan pasados los 18 días del periodo de apareamiento (entre 7 a 13 días) (9). Las palomas bravías son consideradas adultas a las 6 semanas de vida, edad en la cual dejan en nido familiar. Poseen un gran buche donde almacenan el alimento que van ingiriendo y que se encuentra adaptado para producir leche de buche que es empleada para alimentar a

los pichones gracias a la hipertrofia del revestimiento. Su molleja es igualmente grande y está bien desarrollada (8).

No poseen una vena yugular que pueda definirse como tal, sino que presentan un plexo venoso de difícil acceso mediante venopunción, la cual se complica además debido a que en el lado derecho del cuello carecen de arterias (8).

- **Características etológicas relevantes**

Como es el caso con muchas aves, se trata de una especie monógama. La reproducción ocurre todo el año, particularmente en ambientes donde existe poca variación climática a lo largo del año. En zonas no urbanas la anidación puede ocurrir en el suelo (8), pero en zonas urbanas esta suele tener lugar en espacios elevados y apartados tales como copas de árboles o los techos de edificaciones diversas. Las crías son altriciales. El macho suele proteger a su hembra y a su cría, siendo el cuidado de esta responsabilidad de ambos progenitores (10). Se trata de una especie granívora que puede incluir hojas en su dieta (8).

Si bien se trata de una especie originariamente silvestre, su ubicuidad y el hecho de que se encuentran en contacto constante con los seres humanos, con los que interactúa frecuentemente, han dado lugar a que alcance cierto grado de domesticación y dependencia del ser humano, particularmente en el ámbito urbano, donde depende en gran medida de los desechos humanos para su subsistencia (9).

Se trata de una especie altamente adaptable con la capacidad de colonizar hábitats novedosos. Su comportamiento es gregario y optan por el sedentarismo, siendo que tienden a no alejarse más de un radio de 6 kilómetros alrededor del centro de anidación, es en dicho radio que se desplazan en busca de alimento buscando, por ejemplo, áreas aledañas a la ciudad donde se lleven a cabo actividades agrarias o se encuentren puertos o vías de tren donde puedan encontrar desechos para alimentarse (11).

b) **Situación global de la especie**

- **Distribución**

Columba livia es una especie de ave proveniente de los continentes de África y Eurasia (3), habiendo sido introducida en otras partes del mundo se trata de una de las especies de paloma más ampliamente extendida a nivel mundial en la actualidad, particularmente en zonas urbanas y sus periferias (4). Se la encuentra en casi toda

Europa, incluidas las Islas Británicas, La región occidental de Asia y China, África y la mayor parte del continente americano, incluido Perú (3).

- **Estado de conservación**

Se trata de una especie no amenazada según la IUCN (5). Debido a su gran adaptabilidad a los medios urbanos donde las condiciones ambientales favorables y la gran cantidad de fuentes de alimento que estos les ofrecen, así como la falta de depredadores, se puede encontrar gran densidad poblacional de estas aves en diferentes países (4). Se la ha llegado a considerar una especie invasora e incluso una peste en algunos lugares, como en la Isla Galápagos, donde se toman acciones para reducir su población activamente (6).

c) **Situación de la especie en Perú y local**

Se trata de una especie introducida, no nativa de nuestro país. Su introducción tuvo lugar hace poco más de 520 años por parte de los colonizadores españoles (3).

- **Distribución**

Se la encuentra en las tres regiones geográficas consideradas tradicionalmente en el Perú, es decir, Costa, Sierra y Selva. Se la encuentra en hábitats a alturas variadas dentro del rango de 0 a 4 mil metros sobre el nivel del mar (3). Anida en climas y ambientes tan variados como los desiertos de la Costa, los valles interandinos y las vertientes occidental y oriental, incluyendo en esta última las selvas baja y alta.

- **Estado de conservación y marco legal para su control y captura**

Se trata de una especie que forma parte de la fauna silvestre peruana actual, si bien como especie introducida. Su gran número y distribución han hecho que se la llegue a considerar una especie plaga desde que impactan negativamente a la salud pública. La resolución ministerial número 699 emitida en el 2014 por el MINSA publicó el “Manual para la Vigilancia, Prevención y Control Sanitario de Agentes Zoonóticos y Zoonosis relacionados a la Paloma Doméstica” donde se incluyen lineamientos para el control sanitario de las palomas bravías en nuestro país. Igualmente, ciertos municipios cuentan con normativas propias al respecto (7).

La página oficial de Gobierno Peruano indica que al no ser una especie protegida o en estado vulnerable de conservación se puede solicitar bien a los gobiernos locales o bien a las Autoridades Regionales de Flora y Fauna Silvestre (ARFFS) una

autorización para realizar estudios o trabajos de investigación que involucren a las palomas bravías (8).

d) Impacto en la Salud y Gestión Pública

- Consecuencias económicas y culturales

Las palomas bravías construyen sus nidos en edificaciones de todo tipo, donde se posan y defecan, esto conlleva en muchos casos al deterioro de la infraestructura de edificios modernos o construcciones antiguas de valor histórico-cultural (3).

- Consecuencias sobre la salud humana y animal

Las palomas bravías son potencialmente peligrosas para la salud humana en cuanto pueden constituir un medio de transmisión de zoonosis. Se ha comprobado que las palomas pueden constituir una fuente de infecciones de tipo viral, fúngico o bacteriano, así como ser portadoras de ectoparásitos que pueden afectar al hombre (3).

Igualmente, las palomas pueden transmitir enfermedades de forma horizontal a tanto a aves domésticas, tales como mascotas y aves de producción para el consumo humano, así como a otras aves silvestres (3).

e) Captura, transporte y toma de muestras

La toma de muestras de sangre debe realizarse en las venas ulnar o metatarsal medial, debido a la mencionada carencia de vena yugular como tal y de arterias en la región cervical derecha. Se debe realizar el muestro con sumo cuidado y evitando ejercer un exceso de presión negativa mientras se está colectando la sangre. Para facilitar la hemostasia posterior a la toma de la muestra, ya que esta puede complicarse, se recomienda calmar al ave para disminuir su presión sanguínea introduciéndola en una caja oscura. Si la presión no es suficiente para lograr la hemostasia se puede recurrir a adhesivos tisulares para este propósito (9).

Son muy fuertes voladores por lo que dependen de esta habilidad para poder escapar y alcanzar sus lugares de descanso o anidación, por lo que los intentos por capturarlas deben evitar que puedan volar, siendo recomendable el empleo de redes o mallas como alternativa más viable para su captura (10).

La administración intravenosa a través de las venas ulnar o metatarsal medial de pentobarbital es el método más recomendado para llevar a cabo la eutanasia en esta especie. La administración intrahepática puede ser otra opción. El ave debe haber sido previamente sedada o anestesiada (11).

3.1.2. Centinelas biológicos

a) Antecedentes históricos

Durante el siglo XIX y hasta comienzos del siglo XX en algunos países se seguía la costumbre de ingresar a las minas de carbón llevando canarios enjaulados los cuales se empleaban para la detección de gases tóxicos y de ese modo controlar los riesgos de intoxicación para los mineros (12). Del mismo modo, a mediados del siglo XX se observaba en las costas de Japón la reacción de los gatos tras consumir pescado contaminado con mercurio (13). A finales del siglo XX se postulaba que las anomalías observadas en los procesos reproductivos de peces, aves y reptiles debido a la presencia de químicos con acción disruptiva sobre el sistema endocrino en el ambiente podría ser un indicativo de la acción de estos mismos químicos sobre la salud humana (14).

b) Definición

También denominados biomonitores. Se trata de una especie que se emplea, generalmente en ecología y conservacionismo, con la finalidad de determinar la salud de un ecosistema determinado del que esta forma parte, de tal modo que se pueda inferir el estado de salud de las otras especies que forman parte de dicho ecosistema y son susceptibles de sufrir consecuencias similares o equiparables por la exposición conjunta a un factor de riesgo determinado, como por ejemplo un contaminante (15). Las especies que se emplean con centinelas biológicos no son solo animales, sino que pueden ser plantas, algas, hongos, entre otros.

c) Ventajas y aplicaciones

Los centinelas biológicos no solo sirven para determinar la presencia de un determinado contaminante en el ambiente, sino que además permiten estudiar los efectos que dicho contaminante pueda tener sobre organismos vivos. Es así que los centinelas biológicos pueden ser integrados en programas de monitoreo biológico, en los cuales, idealmente, se lleva a cabo una comparación entre los resultados

obtenidos en un lugar contaminado y los que se pueda obtener de animales de la misma especie en un lugar no contaminado (grupo control), de modo que se pueda obtener resultados que arrojen respuestas sobre los efectos de la exposición prolongada y en determinadas concentraciones a un contaminante específico (16).

d) Uso de aves como centinelas biológicas para monitoreo de contaminación ambiental

Las aves han sido reconocidas como excelentes centinelas biológicas debido a características tales como el hecho de que son especies de amplia extensión que están expuestas a los factores de contaminación ambiental en función a su ecología y etología, las cuales han sido ampliamente estudiadas en la mayoría de especies, hecho que facilita su incorporación en programas basados en el monitoreo biológico. De igual forma, sus organismos acumulan contaminantes en niveles que son correlacionables a los del contaminante en el medio, siendo aptas para el estudio de metales bioacumulables y magnificables biológicamente como el mercurio (17).

e) Distinción entre centinelas biológicas y biomarcadores

Los biomarcadores son las respuestas de los organismos de las muestras tomadas de la especie centinela que se emplean como método para determinar la presencia del contaminante en el organismo. Los químicos y otros tipos de contaminantes desencadenan respuestas fisiológicas cuantificables y en algunos casos específicas que pueden ser atribuibles a una relación exposición-respuesta, por ejemplo, la presencia de un metabolito determinado en el organismo de un ser vivo puede indicar una exposición temprana a un contaminante bioquímico. El tipo de metabolito variará en función al contaminante específico (14).

3.1.3. Contaminación por metales pesados

a) Definición

Los metales pesados son aquellos elementos de la tabla periódica que son densos (densidad mayor a 5g x cm^3) y poseen una masa atómica dentro del rango de 60 a 200. Los metales pesados no son biodegradables (18). Esto incluye a una gama de metales y metaloides que poseen, comparativamente, una densidad más elevada al resto, por lo que pueden resultar dañinos incluso en concentraciones muy pequeña (14).

Para determinar el momento en que los metales pesados se tornan contaminantes hay que considerar su concentración y el medio en el que se encuentra. Si su concentración excede la considerada como tolerable para la salud humana y otros organismos en un medio determinado, como agua, por ejemplo, entonces estamos hablando de un caso de contaminación por metales pesados. En ciertas situaciones el mínimo requerido puede ser la más ínfima traza. Hay que considerar además que se puede clasificar a los metales pesados en aquellos que no son esenciales, no siendo necesarios para la vida, mientras que los hay aquellos que pueden ser denominados como metales esenciales, puesto que son necesarios, si bien en concentraciones pequeñas, para el correcto funcionamiento del organismo, siendo absorbidos tras su ingesta (19). Estos últimos son catalogados como macro o microminerales dependiendo de la cantidad en la cual son requeridos para la subsistencia a través de la dieta, siendo los primeros requeridos en mayores concentraciones que los segundos. Por otro lado, los metales pesados tóxicos pueden subdividirse en: 1) preciosos, cuando su valorización en función a uso que se le da es elevada, 2) extremadamente tóxicos, cuando son letales incluso en concentraciones mínimas y 3) radionúclidos, que tienen la cualidad de emitir radiación por lo que la exposición a los mismo puede dañar a las células y contribuir al desarrollo de cáncer. Esta categorización se resume en la tabla 2 incluidos ejemplos para cada una de las categorías descritas:

Tabla 2.
Clasificación de los metales pesados

No esenciales			Esenciales	
Muy tóxicos	Preciosos	Radionúclidos	Micronutrientes	Macronutrientes
As, Cd, Hg, Pb, Se, Sn, Tl	Au, Ag, Pd, Pt, Ru	Am, Pr, Ra, Th, U	Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Zn	Ca, K, Mg

* Tomado de Adaptada de Waleed, J & Mohammed, H. 2023 (20).

b) Bioacumulación en muestras biológicas

La bioacumulación es un proceso mediante el cual los organismos vivos incorporan en sus tejidos sustancias químicas presentes en el ambiente, incluyendo metales pesados, a una velocidad superior a la que son capaces de eliminarlas. Esta

acumulación ocurre a lo largo del tiempo y puede tener efectos nocivos tanto para el organismo que los acumula como para otros organismos que forman parte de la cadena trófica. Los metales pesados, al no ser biodegradables ni transformables metabólicamente en compuestos inocuos, tienden a persistir en los tejidos, lo que representa una amenaza significativa para la salud animal, humana y para la estabilidad de los ecosistemas en general (21).

La acumulación de metales pesados en los tejidos biológicos puede ocurrir por exposición directa al medio contaminado, ya sea a través del agua, aire o suelo, o por el consumo de alimento contaminado. Las principales vías de entrada al organismo son la ingestión, la inhalación y, en menor medida, la absorción dérmica. Una vez ingresan al organismo, estos metales pueden distribuirse hacia diferentes órganos y sistemas dependiendo de sus propiedades químicas, afinidad biológica y mecanismos de transporte celular. En las aves, por ejemplo, los metales tienden a acumularse en el hígado, los riñones, los músculos, los huesos y la sangre, siendo estos tejidos los más comúnmente utilizados para su análisis en estudios de monitoreo ambiental (22).

La bioacumulación no solo está relacionada con la exposición a una fuente de contaminación puntual, sino que refleja una exposición crónica y sostenida en el tiempo, por lo que se considera una herramienta esencial para la evaluación del riesgo ambiental y sanitario. Los organismos centinelas como las aves urbanas (por ejemplo, *Columba livia*) permiten detectar contaminantes persistentes, ya que sus hábitos de alimentación, movilidad limitada y presencia permanente en áreas urbanas contaminadas las convierten en indicadores sensibles de la carga contaminante de un entorno determinado (23).

Distintos factores determinan la tasa y grado de bioacumulación, entre ellos: la especie del organismo, su edad, estado fisiológico, dieta, nivel trófico, metabolismo, tiempo de exposición y características fisicoquímicas del metal. Por ejemplo, el plomo tiene afinidad por los tejidos óseos, el mercurio por los lípidos del sistema nervioso y el arsénico por el hígado y riñones (24). En estudios realizados en aves silvestres y de vida urbana, se ha observado que los niveles de acumulación pueden variar significativamente incluso dentro de una misma especie, dependiendo del entorno geográfico, el grado de urbanización y las actividades industriales y mineras presentes en la zona (18).

Además, la bioacumulación puede intensificarse cuando el sistema de excreción del organismo no logra eliminar eficientemente los metales, ya sea por sobrecarga tóxica o por mecanismos de retención fisiológica. Esta situación es particularmente peligrosa cuando se considera la biomagnificación, es decir, el aumento progresivo de la concentración de un contaminante a medida que se asciende en la cadena alimentaria. Si bien este fenómeno se observa con mayor claridad en contaminantes lipofílicos como el mercurio orgánico (metilmercurio), también puede presentarse con otros metales dependiendo del ecosistema (25).

En el ámbito del biomonitoreo, la evaluación de bioacumulación permite determinar la exposición ambiental histórica de un ecosistema a contaminantes. Por ello, el análisis de tejidos biológicos en especies centinelas se ha convertido en una herramienta clave para la vigilancia ambiental, siendo los métodos basados en espectroscopía como el ICP-OES (Espectroscopía de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente) los más eficaces y sensibles para la cuantificación multielemental de metales pesados en tejidos animales (26).

En suma, la bioacumulación constituye un fenómeno crucial para la comprensión del impacto ambiental de los metales pesados. Evaluar su presencia en muestras biológicas no solo permite inferir el nivel de contaminación de un entorno, sino que también posibilita tomar decisiones preventivas en términos de salud pública, manejo ambiental y regulación de actividades industriales que generen este tipo de contaminantes.

Tabla 3.

Metodologías para la determinación de metales pesados en muestras biológicas clasificadas en base a la propiedad del analito que miden.

Propiedades ópticas	Espectrometría de emisión, colorimetría, espectrometría fluorescente, análisis de activación de neutrones.
Repartición al pasar de fase móvil a estacionaria	Cromatografía de gases, cromatografía de iones, cromatografía de líquidos.
Migración de electrolitos	Electroforesis capilar.
Propiedades electroquímicas	Voltametría, potenciometría, polarografía.
Complejos cuerpo-anticuerpos y sus reacciones	Métodos inmunoquímicos.

* Tomado de Draghici C. et al 2010 (26).

c) Técnicas de análisis (incluye ICP-OES)

El análisis de metales pesados en muestras biológicas representa un desafío técnico que requiere el uso de herramientas analíticas precisas, sensibles y confiables. La detección de estos elementos en tejidos animales, vegetales, suelos y agua depende de métodos que permitan cuantificar concentraciones traza, muchas veces en el orden de microgramos por kilogramo o incluso menores. Entre las principales técnicas utilizadas en el monitoreo ambiental se encuentran la espectroscopía de absorción atómica (AAS), la espectroscopía de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES), la espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), y la espectrometría de fluorescencia de rayos X (XRF), entre otras (26).

– Métodos tradicionales: AAS y XRF

A espectroscopía de absorción atómica (AAS) ha sido una de las técnicas más utilizadas históricamente para el análisis de metales pesados. Este método mide la cantidad de luz absorbida por los átomos del analito en estado gaseoso, permitiendo así cuantificar su concentración en una muestra. Si bien es económica y específica, presenta limitaciones importantes: solo permite el análisis de un elemento a la vez, tiene menor sensibilidad para ciertos metales y requiere tiempos de análisis más prolongados cuando se desea estudiar múltiples elementos simultáneamente (27).

La fluorescencia de rayos X (XRF), por su parte, es una técnica no destructiva y de bajo costo que se utiliza para el análisis elemental de sólidos, incluidos huesos y suelos. Sin embargo, su sensibilidad para niveles traza es baja en comparación con otras metodologías más avanzadas, lo cual restringe su aplicación en estudios biológicos que requieren alta precisión (28).

– Técnicas modernas multielementales: ICP-OES e ICP-MS

La espectroscopía de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) es actualmente una de las herramientas más eficaces para la determinación de metales pesados en matrices biológicas. Esta técnica utiliza un plasma de argón que alcanza temperaturas superiores a los 6.000 °C, lo que permite atomizar y excitar los átomos de los analitos presentes en la muestra. Cuando estos regresan a su estado basal, emiten radiación en longitudes de onda

características que son detectadas por un espectrofotómetro, el cual cuantifica cada elemento de forma simultánea y multielemental (29).

Entre sus principales ventajas, destacan:

- Alta sensibilidad y precisión.
- Capacidad multielemental (permite detectar varios metales en una sola corrida).
- Rango lineal amplio.
- Bajos límites de detección (LOD), generalmente en el rango de $\mu\text{g/L}$ o mg/kg .
- Alta velocidad de análisis.

Gracias a estas características, la ICP-OES es ampliamente utilizada en el análisis ambiental, incluyendo el monitoreo de metales pesados en tejidos animales, aguas residuales, alimentos, y productos farmacéuticos. Además, su compatibilidad con protocolos de digestión ácida (previo tratamiento de muestras) la hace versátil para trabajar con matrices biológicas complejas como hígado, músculo, hueso y sangre (30).

– **Procedimiento general para muestras biológicas**

El análisis de metales pesados mediante ICP-OES implica una serie de pasos críticos:

Preparación de la muestra: Generalmente se realiza una digestión ácida, en la que se descompone la materia orgánica con ácidos fuertes (como ácido nítrico y perclórico) bajo condiciones controladas de temperatura y presión.

Filtrado y dilución: Se eliminan residuos sólidos y se ajusta el volumen final a un nivel apropiado para la instrumentación.

Lectura en el equipo ICP-OES: La solución se introduce al plasma, donde los elementos se ionizan y se detecta la emisión óptica de cada uno.

Cuantificación: Se realiza mediante la comparación con curvas de calibración preparadas con patrones certificados.

Este método ha sido validado por organismos internacionales y cuenta con aprobación en normas de referencia como las de la EPA (Environmental Protection Agency) y el INACAL (Instituto Nacional de Calidad del Perú), lo que lo hace confiable para estudios científicos y análisis regulatorios (31).

– **Comparación con ICP-MS**

En comparación con la espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), que ofrece una sensibilidad aún mayor y permite la detección de isótopos, la ICP-OES presenta la ventaja de ser más económica, menos susceptible a interferencias espectrales y suficientemente precisa para los niveles de concentración esperados en organismos centinelas como *Columba livia*. Por lo tanto, para estudios ambientales en aves, la ICP-OES se considera una opción de alto rendimiento y costo-efectiva (32).

– **Aplicación en estudios con aves centinelas**

El uso de la ICP-OES en estudios con palomas urbanas y otras especies aviarias ha demostrado su eficacia en múltiples investigaciones realizadas en contextos urbanos e industriales. Se ha empleado con éxito para detectar niveles de cadmio, plomo, zinc, mercurio y arsénico en tejidos como el hígado, los huesos y las plumas, correlacionando los resultados con la contaminación ambiental del entorno (22).

3.1.4. Contaminación por metales pesados

a) **Contaminación por arsénico**

El arsénico es un metaloide naturalmente presente en la corteza terrestre, ampliamente distribuido en el medio ambiente como resultado de procesos geológicos, volcánicos, erosión de rocas, así como por actividades antropogénicas como la minería, la fundición de metales, el uso de pesticidas y la quema de combustibles fósiles (33). Este elemento se presenta en formas inorgánicas y orgánicas, siendo las primeras particularmente el arseniato (As^{5+}) y el arsenito (As^{3+}) las más tóxicas y prevalentes en aguas subterráneas y suelos contaminados (34).

• **Toxicocinética del arsénico**

Una vez ingerido, el arsénico inorgánico es absorbido rápidamente por el tracto gastrointestinal, alcanzando el torrente sanguíneo desde donde se distribuye a diversos órganos, con alta afinidad por el hígado, los pulmones, los riñones y la piel. Su biotransformación ocurre principalmente en el hígado mediante procesos de metilación que lo convierten en especies menos tóxicas como ácido monometilarsonoso (MMA) y ácido dimetilarsínico (DMA), los cuales son

finalmente excretados por la orina (35). Sin embargo, la eficiencia de este proceso de metilación varía entre especies e individuos, y se ha asociado a factores genéticos y nutricionales. En casos de exposición crónica, el arsénico también puede almacenarse en el cabello, las uñas y otros tejidos queratinizados, lo cual es aprovechado como marcador de exposición ambiental.

- **Efectos tóxicos sobre la salud**

El arsénico inorgánico ejerce su toxicidad interfiriendo con enzimas mitocondriales y procesos celulares fundamentales como la fosforilación oxidativa, generando estrés oxidativo, inhibición de la reparación del ADN, y disfunción celular generalizada (36).

Los efectos tóxicos se dividen en agudos y crónicos:

- **Toxicidad aguda:** Se presenta generalmente por la ingestión de altas dosis, ocasionando síntomas gastrointestinales graves como vómitos, diarreas profusas, dolor abdominal intenso, deshidratación severa, alteraciones cardiovasculares (hipotensión, arritmias) y, en casos extremos, falla multiorgánica y muerte (37).
- **Toxicidad crónica:** Está asociada a la exposición prolongada a concentraciones subletales y es responsable de una amplia gama de alteraciones sistémicas. A nivel dermatológico, se observan lesiones cutáneas como hiperpigmentación, hiperqueratosis palmo-plantar, y lesiones verrugosas. A nivel neurológico, se describe neuropatía periférica con parestesias y debilidad muscular distal. También se han documentado alteraciones hepáticas, anemia, disfunción renal, hipertensión y diabetes mellitus tipo 2 como comorbilidades relacionadas (38).

Además, el arsénico ha sido clasificado como carcinógeno del grupo I por la Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer (IARC), estando fuertemente relacionado con neoplasias de piel, pulmón, vejiga, riñón e hígado (39). Su efecto genotóxico se asocia a mutaciones, aberraciones cromosómicas y alteraciones epigenéticas inducidas por estrés oxidativo.

Impacto ambiental y bioacumulación

El arsénico es altamente persistente en el ambiente, y una vez liberado al suelo o al agua, puede incorporarse a los organismos a través de la cadena trófica. En el ámbito de la vida silvestre, se ha demostrado su acumulación progresiva en tejidos hepáticos y renales de aves expuestas a ambientes contaminados, siendo este patrón consistente en especies como *Columba livia*, que presentan una alta sensibilidad y capacidad de retención de arsénico en tejidos blandos (40).

Debido a su toxicidad y persistencia, la detección del arsénico en muestras biológicas es un indicador valioso para el monitoreo de ecosistemas contaminados. La bioacumulación en aves centinelas refleja la carga ambiental a la que están expuestos los organismos y puede predecir el riesgo potencial para otros vertebrados, incluidos los humanos.

b) Contaminación por mercurio

El mercurio es un elemento químico de origen natural que se encuentra en tres formas principales con distintas propiedades toxicológicas: elemental (Hg^0), inorgánico (Hg^+ , Hg^{2+}) y orgánico (principalmente metilmercurio, CH_3Hg^+). Es uno de los metales pesados más tóxicos para la salud humana y animal debido a su capacidad para atravesar barreras biológicas como la hematoencefálica y la placentaria, además de su alta bioacumulación y biomagnificación a través de la cadena trófica (41).

- **Toxicocinética del mercurio**

La forma elemental (Hg^0), generalmente en forma de vapor, es absorbida por inhalación con una eficiencia superior al 70 %. Una vez en el organismo, puede cruzar con facilidad la barrera hematoencefálica y ser oxidada intracelularmente a formas inorgánicas, las cuales quedan atrapadas en el tejido cerebral (42). Por su parte, el metilmercurio, que es la forma orgánica más común y tóxica, se absorbe eficientemente por vía digestiva (más del 90 %) y se distribuye a través de la sangre hacia todos los tejidos, incluyendo el sistema nervioso central y la placenta (43).

El mercurio inorgánico tiene una menor absorción gastrointestinal (10–15 %) pero se acumula principalmente en los riñones, donde puede permanecer por largos periodos y ejercer efectos nefrotóxicos. La excreción del mercurio

depende de su forma química: el mercurio inorgánico se elimina principalmente por orina, mientras que el orgánico se elimina por bilis y heces (44).

- **Toxicidad y efectos sobre la salud**

El mercurio, especialmente en su forma orgánica, afecta múltiples sistemas fisiológicos. Entre sus efectos tóxicos se destacan:

- **Sistema nervioso:** El metilmercurio es una neurotoxina potente. Su exposición crónica produce síntomas como parestesias, ataxia, disartria, temblores, déficit cognitivo y alteraciones del comportamiento. En casos graves, puede llevar a encefalopatía irreversible (45). La exposición prenatal está relacionada con alteraciones del desarrollo neurológico, disminución del coeficiente intelectual y retraso en el desarrollo motor y del lenguaje en niños (46).
- **Sistema renal:** El mercurio inorgánico se acumula en el túbulo proximal renal, donde puede causar necrosis tubular, proteinuria y disminución de la tasa de filtración glomerular. Su nefrotoxicidad es dosis-dependiente y puede exacerbarse con exposición prolongada (15).
- **Sistema inmunológico:** Se ha documentado que el mercurio puede inducir fenómenos autoinmunes, activando linfocitos T autorreactivos y la producción de autoanticuerpos. En modelos animales, se han asociado exposiciones crónicas con glomerulonefritis y otras enfermedades inmunomediadas (47).
- **Sistema cardiovascular:** La exposición al mercurio se ha vinculado con hipertensión, aterosclerosis temprana y disfunción endotelial, lo cual aumenta el riesgo de eventos cardiovasculares en humanos (48).
- **Sistema reproductivo:** Puede afectar la fertilidad masculina mediante la disminución del conteo y motilidad espermática, y también se ha vinculado con abortos espontáneos y malformaciones fetales en mujeres expuestas durante el embarazo (49).

- **Efectos en aves y fauna silvestre**

En la fauna silvestre, especialmente en aves piscívoras y omnívoras, el mercurio se bioacumula en tejidos como el hígado, los músculos y el sistema nervioso, comprometiendo funciones esenciales como la reproducción, el comportamiento

alimenticio y la supervivencia de las crías (25). Se ha observado que en aves urbanas como *Columba livia*, aunque la exposición no proviene de fuentes acuáticas, puede haber acumulación derivada de emisiones industriales, tráfico vehicular y materiales de desecho urbano (22).

Además, el mercurio puede afectar la viabilidad poblacional de especies expuestas mediante la reducción del éxito reproductivo, deformidades embrionarias, alteraciones en el canto y en las rutas migratorias, entre otros efectos documentados en especies silvestres (24).

- **Importancia en monitoreo ambiental**

El mercurio ha sido objeto de regulación estricta a nivel internacional, como se observa en el Convenio de Minamata sobre el Mercurio, que busca reducir su liberación al ambiente dada su peligrosidad y persistencia. En este contexto, el análisis de mercurio en tejidos de aves centinelas, como el músculo o el hígado, se convierte en una herramienta fundamental para evaluar la calidad ambiental de ecosistemas urbanos e industriales (50).

- **Efectos sobre la salud**

La intoxicación aguda implica una sintomatología clásica de un caso de este tipo que incluye náuseas, vómitos, diarreas y en casos donde la cantidad es excesiva ocurre la muerte (31). La intoxicación crónica se caracteriza por una amplia gama de manifestaciones sintomatológicas y problemas en diversos sistemas del organismo que se resumen en la tabla 4.

Tabla 4.

Efectos de la exposición crónica a mercurio

Efectos neurológicos	Efectos sobre la actividad cognitiva como pérdida de memoria. Efectos de manifestación subjetiva fisiológica como hiperactividad, baja en los niveles de socialización. Efectos sobre la actividad neuromotora.
Efectos renales (dependiente de la dosis)	Nefrotoxicidad que incluye daños en estructuras renales como los túbulos proximales y distales, la membrana glomerular. Necrosis renal.
Efectos cardiovasculares	Aumento de la presión sanguínea, función cardíaca alterada.
Efectos inmunológicos	En ratones se ha determinado evidencia de una estimulación del sistema inmune que conlleva a enfermedades del complejo inmune.
Efectos reproductivos	Baja fertilidad. Disminución de la motilidad y del número de espermatozoides.
Efectos neoplásicos	Evidencia parcial de desarrollo de tumores en tiroides en ratas.

* Tomado de Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR) 2022 (51).

c) Contaminación por plomo

El plomo (Pb) es un metal pesado tóxico sin ninguna función biológica conocida en los seres vivos. Su uso extensivo en la industria, la minería, la fabricación de baterías, pigmentos, soldaduras y combustibles con plomo ha contribuido históricamente a una amplia diseminación ambiental. Debido a su alta persistencia en el ambiente, su capacidad de bioacumulación y sus múltiples efectos adversos sobre la salud, el plomo es considerado uno de los contaminantes más peligrosos y de mayor relevancia sanitaria a nivel mundial (52).

- **Toxicocinética del plomo**

La absorción del plomo puede ocurrir por vías respiratoria, digestiva y dérmica, siendo las dos primeras las más relevantes. En adultos, se estima que entre el 10 % y el 15 % del plomo ingerido es absorbido por el tracto gastrointestinal, mientras que en niños la absorción puede alcanzar hasta un 50 %, lo que incrementa notablemente su vulnerabilidad (42). Una vez absorbido, el plomo se distribuye a través del torrente sanguíneo y se deposita principalmente en huesos, dientes, hígado, riñones y cerebro. Aproximadamente el 90–95 % del plomo corporal total en adultos se encuentra almacenado en el esqueleto, donde puede permanecer durante décadas, liberándose lentamente a la circulación sanguínea (53).

La excreción del plomo ocurre principalmente por vía urinaria y en menor medida por la bilis, el sudor, la leche materna y el cabello. La vida media del plomo en sangre es de aproximadamente 30 días, pero en hueso puede extenderse por 20 a 30 años, lo que representa un riesgo crónico incluso después del cese de la exposición (54).

- **Toxicidad y efectos sobre la salud humana**

El plomo es un tóxico multiorgánico que afecta diversos sistemas, incluso a concentraciones muy bajas. La exposición puede ser aguda o crónica, y sus efectos varían dependiendo de la dosis, la edad del individuo y la duración del contacto.

- Sistema nervioso: Es el sistema más vulnerable, especialmente en niños. La exposición crónica puede causar encefalopatía, disminución del

coeficiente intelectual, alteraciones del comportamiento, problemas de atención, retraso en el desarrollo cognitivo, convulsiones y en casos extremos, coma o muerte (55).

- Sistema hematopoyético: El plomo interfiere con la síntesis de hemoglobina al inhibir enzimas clave como la ácido delta-aminolevulínico deshidratasa (ALAD) y la ferroquelatasa, lo que produce anemia microcítica hipocrómica. Además, eleva los niveles de ácido delta-aminolevulínico (ALA) en sangre y orina, un biomarcador clásico de exposición (56).
- Sistema renal: El plomo tiene un efecto nefrotóxico dosis-dependiente. La exposición prolongada puede inducir nefropatía intersticial crónica, proteinuria y disminución progresiva de la función renal, siendo una de las causas reconocidas de enfermedad renal crónica de origen tóxico (57).
- Sistema cardiovascular: Se ha demostrado que el plomo aumenta el riesgo de hipertensión arterial, aterosclerosis y enfermedades cardiovasculares, debido a alteraciones en la función endotelial, estrés oxidativo y disfunción del sistema renina-angiotensina (58).
- Sistema reproductivo: En varones, el plomo afecta la espermatogénesis, reduciendo la cantidad y movilidad espermática. En mujeres, puede ocasionar abortos espontáneos, partos prematuros y alteraciones hormonales. Su paso transplacentario expone también al feto a sus efectos tóxicos (59).

- **Efectos en la fauna silvestre y aves urbanas**

En animales, el plomo genera efectos similares a los observados en humanos. En aves, particularmente aquellas que habitan zonas urbanas o áreas contaminadas con residuos metálicos, la ingestión accidental de partículas de plomo (por ejemplo, de pintura, polvo ambiental o perdigones) puede causar intoxicación aguda o crónica. Las palomas urbanas (*Columba livia*), debido a su comportamiento alimenticio y su contacto constante con el suelo y residuos urbanos, son especies particularmente susceptibles (22).

Los efectos clínicos observados en aves intoxicadas incluyen letargo, debilidad, emaciación, incoordinación, diarrea, ceguera y muerte. A nivel subclínico, puede haber alteraciones en el peso corporal, en la

hematopoyesis, en la función hepática y reproductiva, así como cambios en el comportamiento de anidación y alimentación (60). En estudios de biomonitoreo, se han identificado altos niveles de plomo en hígado, huesos y sangre de palomas residentes en zonas de tráfico vehicular intenso y proximidad a fuentes industriales (61).

- **Importancia ambiental y sanitaria del monitoreo**

Debido a su toxicidad, el plomo ha sido objeto de diversas restricciones internacionales, incluyendo la eliminación progresiva del plomo en combustibles, pinturas y productos industriales. Sin embargo, en muchas regiones del mundo, incluida América Latina, la contaminación por plomo persiste como un problema ambiental relevante. Su identificación en organismos centinelas como las palomas urbanas permite no solo evaluar el grado de contaminación ambiental, sino también inferir el riesgo potencial para los seres humanos y otras especies que comparten el entorno (62).

d) Contaminación por cadmio

El cadmio (Cd) es un metal pesado no esencial que se encuentra de forma natural en la corteza terrestre, generalmente asociado a minerales que contienen zinc, plomo y cobre. Es clasificado como un contaminante tóxico de alta prioridad por organismos internacionales debido a su persistencia ambiental, alta toxicidad, bioacumulación y capacidad de inducir efectos adversos multisistémicos en organismos vivos, incluso a concentraciones bajas (19).

El uso industrial del cadmio incluye la fabricación de baterías de níquel-cadmio, recubrimientos metálicos, pigmentos, estabilizantes plásticos y aleaciones. También es un subproducto común de la minería y fundición de metales no ferrosos, y puede liberarse al ambiente por incineración de residuos urbanos e industriales (42).

Se trata de un metal que cuando es puro tiene una apariencia blanca-argenta y es suave al tacto. Se encuentra de forma natural en la corteza terrestre, donde se encuentra generalmente asociado a plomo, cobre y zinc (33).

El cadmio ingresa al organismo por inhalación o ingestión, posteriormente se concentra sobre todo en riñones e hígado, donde permanece incluso por años.

Una pequeña porción es eliminada progresivamente a través de la orina y las heces (33).

- **Fuentes y usos**

En cuanto a su emisión al medio ambiente está se da principalmente debido a la actividad minera extractiva de metales no ferrosos, como el cobre, el zinc y el plomo, así como su refinamiento. También es un subproducto de la combustión de combustibles fósiles. La incineración de desechos también da como resultado su liberación al ambiente como contaminante. Es empleado para la producción de diversos productos, principalmente baterías, pigmentos y recubrimiento de otros metales (33).

- **Efectos sobre la salud**

La mayoría de organismos poseen la capacidad de convertir el cadmio que ingresa al organismo en una forma no dañina a través del hígado y los riñones, pero cuando la capacidad de dichos órganos para llevar a cabo esta labor se ve superada por una cantidad excesiva en el organismo es que pueden tener lugar complicaciones. La intoxicación aguda se manifiesta como irritación estomacal con vómitos y diarrea que puede culminar en la muerte. La exposición prolongada de pequeñas cantidades lleva a un cuadro crónico que se expresa como: 1) enfermedad renal en el caso de que la acumulación en los riñones a lo largo de los años sea excesiva, 2) debilitamiento de los huesos con mayor riesgo de fracturas y 3) se ha podido asociar la presentación de cáncer de pulmón relacionada a riesgos ocupacionales que implican la exposición prolongada a través del tiempo a aire contaminado con cadmio (33).

e) Contaminación por zinc

El zinc (Zn) es un metal traza esencial para el metabolismo de todos los seres vivos. A diferencia de otros metales pesados como el plomo, el mercurio o el cadmio, el zinc cumple funciones biológicas vitales y se encuentra involucrado en procesos como la catalización enzimática, la expresión génica, la replicación del ADN, la cicatrización tisular y la inmunorregulación (63). Sin embargo, a pesar de su papel fisiológico indispensable, el zinc puede actuar como un tóxico

ambiental cuando se encuentra en concentraciones elevadas, generando efectos adversos tanto en humanos como en la fauna silvestre (42).

No se volatiliza del suelo ni del agua, depositándose principalmente como sedimento a través de los procesos de adsorción y precipitación, por lo que suele acumularse en áreas cercanas a la zona de emisión. En muestras biológicas se concentra principalmente en tejidos como el hueso, el músculo y el hígado (35).

- **Fuentes y usos**

Puede encontrarse en sedimentos naturales siendo un elemento que se encuentra de forma común en la corteza terrestre, pero su principal fuente como contaminante es antropogénica debido a actividades tales como la minería, la metalurgia y el uso de productos de venta comercial que incluyen a este compuesto en su composición como fertilizantes y preservantes para madera, se trata por lo tanto de contaminante comúnmente encontrado en aguas de desecho, escoria de fundición y relaves. Como micronutriente se encuentra en una amplia variedad de comidas, particularmente en aquellas de origen animal, siendo la comida marina aquella que presenta mayores concentraciones (35).

- **Efectos sobre la salud**

La toxicosis crónica por exposición prolongada ocasionada por zinc tiene el efecto de generar deficiencia de cobre. La exposición aguda a altas concentraciones desencadena envenenamiento que se caracteriza por fiebre, vómitos y diarrea (34).

3.2. Revisión de antecedentes investigativos

- **Naccari et al., 2020.** Tissue distribution of heavy metals in urban feral pigeons (*Columba livia*) and potential use as bioindicators of environmental contamination
El objetivo del estudio fue analizar la distribución de metales pesados en diferentes tejidos (plumas, músculo, riñón e hígado) de palomas urbanas en Sicilia. Se recolectaron 60 individuos y se aplicó espectrometría de absorción atómica para detectar la concentración de cadmio, plomo, zinc y cobre. Se observó que el plomo y el cadmio se acumulaban principalmente en el hígado y los riñones, mientras que el zinc y cobre se encontraban en valores fisiológicos. Las palomas de zonas

industriales mostraron mayores niveles de metales. El estudio concluyó que *Columba livia* es útil como bioindicador ambiental urbano, especialmente por su fácil acceso, sedentarismo y estrecha relación con el entorno humano (64).

- **De Wet y Bouwman, 2021.** Urban birds as sentinels for environmental exposure to lead in South African cities

Este trabajo evaluó a aves urbanas como centinelas de exposición a plomo en ciudades sudafricanas. Se analizaron 88 aves, principalmente *Columba livia* y *Sturnus vulgaris*, recolectadas en zonas de distinta carga vehicular. Las muestras de hígado, hueso y sangre se examinaron mediante ICP-MS. Se hallaron niveles significativamente más altos de plomo en aves provenientes de áreas de alto tráfico. También se encontró que las aves residentes acumulan más plomo que las migratorias. Los autores concluyeron que *Columba livia* es un bioindicador sensible y efectivo para evaluar riesgos por contaminación urbana por metales pesados (65).

- **Abuduwaili et al., 2020.** Heavy metal bioaccumulation in feral pigeons (*Columba livia*) around mining and urban areas

Este estudio comparó los niveles de plomo, cadmio y mercurio en palomas de zonas urbanas y mineras. Se recolectaron 72 palomas y se analizaron hígado, riñón y fémur mediante ICP-OES. Las aves de áreas mineras presentaron mayores niveles de bioacumulación, especialmente de mercurio y plomo. El estudio también comparó con aves rurales, encontrando menores niveles en estas últimas. Los resultados respaldan el uso de palomas urbanas como herramientas de monitoreo ambiental, especialmente en regiones afectadas por la minería y la contaminación industrial (14).

- **Torres y Guerrero, 2020.** Bioacumulación de metales pesados en palomas urbanas (*Columba livia*) de Santiago. Esta investigación se centró en el análisis de plomo, cadmio y zinc en palomas urbanas capturadas en el centro y zonas periféricas de Santiago. Se recolectaron 45 individuos y se analizaron hígado y riñón mediante ICP-OES. Los niveles de plomo fueron más altos en zonas con alta circulación vehicular, mientras que el zinc estuvo presente en niveles fisiológicos. El cadmio se detectó en proporciones más elevadas en aves del centro urbano. Se concluyó que las palomas reflejan adecuadamente el nivel de contaminación en el ambiente urbano, y se recomienda su uso para el biomonitoreo ambiental (66).

- **Tello y Ramírez, 2022.** Palomas como bioindicadores de contaminación por plomo en la Ciudad de México.

El estudio analizó huesos de palomas recolectadas en diferentes delegaciones de la Ciudad de México con diversos niveles de tráfico. Las muestras fueron analizadas por espectroscopía de absorción atómica. Se encontró que los niveles de plomo eran proporcionalmente mayores en las zonas con más tráfico vehicular. Los investigadores concluyen que *Columba livia* representa una herramienta útil para la vigilancia ambiental debido a su exposición directa al aire urbano y a su comportamiento sedentario que permite asociar la contaminación con una localización precisa (67).

- **Zeballos y Choquehuanca, 2020.** Palomas como centinelas de contaminación urbana en zonas industriales de Arequipa.

La investigación se realizó en zonas industriales de Sachaca y Paucarpata, recolectando 25 palomas. Se analizaron tejidos óseos y hepáticos, encontrando niveles significativos de zinc, plomo y cobre. La metodología incluyó digestión ácida húmeda y análisis por ICP-OES. Los resultados evidenciaron un patrón claro de acumulación en áreas con presencia de industrias. Se concluyó que las palomas pueden ser empleadas como centinelas ambientales en contextos urbanos-industriales y que los resultados tienen valor epidemiológico y ecológico (68).

4. HIPÓTESIS

Dado que los metales pesados son considerados como un contaminante global de preocupación para la salud pública, principalmente por sus efectos adversos sobre el medio ambiente, en virtud a que existen reportes de contaminación por metales pesados en el aire.

Es probable que se detecte la presencia de arsénico, plomo, cadmio, zinc y mercurio en muestras de hígado, músculo, hueso y sangre provenientes de palomas de Castilla (*Columba livia*) que habitan en la ciudad de Arequipa mediante la técnica de espectroscopía ICP OES.



CAPÍTULO II

PLANTEAMIENTO OPERACIONAL

1. TÉCNICAS, INSTRUMENTOS Y MATERIALES DE VERIFICACIÓN

1.1. Técnicas

Se empleó la técnica de observación estructurada, dirigida específicamente a la identificación y cuantificación de metales pesados (arsénico, cadmio, plomo, mercurio y zinc) en tejidos biológicos de palomas (*Columba livia*). Esta técnica fue complementada con el análisis instrumental de laboratorio, mediante procedimientos químicos validados para la detección de elementos traza en matrices biológicas.

1.2. Instrumentos

El principal instrumento de laboratorio utilizado fue el espectrómetro de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES), equipo analítico que permite la cuantificación precisa de metales pesados en tejidos blandos como hígado y plumas. Para el procesamiento de muestras se utilizaron también instrumentos auxiliares, tales como balanzas analíticas, autoclaves, centrífugas, vórtex y sistema de digestión ácida controlada (bloques de digestión).

1.3. Materiales de verificación

1.3.1. Material biológico

Se trabajó con muestras de tejidos hepático, muscular, óseo y sanguíneo provenientes de un total de 20 especímenes de paloma de Castilla.

1.3.2. Materiales de laboratorio

- Material para toma de muestras (necropsia): hojas de bisturí nro. 10 y 11, instrumental para necropsia, EPP reglamentado por el laboratorio de la UCSM para toma de muestras biológicas.
- Material para el pretratamiento de las muestras: agua desionizada, matraces, ácido nítrico.

1.3.3. Materiales de campo

- Equipos de Protección Personal incluyendo: guantes desechables, mascarillas KN95, gafas de protección ocular, botas de jebe, protección de cabeza (casco), mandilón y ambo
- Protección contra la radiación UV: sombrero, protector solar de espectro alto
- Material de captura: redes o mallas niebla, cajas de cartón, jaulas transportadoras

- Material para sacrificio de especímenes y toma de muestra de sangre: pentobarbital sódico, tubos para muestra de sangre con EDTA, jeringas de tuberculina, jeringas de 3 ml, alcohol, algodón
- Reactivos para espectrofotometría por emisión de plasma con acoplamiento inductivo.

1.3.4. Materiales de escritorio

- Artículos de oficina: lapiceras, papel, etc.
- Libreta de apuntes.

1.3.5. Equipos

- Computadora de escritorio
- Laptop
- Dispositivo móvil
- Cámara fotográfica
- Impresora
- Espectrómetro ICP-OES

1.3.6. Otros materiales

- Material para marcaje y reconocimiento de los animales capturados.

2. CAMPO DE VERIFICACIÓN

2.1. Ámbito

La investigación se desarrolló en el ámbito urbano del distrito de Cerro Colorado, en la provincia y departamento de Arequipa, Perú. Las muestras fueron recolectadas en puntos estratégicos del distrito con alta densidad vehicular, zonas comerciales y áreas residenciales adyacentes a fuentes potenciales de contaminación atmosférica.

Para la toma de muestras se trabajó en diversos distritos de Cerro Colorado, Cercado y Tiabaya de la ciudad de Arequipa, provincia de Arequipa, Perú; así como en el Valle del Colca, provincia de Castilla, Arequipa-Perú. El procesamiento de las muestras y el análisis estadístico se llevó a cabo en la ciudad de Arequipa igualmente.

2.2. Unidades de estudio

Las unidades de estudio estuvieron constituidas por palomas urbanas (*Columba livia*) adultas, capturadas en espacios públicos de los distritos de Cerro Colorado, Cercado,

Tiabaya y Valle del Colca. La selección se realizó de forma no probabilística, por conveniencia, considerando criterios de accesibilidad y representatividad ambiental.

2.2.1. Universo

El universo poblacional estuvo constituido por el total de palomas adultas que integraron las 4 colonias intervenidas.

2.2.2. Muestra

Estuvo constituida por 20 palomas bravías adultas en base a los tamaños de muestra empleados en otros trabajos similares (2) (4) y en consideración a limitantes prácticos tales como la cantidad de animales que se permite recolectar por parte de los municipios de los distritos implicados y el precio elevado de la metodología aplicada.

2.2.3. Procedimiento de muestreo

Se trabajó con 4 colonias de palomas identificadas en base a lugar donde residen siendo estas:

- Colonia 1: Plaza de Armas de la ciudad de Arequipa
- Colonia 2: Río Seco
- Colonia 3: Tiabaya
- Colonia 4: Caylloma

El muestreo se realizó de forma aleatoria considerando a especímenes adultos pertenecientes a las 4 colonias propuestas. Se capturó a las palomas empleando redes de niebla de tal modo que se imposibilitó la posibilidad de que retomen en vuelo. Una vez inmovilizadas se escogió al azar a 5 palomas adultas de cada uno de los 4 sitios de recolección. Seguidamente se procedió a asignar a cada individuo un número y una(s) letra(s) de tal forma que se reconozca a qué lugar de acopio pertenecen, de este modo se identificó a las muestras de la siguiente manera:

Tabla 5.
Identificación de las muestras

		Lugar de recolección			
		Cercado "C"	Cerro Colorado "CC"	Tiabaya "T"	Chivay "V"
Número asignado	1	1C	1CC	1T	1V
	2	2C	2CC	2T	2V
	3	3C	3CC	3T	3V
	4	4C	4CC	4T	4V
	5	5C	5CC	5T	5V

La identificación se llevó a cabo en un registro escrito, mientras que el animal fue designado con un brazalete alrededor de la pata. Posteriormente se llevó a los animales capturados al laboratorio de patología de la UCSM para el procesamiento de las muestras que se dio del siguiente modo:

1. Toma de muestras de sangre mediante venopunción ulnar.
2. Sacrificio indoloro de los animales capturados mediante intoxicación con dosis eutanásica de pentobarbital sódico por recomendación del Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre.
3. Extracción de muestra de tejido muscular de patas y pechuga, huesos femorales e hígado.
4. Disposición final de los desechos biológicos resultantes según disposición del laboratorio asignado por la UCSM.

En el caso de las muestras tomadas fuera de la ciudad se realizó el mismo procedimiento, pero en campo y no en instalaciones especializadas. Las muestras fueron refrigeradas para su transporte y envió a la ciudad de Lima para su procesamiento por parte del laboratorio acreditado.

Se llevó a cabo el pretratamiento de las muestras empleando ácido nítrico para su disolución y agua desionizada para la dilución posterior.

2.2.4. Métodos de evaluación

Se utilizó la metodología de espectroscopía de emisión atómica con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-OES), esta es una técnica de análisis multielemental cuyo objetivo es la determinación y cuantificación de los elementos de la tabla periódica (38). Las muestras son puestas de forma líquida mediante un nebulizador en un aerosol y son estimuladas empleando plasma de argón dando como respuesta la excitación de los átomos que son emitidos y detectados mediante un sistema óptico que da como resultado espectros de emisión para cada elemento. Este procedimiento se llevó a cabo en el Laboratorio ESLAB en la ciudad de Lima, acreditado para procesamiento de muestras de tipo biológico como las recabadas.

2.3. Temporalidad

La recolección de muestras y el análisis de laboratorio se realizaron durante los meses de abril a junio del año 2025, permitiendo establecer una línea de base de la carga metálica en la fauna urbana del área durante dicho período.

3. ESTRATEGIAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.1. Organización

La organización del proceso de recolección de datos contempló tres fases:

- Fase preparatoria, en la que se gestionaron los permisos, se capacitó al equipo de campo, y se establecieron protocolos de bioseguridad y transporte de muestras.
- Fase operativa, donde se realizó la captura de palomas, su traslado a un laboratorio veterinario para necropsia y extracción de tejidos (hígado, músculo y hueso), y su posterior almacenamiento a -20 °C.
- Fase analítica, correspondiente a la digestión ácida de las muestras y el análisis instrumental mediante ICP-OES.

3.2. Recursos

Los recursos utilizados incluyeron:

- Recursos humanos: Investigador principal, dos asistentes de campo y un técnico en necropsias.
- Recursos materiales: Equipos de captura (jaulas), insumos de laboratorio, equipamiento analítico ICP-OES, refrigeradoras, contenedores de transporte biológico, y reactivos certificados.
- Recursos institucionales: Se contó con el apoyo logístico y técnico del laboratorio especializado en análisis de metales pesados ESLAB quienes indicaron los protocolos para el recojo y envío de muestras,

3.3. Evaluación Estadística

Se empleó un diseño no-experimental de tipo transversal descriptivo con correlación de las variables independientes.

Tabla 6.
Diseño no-experimental

Variables	Indicadores
Presencia de metales pesados	Presencia de mercurio
	Presencia de zinc
	Presencia de cadmio
	Presencia de arsénico
	Presencia de plomo
Lugar de procedencia/recolección de las muestras	Cercado
	Cerro Verde
	Tiabaya
	Chivay

3.4. Análisis estadístico

Se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis con el objetivo de determinar si existían diferencias estadísticamente significativas entre los grupos de variables cuantitativas propuestas. Esta prueba fue seleccionada debido a que las variables evaluadas correspondieron a más de tres grupos independientes, y los datos no cumplieron con los supuestos de normalidad, según lo evidenciado en las pruebas preliminares de distribución (Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk).

La prueba de Kruskal-Wallis permitió contrastar la hipótesis de que todas las muestras provenían de una misma población, evaluando la igualdad de medianas entre los grupos comparados. Al tratarse de una prueba robusta frente a distribuciones no normales y adecuada para muestras de diferente tamaño, se consideró la opción más pertinente para el presente análisis.

El procesamiento y análisis de los datos se llevaron a cabo utilizando el software estadístico IBM SPSS versión 25.0, el cual permitió aplicar la prueba con rigurosidad y obtener los valores de significancia correspondientes para la interpretación de los resultados.

3.5. Financiamiento

La tesis propuesta se desarrolló íntegramente con el financiamiento del ejecutor.



CAPÍTULO III RESULTADOS

Tabla 7.

Niveles de arsénico, plomo, cadmio, zinc y mercurio en muestras de tejido hepático, muscular, óseo y sanguíneo provenientes de palomas de Castilla (*Columba livia*) Medel Cercado de Arequipa mediante espectroscopía para monitoreo biológico de contaminación ambiental por bio-centinelas

Estadísticos	Arsénico	Plomo	Mercurio	Zinc	Cadmio
Media	3,00	4,21	0,49	41,53	0,29
Desviación	0,00	2,81	0,00	38,39	0,00
Mínimo	3,00	2,99	0,49	10,60	0,29
Máximo	3,00	13,13	0,49	133,20	0,29
TAMAÑO	15	15	15	15	15

La Tabla 7 presenta los niveles promedio de metales pesados (arsénico, plomo, mercurio, zinc y cadmio) detectados en muestras biológicas (tejido hepático, muscular, óseo y sanguíneo) de palomas de Castilla (*Columba livia*) recolectadas en el distrito de Cercado de Arequipa, con el propósito de evaluar su utilidad como bio-centinelas en el monitoreo ambiental.

En cuanto al arsénico y el plomo, se observa que los valores medios registrados fueron exactamente iguales al límite de cuantificación del método (3,00 mg/kg), con desviación estándar nula (0,00), lo que sugiere que todos los resultados para estas dos sustancias se ubicaron justo en ese umbral y no se detectaron concentraciones superiores. Esto puede interpretarse como una limitación técnica para determinar si realmente están presentes o no, indicando únicamente que no se detectó por encima del nivel mínimo cuantificable.

El mercurio presentó una media de 0,49 mg/kg, también muy próxima a su límite de cuantificación (0,50 mg/kg), con una desviación estándar igualmente nula. Esto evidencia que, en todas las muestras analizadas, el nivel de mercurio fue constante y cercano al límite inferior de detección, lo que sugiere presencia mínima o marginal de este metal.

En contraste, los niveles de zinc fueron mucho más elevados. Se obtuvo un valor promedio de 41,53 mg/kg con una alta desviación estándar de 38,39, lo que indica una gran variabilidad entre las muestras, con concentraciones que oscilaron desde 10,60 mg/kg hasta 133,20 mg/kg. Este hallazgo resalta que, a diferencia de los demás metales, el zinc se encuentra en niveles considerablemente más altos y con mayor dispersión en las palomas evaluadas, posiblemente

reflejando una mayor disponibilidad ambiental o una función fisiológica relevante del zinc en estas aves.

Finalmente, el cadmio presentó una media de 0,29 mg/kg, justo por debajo del límite de cuantificación (0,30 mg/kg), con una desviación estándar de 0,00. Esto implica que en todas las muestras el cadmio estuvo presente en niveles iguales o muy cercanos al umbral inferior del método, sin evidenciar concentraciones detectables por encima del mismo.

Al contrastar estos hallazgos con el estudio de Guevara et al. (69), realizado en la ciudad de Lima, se observa una clara coincidencia en cuanto al uso exitoso de *Columba livia* como biomonitores de metales pesados, particularmente en zonas urbanas e industriales. No obstante, a diferencia del presente estudio, en Lima se detectaron concentraciones más elevadas de plomo y cadmio, lo que sugiere una mayor presión ambiental en aquella ciudad o una mayor sensibilidad del método utilizado en dicho trabajo.

Asimismo, Valladares-Faundez et al. (70) reportaron en Arica niveles de arsénico, cadmio y plomo detectables en tejidos de palomas de Castilla, tanto en zonas urbanas como rurales. En comparación, los valores reportados en Cercado de Arequipa fueron más bajos o apenas detectables, lo cual podría indicar una menor exposición local o limitaciones en la sensibilidad del método ICP-OES empleado en esta investigación.

Por su parte, Cui et al. (12), en un estudio realizado en Beijing y Guangzhou, reportaron bioacumulación significativa de plomo, cadmio y mercurio en tejidos de palomas mensajeras, asociando estas concentraciones a la contaminación atmosférica. En contraste, en el presente estudio, aunque el mercurio y el plomo están presentes, no alcanzaron niveles elevados, lo cual podría deberse a una menor concentración atmosférica de estos metales en Arequipa o a diferencias metodológicas, como el tipo de tejido analizado o las condiciones ambientales regionales.

Finalmente, aunque Gómez (71) encontró niveles bajos de metales pesados como plomo y cadmio en el búho real (*Bubo bubo*) en el sureste español, este hallazgo es coherente con los niveles observados en el presente trabajo, en el sentido de que en determinadas áreas urbanas o semirrurales la acumulación de estos metales puede mantenerse en niveles bajos, pese a su presencia ambiental.

Figura 1.

Niveles de arsénico, plomo, cadmio, zinc y mercurio en muestras de tejido hepático, muscular, óseo y sanguíneo provenientes de palomas de Castilla (*Columba livia*) Medel Cercado de Arequipa mediante espectroscopía para monitoreo biológico de contaminación ambiental por bio-centinelas.

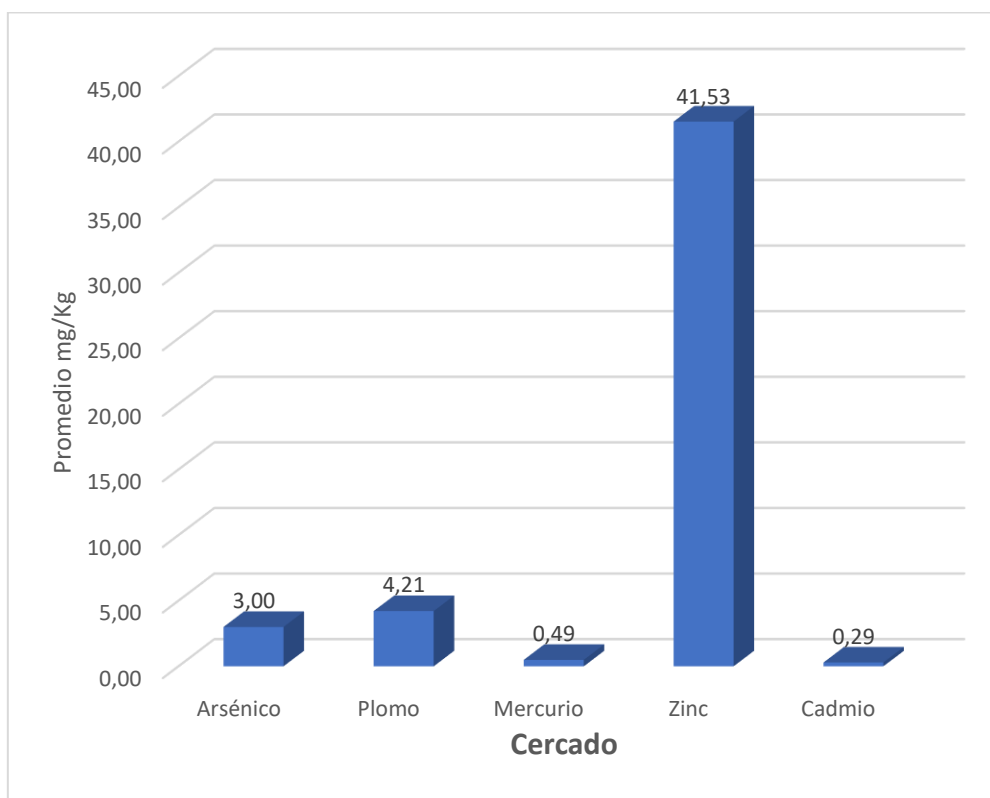


Tabla 8.

Niveles de arsénico, plomo, cadmio, zinc y mercurio en muestras de tejido hepático, muscular, óseo y sanguíneo provenientes de palomas de Castilla (*Columba livia*) Medel de Cerro Colorado mediante espectroscopía para monitoreo biológico de contaminación ambiental por bio-centinelas

Estadísticos	Arsénico	Plomo	Mercurio	Zinc	Cadmio
Media	3,00	3,02	0,50	54,83	0,29
Desviación	0,00	0,12	0,05	50,11	0,01
Mínimo	3,00	2,99	0,49	17,19	0,29
Máximo	3,00	3,47	0,70	189,97	0,31
TAMAÑO	15	15	15	15	15

En las muestras biológicas de palomas recolectadas en Cerro Colorado, los niveles de arsénico y plomo se ubicaron justo en el límite de cuantificación del método (3,00 mg/kg), con desviación estándar nula en el caso del arsénico y leve en el plomo, lo que indica escasa variabilidad y una posible presencia mínima.

El mercurio mostró un valor medio de 0,50 mg/kg, coincidiendo con su LCM, con muy poca dispersión entre muestras, lo que sugiere niveles apenas detectables.

El zinc fue el metal con mayor concentración y variabilidad, con una media de 54,83 mg/kg y un amplio rango entre 17,19 y 189,97 mg/kg, lo que evidencia una alta exposición ambiental o acumulación fisiológica.

Finalmente, el cadmio registró una media de 0,29 mg/kg, prácticamente en el umbral de cuantificación (0,30 mg/kg), sin grandes fluctuaciones.

Al comparar estos resultados con los antecedentes revisados, se observa una coincidencia parcial con los hallazgos de Cui et al. (12), quienes detectaron la acumulación de cadmio y plomo en tejidos de palomas en zonas urbanas de China. Sin embargo, en el presente estudio, aunque el plomo estuvo en el límite de detección y el cadmio en niveles bajos, sus valores fueron mucho menores que los encontrados por los autores chinos, lo que puede explicarse por diferencias en las fuentes de contaminación atmosférica o por una menor carga vehicular e industrial en Cerro Colorado respecto a las metrópolis asiáticas.

Por otro lado, Valladares-Faundez et al. (70), en su investigación en la ciudad de Arica, reportaron niveles elevados de plomo, arsénico y cadmio en tejidos de palomas. Aunque los valores promedio de arsénico y plomo en Cerro Colorado coinciden con el límite de cuantificación, el cadmio permanece en niveles marginales, lo cual sugiere una menor exposición ambiental en esta zona o una diferencia en el tipo de tejido evaluado.

En cuanto al zinc, los valores registrados son consistentes con los descritos por Guevara et al. (69) en Lima, donde también se observaron niveles elevados de zinc en palomas urbanas. Esta coincidencia puede atribuirse al hecho de que el zinc, a pesar de ser un metal esencial, es comúnmente liberado al ambiente por actividades industriales, tráfico vehicular y productos agrícolas, y tiende a bioacumularse fácilmente, especialmente en tejidos musculares y hepáticos.

Finalmente, aunque los valores de mercurio fueron apenas detectables, la ligera variabilidad encontrada en Cerro Colorado es mayor en comparación con lo observado en Cercado, lo cual podría indicar una mayor exposición en esta zona, posiblemente atribuida a emisiones atmosféricas o actividades residenciales o agrícolas cercanas.

Figura 2.

Niveles de arsénico, plomo, cadmio, zinc y mercurio en muestras de tejido hepático, muscular, óseo y sanguíneo provenientes de palomas de Castilla (*Columba livia*) Medel de Cerro Colorado mediante espectroscopía para monitoreo biológico de contaminación ambiental por bio-centinelas

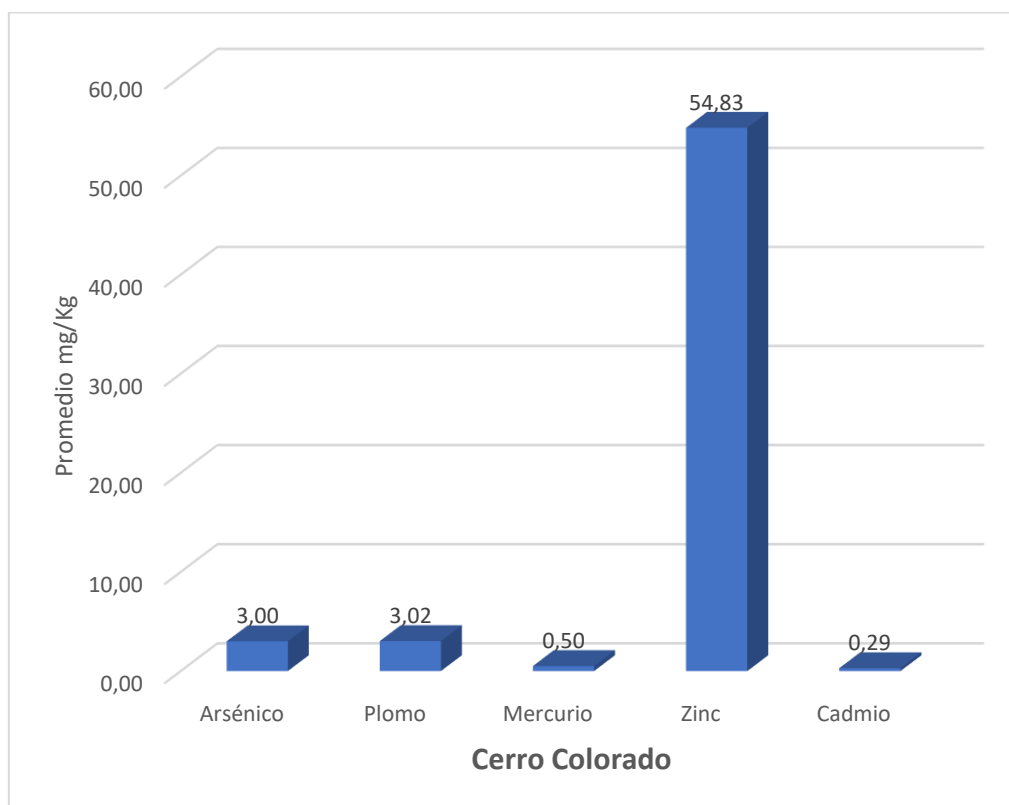


Tabla 9.

Niveles de arsénico, plomo, cadmio, zinc y mercurio en muestras de tejido hepático, muscular, óseo y sanguíneo provenientes de palomas de Castilla (*Columba livia*) Medel de Tiabaya mediante espectroscopía para monitoreo biológico de contaminación ambiental por bio-centinelas

Estadísticos	Arsénico	Plomo	Mercurio	Zinc	Cadmio
Media	3,00	2,99	0,49	48,75	0,29
Desviación	0,00	,00	0,00	34,85	0,00
Mínimo	3,00	2,99	0,49	21,33	0,29
Máximo	3,00	2,99	0,49	122,01	0,29
TAMAÑO	15	15	15	15	15

En las muestras de palomas de Tiabaya, los niveles de arsénico, plomo y mercurio se mantuvieron constantes y en todos los casos estuvieron exactamente en el límite de cuantificación del método, es decir, 3,00 mg/kg para arsénico y plomo, y 0,49 mg/kg para mercurio (apenas por debajo del LCM de 0,50 mg/kg). La ausencia de variabilidad sugiere que no se detectaron concentraciones superiores.

El zinc, por su parte, presentó una media de 48,75 mg/kg, con valores que oscilaron entre 21,33 y 122,01 mg/kg, reflejando una elevada concentración y dispersión en comparación con los demás metales.

En cuanto al cadmio, se encontró un valor constante de 0,29 mg/kg, apenas inferior al límite de cuantificación de 0,30 mg/kg, sin variabilidad entre las muestras.

Este patrón de baja concentración de metales tóxicos coincide en parte con los hallazgos de Gómez (71), quien encontró niveles bajos de cadmio y plomo en búhos reales del sureste español. En ambos estudios se evidencian valores por debajo de los umbrales críticos, lo cual puede reflejar una exposición ambiental limitada en áreas menos urbanizadas o con menor actividad industrial, como parece ser el caso de Tiabaya.

En contraposición, los resultados difieren notablemente de lo reportado por Guevara et al. (69) en Lima y por Valladares-Faundez et al. (70) en Arica, quienes encontraron valores elevados de plomo y cadmio en palomas provenientes de zonas urbanas e industrializadas. Mientras que

en Tiabaya el plomo y el cadmio permanecen en el umbral técnico inferior, en dichos estudios se registraron niveles significativamente más altos, lo que indica que la presión ambiental por metales pesados en Tiabaya es sustancialmente menor que en las grandes ciudades analizadas por estos autores.

La alta concentración de zinc observada en Tiabaya guarda similitud con lo reportado en los otros distritos de Arequipa y en estudios como los de Cui et al. (12) y Guevara et al. (69), quienes también documentaron una presencia significativa de este metal en tejidos de palomas. Esta coincidencia puede deberse tanto a la función biológica del zinc como a su amplia distribución ambiental, ya que es un metal presente en suelos, fertilizantes y fuentes vehiculares, incluso en zonas de baja urbanización.



Figura 3.

Niveles de arsénico, plomo, cadmio, zinc y mercurio en muestras de tejido hepático, muscular, óseo y sanguíneo provenientes de palomas de Castilla (*Columba livia*) Medel de Tiabaya mediante espectroscopía para monitoreo biológico de contaminación ambiental por bio-centinelas

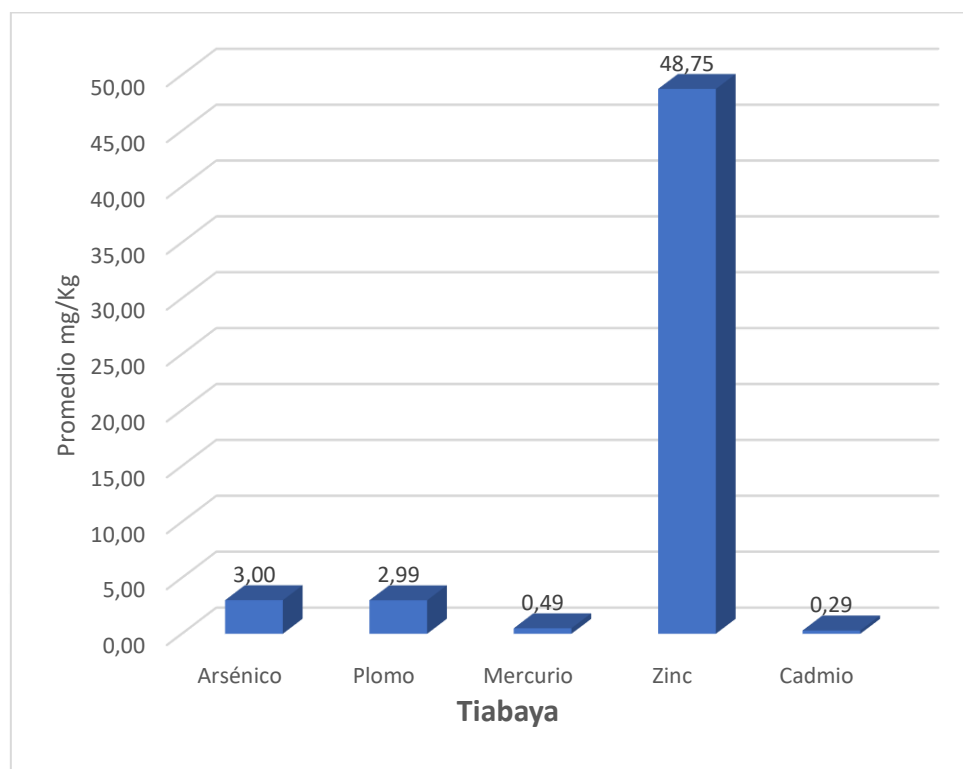


Tabla 10.

Niveles de arsénico, plomo, cadmio, zinc y mercurio en muestras de tejido hepático, muscular, óseo y sanguíneo provenientes de palomas de Castilla (*Columba livia*) Medel de Chivay mediante espectroscopía para monitoreo biológico de contaminación ambiental por bio-centinelas

Estadísticos	Arsénico	Plomo	Mercurio	Zinc	Cadmio
Media	3,00	4,99	0,49	71,11	0,70
Desviación	0,00	5,33	0,00	54,55	0,95
Mínimo	3,00	2,99	0,49	9,78	0,29
Máximo	3,00	23,70	0,49	183,52	3,00
TAMAÑO	15	15	15	15	15

En las muestras de palomas de Chivay, los niveles de arsénico y plomo alcanzaron el límite de cuantificación del método (3,00 mg/kg), aunque en el caso del plomo se observó una alta variabilidad (desviación estándar de 5,33) y valores que llegaron hasta 23,70 mg/kg, lo cual indica una mayor exposición ambiental a este metal respecto a otras zonas.

El mercurio se mantuvo constante en 0,49 mg/kg, justo por debajo del LCM (0,50 mg/kg), sin variaciones entre muestras.

El zinc fue el metal más abundante, con una media de 71,11 mg/kg y un rango que fue de 9,78 a 183,52 mg/kg, lo que evidencia una alta concentración y dispersión, posiblemente reflejando una fuente ambiental significativa.

Por último, el cadmio presentó un valor promedio de 0,70 mg/kg, superando el límite de cuantificación del método (0,30 mg/kg), con una alta desviación estándar de 0,95 y valores máximos de hasta 3,00 mg/kg, lo que sugiere una acumulación considerable de este metal en la zona.

Estos hallazgos presentan varias coincidencias con los antecedentes revisados. En particular, se alinean estrechamente con lo reportado por Valladares-Faundez et al. (70) en la ciudad de Arica, donde se detectaron niveles elevados de plomo, cadmio y arsénico en palomas de Castilla, especialmente en áreas urbanas afectadas por residuos mineros. La situación observada en Chivay podría tener una explicación similar, dada la cercanía de esta localidad a zonas de

actividad minera en la región andina, lo cual puede contribuir a una mayor presencia de contaminantes metálicos en el ambiente.

Asimismo, los resultados coinciden con lo señalado por Guevara et al. (69), quienes encontraron que las concentraciones más altas de metales pesados se detectaron en zonas industriales y urbanas de Lima. El comportamiento del plomo y del cadmio en Chivay guarda una similitud evidente, mostrando una bioacumulación mucho mayor en comparación con distritos como Tiabaya o Cerro Colorado. Esto sugiere una presión ambiental más significativa en Chivay, que podría estar asociada tanto a fuentes mineras como al transporte interregional o uso de productos agrícolas con residuos metálicos.

Por otra parte, el patrón de acumulación de zinc continúa en línea con lo reportado por Cui et al. (12) y Gómez (71), quienes también registraron altos niveles de este metal en aves utilizadas como biomonitores. En Chivay, esta tendencia se acentúa, dado que el zinc fue el metal más abundante y disperso, lo cual puede estar relacionado no solo con fuentes contaminantes externas, sino también con su condición de micronutriente esencial, fácilmente bioacumulable en tejidos como el músculo y el hígado.

La elevada concentración de cadmio, por su parte, representa un hallazgo destacable, ya que en los demás distritos se mantuvo en niveles marginales. Su aumento en Chivay podría estar vinculado a emisiones de origen industrial, residuos agrícolas o infiltración de contaminantes en cuerpos de agua, lo cual coincide con lo reportado en estudios donde se asoció el cadmio con riesgos de salud crónica en aves y humanos expuestos al mismo.

Figura 4.

Niveles de arsénico, plomo, cadmio, zinc y mercurio en muestras de tejido hepático, muscular, óseo y sanguíneo provenientes de palomas de Castilla (*Columba livia*) Medel de Chivay mediante espectroscopía para monitoreo biológico de contaminación ambiental por bio-centinelas

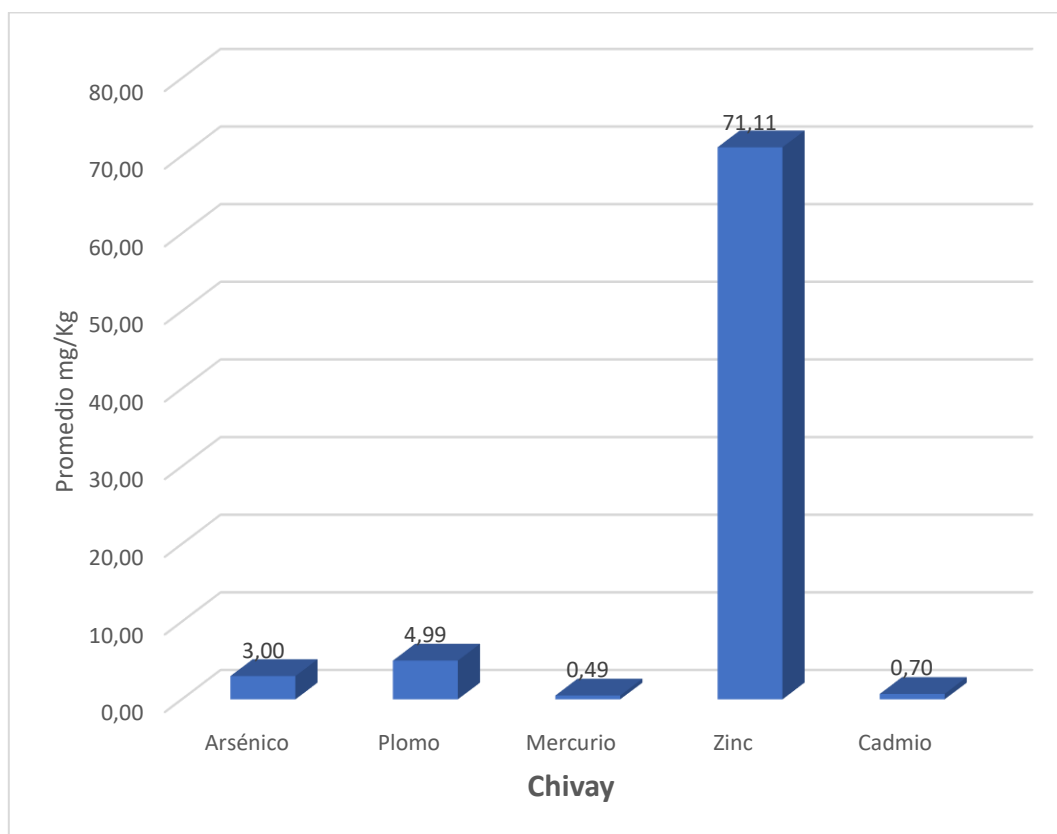


Tabla 11.

Niveles de arsénico en muestras de tejido hepático, muscular, óseo y sanguíneo provenientes de palomas de Castilla (*Columba livia*) Medel mediante espectroscopía para monitoreo biológico de contaminación ambiental por bio-centinelas

Estadísticos	Cercado	C. Colorado	Tiabaya	Chivay
Media	3,00	3,00	3,00	3,00
Desviación	0,00	0,00	0,00	0,00
Mínimo	3,00	3,00	3,00	3,00
Máximo	3,00	3,00	3,00	3,00
TAMAÑO	15	15	15	15
	H=0.00	P>0.05	P=1.00	

La prueba de Kruskal-Wallis arrojó un valor de $H = 0,00$ con una $p = 1,00$, lo cual indica que no existen diferencias estadísticamente significativas en los niveles de arsénico entre los cuatro distritos evaluados (Cercado, Cerro Colorado, Tiabaya y Chivay). Esto implica que, desde una perspectiva estadística, la distribución del arsénico fue homogénea en todas las zonas analizadas.

En términos descriptivos, los valores promedio, mínimos y máximos de arsénico fueron idénticos en todos los distritos: 3,00 mg/kg, que coincide exactamente con el límite de cuantificación del método (LCM). Además, la desviación estándar fue 0,00 en todos los casos, lo que significa que todas las muestras presentaron el mismo valor exacto de arsénico, sin variabilidad alguna.

Este patrón sugiere que la presencia de arsénico no fue cuantificable con mayor precisión, y que todos los resultados se situaron justo en el umbral mínimo detectable, sin evidencia de exposición diferencial entre zonas.

Al contrastar estos hallazgos con los antecedentes de investigación, se aprecia una diferencia importante con los resultados reportados por Valladares-Faundez et al. (70) en Arica, donde se detectaron concentraciones variables y elevadas de arsénico en tejidos de palomas, especialmente en zonas urbanas contaminadas con residuos mineros. En cambio, en Arequipa, específicamente en los distritos estudiados, no se logró evidenciar tal variabilidad ni acumulación significativa.

De forma similar, los estudios de Guevara et al. (69) en Lima sí reportaron niveles detectables y diferenciados de arsénico entre zonas urbanas, rurales e industriales, lo cual contrasta con la homogeneidad registrada en este trabajo. Esta diferencia puede explicarse por factores como la menor presencia de actividades industriales intensivas en los distritos evaluados de Arequipa, o por una posible dispersión más baja del arsénico en esta región



Figura 5.

Niveles de arsénico en muestras de tejido hepático, muscular, óseo y sanguíneo provenientes de palomas de Castilla (*Columba livia*) Medel mediante espectroscopía para monitoreo biológico de contaminación ambiental por bio-centinelas

Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes

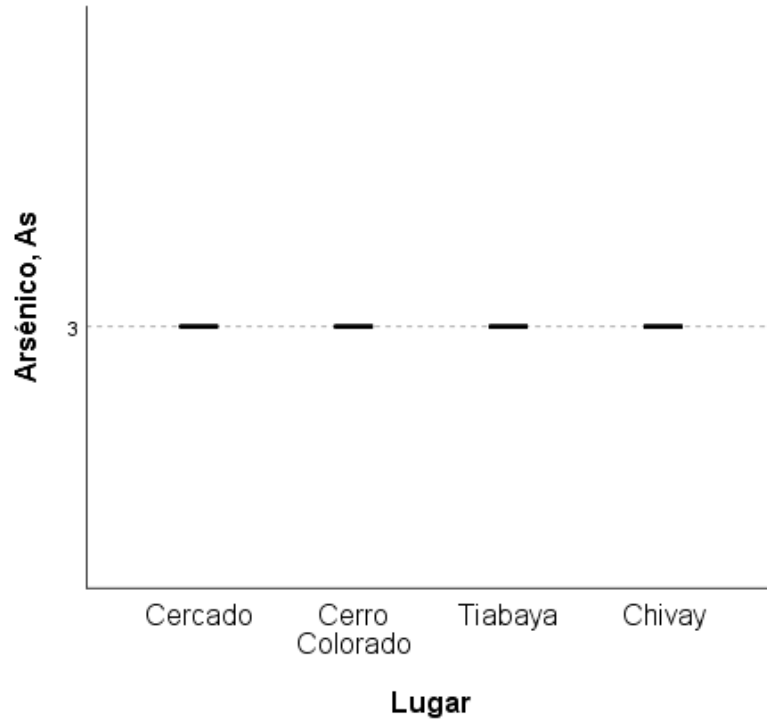


Tabla 12.

Niveles de plomo en muestras de tejido hepático, muscular, óseo y sanguíneo provenientes de palomas de Castilla (*Columba livia*) Medel mediante espectroscopía para monitoreo biológico de contaminación ambiental por bio-centinelas

Estadísticos	Cercado	Cerro Colorado	Tiabaya	Chivay
Media	4,21	3,02	2,99	4,99
Desviación	2,81	0,12	,00	5,33
Mínimo	2,99	2,99	2,99	2,99
Máximo	13,13	3,47	2,99	23,70
TAMAÑO	15	15	15	15
	H=6.92	P>0.05	P=0.07	

La prueba de Kruskal-Wallis arrojó un valor de $H = 6,92$ con una $p = 0,07$. Aunque no alcanza el nivel convencional de significancia estadística ($p < 0,05$), este resultado indica una tendencia a diferencias marginales en los niveles de plomo entre los distritos evaluados. Si bien no se puede afirmar con certeza que las concentraciones difieren estadísticamente, la cercanía al umbral sugiere que podría haber una variabilidad relevante desde el punto de vista biológico o ambiental, especialmente con un tamaño de muestra mayor.

En Cercado, el nivel promedio de plomo fue 4,21 mg/kg, superando el límite de cuantificación del método (3,00 mg/kg), con una desviación estándar de 2,81 y un valor máximo de 13,13 mg/kg, lo que indica una exposición moderada y variable.

En Cerro Colorado, el promedio fue 3,02 mg/kg, apenas por encima del LCM, con muy poca dispersión ($DS = 0,12$), lo que sugiere niveles apenas detectables.

En Tiabaya, los valores fueron constantes (2,99 mg/kg), justo por debajo del LCM, sin variabilidad aparente.

En Chivay, el promedio ascendió a 4,99 mg/kg, con una desviación estándar de 5,33 y un valor máximo de 23,70 mg/kg, lo cual evidencia una alta acumulación de plomo en algunas muestras.

En conjunto, si bien los resultados no son estadísticamente significativos, los niveles más altos y variables detectados en Chivay y Cercado contrastan con los valores bajos o constantes en Tiabaya y Cerro Colorado, lo que podría reflejar diferencias ambientales importantes.

Estos hallazgos coinciden parcialmente con los resultados de Guevara et al. (69), quienes evidenciaron niveles más altos de plomo en palomas de zonas urbanas e industriales de Lima. En su investigación, el tejido hepático acumuló mayor cantidad del metal, con valores superiores en distritos con alta carga vehicular o proximidad a industrias. El comportamiento observado en Cercado y Chivay podría estar asociado a condiciones similares: en Cercado, por la concentración urbana y el tráfico; y en Chivay, posiblemente por la cercanía a zonas mineras o actividades agrícolas que involucren el uso de materiales contaminantes.

Asimismo, Valladares-Faundez et al. (70) reportaron en Arica una situación comparable, donde se encontraron niveles elevados de plomo en palomas capturadas en zonas cercanas a residuos mineros. El caso de Chivay muestra una clara similitud, especialmente por los valores extremos (hasta 23,70 mg/kg), lo que podría estar indicando una fuente ambiental de contaminación sostenida o localizada en esa área.

Por el contrario, los valores casi constantes y bajos de Tiabaya coinciden con zonas rurales o menos industrializadas descritas en los estudios previos, donde la bioacumulación de plomo fue mínima o nula. Esta diferencia entre distritos también es compatible con lo señalado por Cui et al. (12), quienes demostraron que la concentración de plomo en tejidos de palomas puede reflejar de manera precisa las condiciones atmosféricas locales, con mayor acumulación en zonas urbanizadas.

Figura 6.

Niveles de plomo en muestras de tejido hepático, muscular, óseo y sanguíneo provenientes de palomas de Castilla (*Columba livia*) Medel mediante espectroscopía para monitoreo biológico de contaminación ambiental por bio-centinelas

Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes

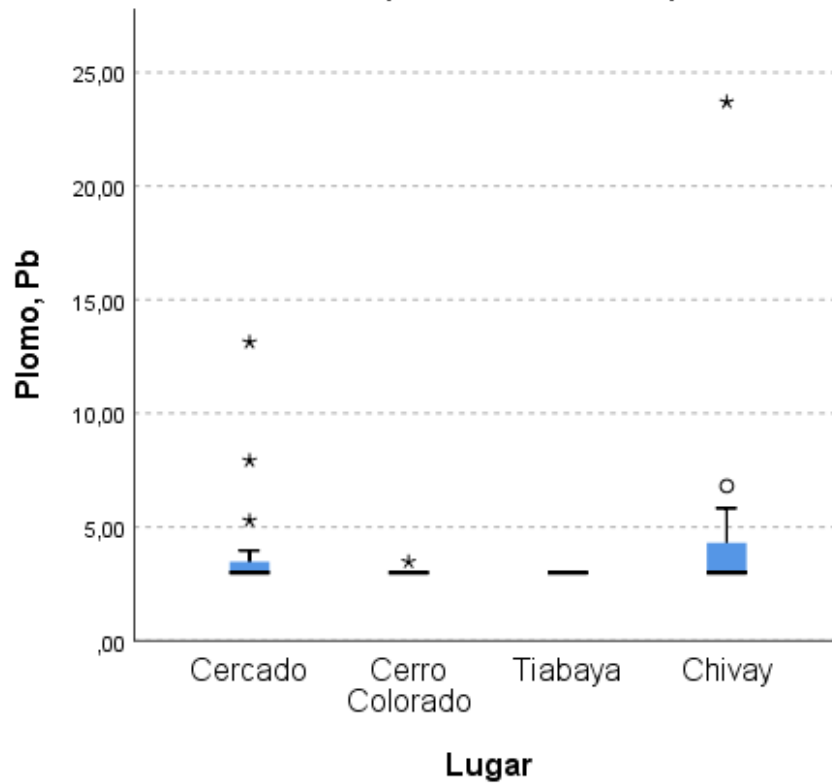


Tabla 13.

Niveles de mercurio en muestras de tejido hepático, muscular, óseo y sanguíneo provenientes de palomas de Castilla (*Columba livia*) Medel mediante espectroscopía para monitoreo biológico de contaminación ambiental por bio-centinelas

Estadísticos	Cercado	Cerro Colorado	Tiabaya	Chivay
Media	0,49	0,50	0,49	0,49
Desviación	0,00	0,05	0,00	0,00
Mínimo	0,49	0,49	0,49	0,49
Máximo	0,49	0,70	0,49	0,49
TAMAÑO	15	15	15	15
	H=3.00	P>0.05	P=0.39	

La prueba de Kruskal-Wallis obtuvo un valor de $H = 3,00$ con una $p = 0,39$, lo que indica que no existen diferencias estadísticamente significativas en los niveles de mercurio entre los distritos de Cercado, Cerro Colorado, Tiabaya y Chivay. Esto sugiere que, desde el punto de vista estadístico, la distribución del mercurio fue similar en todas las zonas estudiadas.

En Cercado, Tiabaya y Chivay, los niveles de mercurio fueron constantes en todas las muestras, con un valor promedio de $0,49$ mg/kg, exactamente por debajo del límite de cuantificación del método ($LCM = 0,50$ mg/kg), y sin desviación estándar. Esto indica una presencia mínima y uniforme del metal.

En Cerro Colorado, el promedio fue ligeramente superior ($0,50$ mg/kg), alcanzando el LCM, con una desviación estándar leve ($0,05$) y un valor máximo de $0,70$ mg/kg, lo que sugiere una ligera variabilidad y la presencia de muestras con niveles apenas cuantificables por encima del umbral técnico.

En general, los datos muestran que el mercurio se encuentra en niveles bajos o apenas detectables en todas las zonas, sin diferencias marcadas, aunque Cerro Colorado presenta una leve elevación respecto a los demás distritos.

Estos hallazgos coinciden parcialmente con los resultados de Cui et al. (12), quienes encontraron acumulaciones moderadas de mercurio en tejidos de palomas utilizadas como

biomonitores en ciudades chinas con alta contaminación atmosférica. Si bien los valores reportados por esos autores fueron mayores, el patrón de detección consistente con la contaminación aérea también es observable en Cerro Colorado, aunque en menor magnitud, posiblemente debido a diferencias en la escala urbana e industrial.

Asimismo, la baja concentración y la homogeneidad en los otros tres distritos contrastan con lo reportado por Valladares-Faundez et al. (70), quienes no enfocaron su estudio en mercurio, pero sí detectaron altos niveles de otros metales pesados en contextos de contaminación urbana e industrial. La ausencia de mercurio en niveles elevados en el presente estudio podría estar relacionada con el tipo de fuentes presentes en Arequipa, donde la exposición a este metal es menos intensa o localizada, en comparación con regiones mineras de mercurio o con altos niveles de incineración de residuos.

También es relevante considerar que, según la literatura científica, el mercurio es altamente bioacumulable, particularmente en ambientes acuáticos. Por tanto, su baja detección en ambientes predominantemente terrestres y urbanos como los distritos estudiados podría explicarse por la escasa presencia de cuerpos de agua contaminados o fuentes directas de emisión como la minería aurífera o la quema intensiva de combustibles fósiles.

Figura 7.

Niveles de mercurio en muestras de tejido hepático, muscular, óseo y sanguíneo provenientes de palomas de Castilla (*Columba livia*) Medel mediante espectroscopía para monitoreo biológico de contaminación ambiental por bio-centinelas

Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes

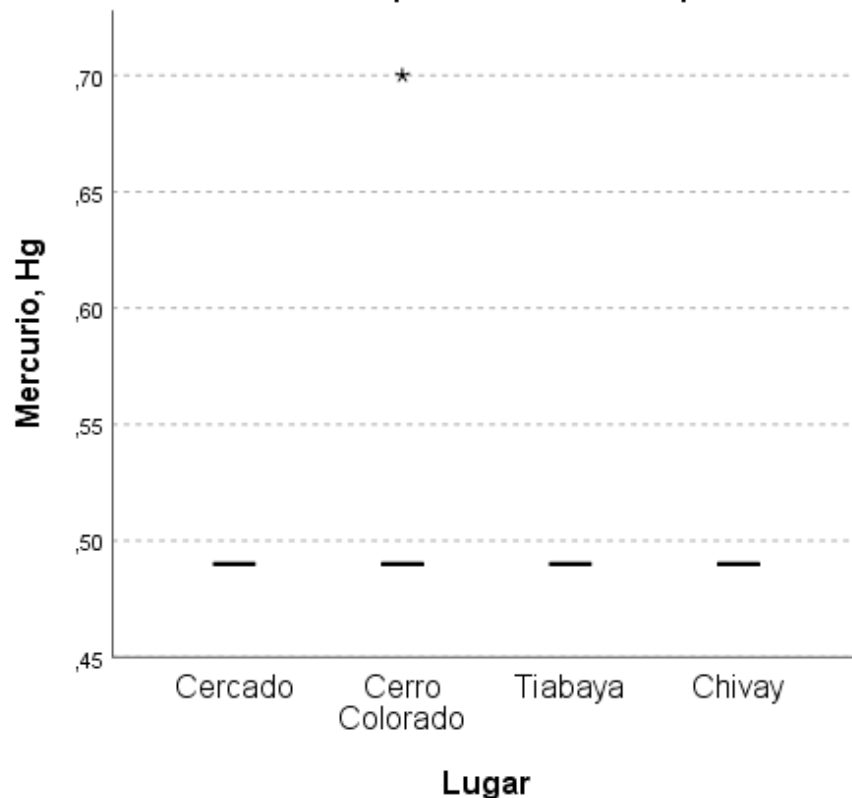


Tabla 14.

Niveles de zinc en muestras de tejido hepático, muscular, óseo y sanguíneo provenientes de palomas de Castilla (*Columba livia*) Medel mediante espectroscopía para monitoreo biológico de contaminación ambiental por bio-centinelas

Estadísticos	Cercado	Cerro Colorado	Tiabaya	Chivay
Media	41,53	54,83	48,75	71,11
Desviación	38,39	50,11	34,85	54,55
Mínimo	10,60	17,19	21,33	9,78
Máximo	133,20	189,97	122,01	183,52
TAMAÑO	15	15	15	15
	H=2.56	P>0.05	P=0.46	

La prueba de Kruskal-Wallis arrojó un valor de $H = 2,56$ con una $p = 0,46$, lo cual indica que no existen diferencias estadísticamente significativas en los niveles de zinc entre los distritos evaluados. Por tanto, se concluye que la variabilidad observada en las concentraciones no es atribuible a la ubicación geográfica de las muestras.

En Cercado, la media fue de 41,53 mg/kg, con una desviación estándar de 38,39, y un rango amplio de 10,60 a 133,20 mg/kg, lo que indica alta variabilidad entre muestras.

En Cerro Colorado, el zinc presentó la media más alta (54,83 mg/kg) con la desviación estándar también más elevada (50,11), alcanzando un máximo de 189,97 mg/kg, lo que refleja una posible sobrecarga ambiental significativa.

En Tiabaya, el promedio fue de 48,75 mg/kg, con valores que oscilaron entre 21,33 y 122,01 mg/kg, mostrando una tendencia similar de concentración elevada.

En Chivay, el zinc alcanzó la media más alta después de Cerro Colorado (71,11 mg/kg), con gran dispersión ($DS = 54,55$) y un rango de 9,78 a 183,52 mg/kg.

A pesar de la falta de significancia estadística, los valores descriptivos revelan que el zinc se encuentra presente en concentraciones mucho más elevadas que otros metales y con gran variabilidad en todas las zonas, lo cual puede estar vinculado tanto a fuentes ambientales como a su papel biológico esencial como oligoelemento.

Los resultados obtenidos son consistentes con los hallazgos reportados por Guevara et al. (69), quienes identificaron niveles altos de zinc en palomas de Castilla en diversos sectores urbanos e industriales de Lima, señalando que este metal tiende a acumularse incluso en zonas con baja presión ambiental aparente. Dicha coincidencia refuerza la idea de que el zinc, aunque esencial, puede alcanzar niveles elevados por acumulación fisiológica o por exposición continua a fuentes ambientales comunes.

Asimismo, Cui et al. (12) observaron también una importante presencia de zinc en tejidos de palomas en Beijing y Guangzhou, lo que reafirma su tendencia a bioacumularse en aves urbanas, sin necesariamente implicar un riesgo toxicológico inmediato, dado que el zinc forma parte de los sistemas enzimáticos y procesos celulares de los vertebrados.

Por otro lado, aunque Gómez (71) y Valladares-Faundez et al. (70) incluyeron el zinc dentro de los metales analizados en búhos y palomas respectivamente, en sus estudios no fue considerado como el metal más crítico en términos de toxicidad, justamente por su condición de oligoelemento. Sin embargo, sí se reconoce que su exceso puede desplazar o interferir con la absorción de otros minerales como el cobre, generando desequilibrios nutricionales en especies sensibles.

Figura 8.

Niveles de zinc en muestras de tejido hepático, muscular, óseo y sanguíneo provenientes de palomas de Castilla (*Columba livia*) Medel mediante espectroscopía para monitoreo biológico de contaminación ambiental por bio-centinelas

Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes

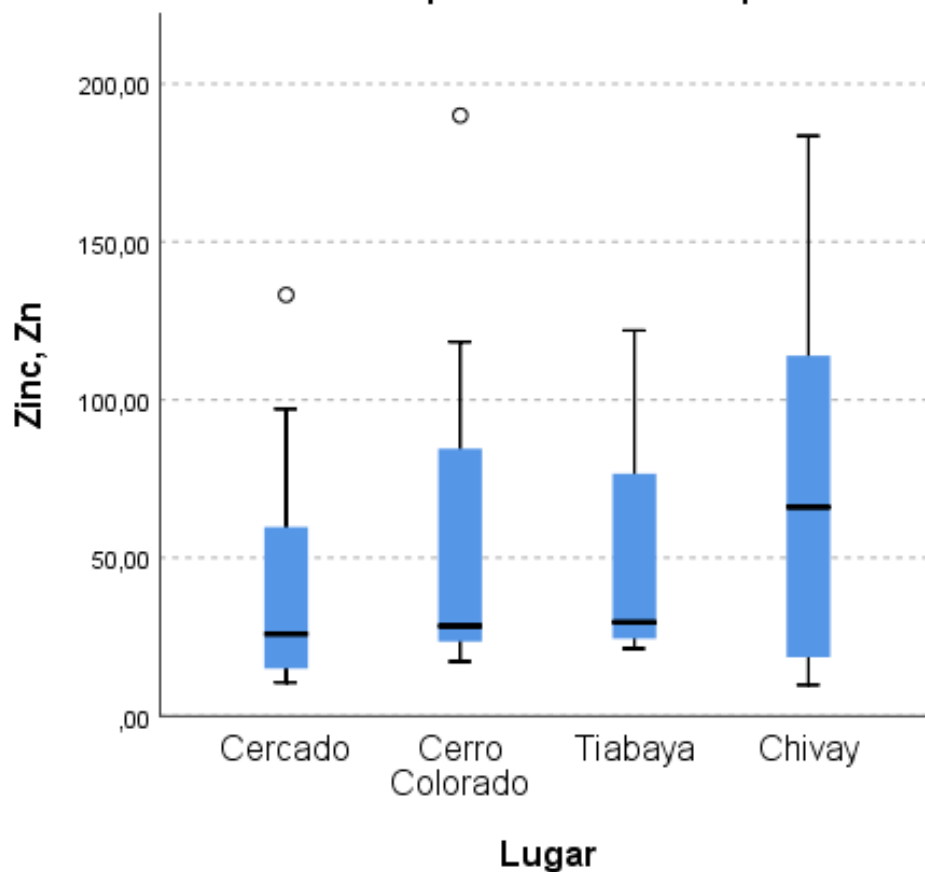


Tabla 15.

Niveles de cadmio en muestras de tejido hepático, muscular, óseo y sanguíneo provenientes de palomas de Castilla (*Columba livia*) Medel mediante espectroscopía para monitoreo biológico de contaminación ambiental por bio-centinelas

Estadísticos	Cercado	Cerro Colorado	Tiabaya	Chivay
Media	0,29	0,29	0,29	0,70
Desviación	0,00	0,01	0,00	0,95
Mínimo	0,29	0,29	0,29	0,29
Máximo	0,29	0,31	0,29	3,00
TAMAÑO	15	15	15	15
	H=5.96	P>0.05	P=0.11	

La prueba de Kruskal-Wallis reportó un valor de $H = 5,96$ con una $p = 0,11$, lo que indica que no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los niveles de cadmio en los cuatro distritos analizados. Sin embargo, el valor de p relativamente cercano a $0,05$ sugiere una posible tendencia a la diferencia, que podría revelarse como significativa con un mayor tamaño de muestra.

En Cercado, Cerro Colorado y Tiabaya, los niveles de cadmio fueron constantes en $0,29$ mg/kg, ligeramente por debajo del límite de cuantificación del método ($0,30$ mg/kg), y sin variación alguna, lo que sugiere una presencia mínima del metal.

En Chivay, en cambio, se evidenció una media de $0,70$ mg/kg, más del doble del LCM, con una desviación estándar de $0,95$ y valores máximos que alcanzaron $3,00$ mg/kg. Esto refleja una acumulación considerable y variable del metal en esta zona, distinta al patrón uniforme observado en los otros distritos.

En resumen, aunque los resultados no son concluyentes desde el punto de vista estadístico, los datos descriptivos muestran que Chivay presenta una carga significativamente mayor de cadmio, lo cual podría ser indicativo de contaminación ambiental localizada o exposición diferencial en esa población de bio-centinelas.

La elevada concentración de cadmio registrada en Chivay coincide estrechamente con los hallazgos de Valladares-Faundez et al. (70) en Arica, donde también se detectaron altos niveles de cadmio en palomas urbanas expuestas a residuos mineros. Dado que Chivay se encuentra en una región andina donde la actividad minera y el uso de pesticidas son más frecuentes, es posible que estas prácticas contribuyan a la bioacumulación del metal en las aves de la zona.

Asimismo, en el estudio de Guevara et al. (69) en Lima, se encontraron niveles detectables de cadmio en hígados de palomas recolectadas en zonas industriales y urbanas. En comparación, los valores observados en Cercado, Cerro Colorado y Tiabaya fueron bajos y homogéneos, lo que indica que en estas zonas la exposición al cadmio sería mínima o inexistente. En cambio, Chivay presenta un perfil más similar al de contextos de contaminación focalizada, lo que subraya su potencial como zona crítica de monitoreo.

En línea con estos hallazgos, Cui et al. (12) también reportaron acumulación de cadmio en palomas de ciudades chinas, asociando sus niveles con la polución atmosférica y la contaminación del suelo. El caso de Chivay podría guardar una similitud, considerando la influencia de la topografía, las fuentes puntuales de emisión y los patrones de movilidad de las aves que permanecen dentro de radios limitados de actividad humana.

Figura 9.

Niveles de cadmio en muestras de tejido hepático, muscular, óseo y sanguíneo provenientes de palomas de Castilla (*Columba livia*) Medel mediante espectroscopía para monitoreo biológico de contaminación ambiental por bio-centinelas

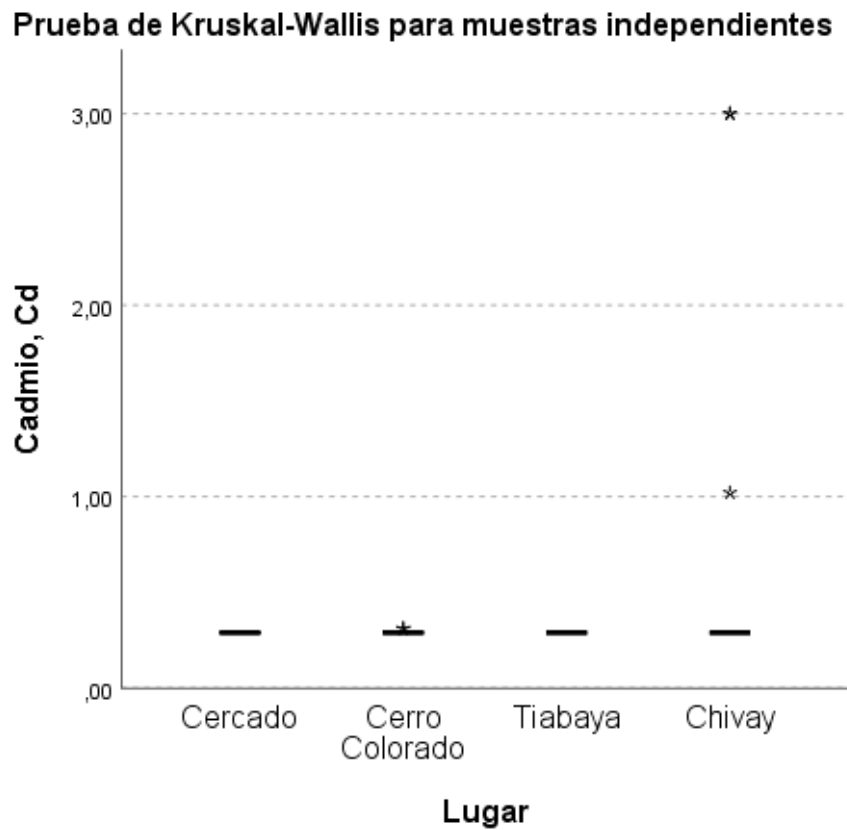


Tabla 16.

Niveles de arsénico en muestras de tejido hepático, muscular y óseo provenientes de palomas de Castilla (*Columba livia*) Medel mediante espectroscopía para monitoreo biológico de contaminación ambiental por bio-centinelas

Estadísticos	Hígado	Hueso	Músculo
Media	3,00	3,00	3,00
Desviación	0,00	0,00	0,00
Mínimo	3,00	3,00	3,00
Máximo	3,00	3,00	3,00
TAMAÑO	20	20	20
	H=0.00	P>0.05	P=1.00

La Tabla 16 presenta los niveles de arsénico en tres tipos de tejidos (hepático, óseo y muscular) extraídos de palomas de Castilla (*Columba livia*), con el fin de evaluar su utilidad como bio-centinelas en el monitoreo de contaminación ambiental.

Los resultados evidencian que todos los valores promedio fueron idénticos en los tres tipos de tejido: 3,00 mg/kg, que corresponde exactamente al límite de cuantificación del método (LCM). Asimismo, la desviación estándar fue de 0,00, y los valores mínimo y máximo también fueron de 3,00 mg/kg en todos los casos. Es decir, no se observó ninguna variabilidad entre las muestras ni entre los tejidos.

Desde el punto de vista estadístico, la prueba de Kruskal-Wallis arrojó un valor de $H = 0,00$ con una $p = 1,00$, lo que indica que no existe diferencia estadísticamente significativa entre los niveles de arsénico en los tejidos evaluados.

Tabla 17.

Niveles de plomo en muestras de tejido hepático, muscular y óseo provenientes de palomas de Castilla (*Columba livia*) Medel mediante espectroscopía para monitoreo biológico de contaminación ambiental por bio-centinelas

Estadísticos	Hígado	Hueso	Músculo
Media	3,04	5,51	2,99
Desviación	0,22	5,11	0,00
Mínimo	2,99	2,99	2,99
Máximo	3,96	23,70	2,99
TAMAÑO	20	20	20
	H=16.39	P<0.05	P=0.00

La Tabla 17 muestra los niveles de plomo en muestras de tejido hepático, óseo y muscular de palomas de Castilla (*Columba livia*), y la comparación entre estos tejidos se evaluó mediante la prueba de Kruskal-Wallis, la cual arrojó un valor de $H = 16,39$ con una $p < 0,05$ ($p = 0,00$), lo que indica que existen diferencias estadísticamente significativas en los niveles de plomo entre los diferentes tipos de tejidos analizados.

Desde el punto de vista descriptivo, el tejido óseo fue el que presentó la mayor concentración media de plomo (5,51 mg/kg), con una desviación estándar considerable (5,11), un valor mínimo de 2,99 mg/kg y un valor máximo que alcanzó los 23,70 mg/kg, lo que evidencia una alta variabilidad y acumulación de este metal en los huesos.

El tejido hepático presentó un nivel promedio más bajo de plomo (3,04 mg/kg), con una desviación estándar mucho menor (0,22), y valores que oscilaron entre 2,99 y 3,96 mg/kg. Aunque estos valores también están por encima del límite de cuantificación (3,00 mg/kg), su dispersión fue considerablemente menor que en el tejido óseo.

En contraste, el tejido muscular mostró niveles constantes de plomo, con una media de 2,99 mg/kg, igual al valor mínimo y máximo registrado, y una desviación estándar de 0,00, lo que indica ausencia total de variabilidad y una acumulación prácticamente nula o justo en el umbral inferior del método.

Tabla 18.

Niveles de mercurio en muestras de tejido hepático, muscular y óseo provenientes de palomas de Castilla (*Columba livia*) Medel mediante espectroscopía para monitoreo biológico de contaminación ambiental por bio-centinelas

Estadísticos	Hígado	Hueso	Músculo
Media	0,50	0,49	0,49
Desviación	0,05	0,00	0,00
Mínimo	0,49	0,49	0,49
Máximo	0,70	0,49	0,49
TAMAÑO	20	20	20
	H=2.00	P>0.05	P=0.36

La Tabla 18 presenta los niveles de mercurio detectados en los tejidos hepático, óseo y muscular de palomas de Castilla (*Columba livia*), con el objetivo de evaluar si existe una diferencia significativa en la distribución de este metal entre los distintos tipos de tejido. Para ello, se aplicó la prueba de Kruskal-Wallis, que arrojó un valor de $H = 2,00$ con una $p = 0,36$, lo que indica que no existen diferencias estadísticamente significativas en los niveles de mercurio entre los tejidos analizados.

En cuanto a los resultados descriptivos, se observa que, tanto en el tejido óseo como en el muscular, el nivel promedio de mercurio fue de 0,49 mg/kg, con una desviación estándar de 0,00, lo cual indica que en todas las muestras analizadas los valores fueron exactamente iguales y constantes. Esto sugiere una presencia mínima y uniforme del metal en estos dos tipos de tejido, justo por debajo del límite de cuantificación del método (0,50 mg/kg).

Por su parte, el tejido hepático presentó un valor promedio ligeramente superior, de 0,50 mg/kg, con una desviación estándar de 0,05 y un valor máximo de 0,70 mg/kg, lo que indica una ligera variabilidad entre las muestras, aunque aún dentro de un rango bajo y cercano al umbral mínimo de detección.

Tabla 19.

Niveles de zinc en muestras de tejido hepático, muscular y óseo provenientes de palomas de Castilla (*Columba livia*) Medel mediante espectroscopía para monitoreo biológico de contaminación ambiental por bio-centinelas

Estadísticos	Hígado	Hueso	Músculo
Media	35,41	106,78	24,12
Desviación	22,85	34,13	24,62
Mínimo	10,68	66,06	9,78
Máximo	113,76	189,97	127,73
TAMAÑO	20	20	20
	H=37.80	P<0.05	P=0.00

La Tabla 19 muestra los niveles de zinc en muestras de tejido hepático, óseo y muscular de palomas de Castilla (*Columba livia*), con el propósito de evaluar si existen diferencias significativas en la acumulación de este metal entre los diferentes tipos de tejido. Para ello, se aplicó la prueba de Kruskal-Wallis, la cual arrojó un valor de $H = 37,80$ con una $p < 0,05$ ($p = 0,00$), indicando que sí existen diferencias estadísticamente significativas en los niveles de zinc entre los tres tipos de tejidos analizados.

Desde el punto de vista descriptivo, el tejido óseo presentó la concentración promedio más alta de zinc, con 106,78 mg/kg, una desviación estándar de 34,13, un valor mínimo de 66,06 mg/kg y un máximo de 189,97 mg/kg. Estos valores evidencian una alta acumulación del metal en el hueso, con una notable variabilidad entre las muestras.

En segundo lugar, el hígado mostró un promedio de 35,41 mg/kg, con una desviación estándar de 22,85 y un rango de 10,68 a 113,76 mg/kg. Esta variabilidad también fue considerable, aunque menor que la observada en el hueso, lo que sugiere una capacidad intermedia de este tejido para almacenar zinc.

El tejido muscular, por su parte, presentó la concentración más baja, con un promedio de 24,12 mg/kg, una desviación estándar de 24,62 y valores que oscilaron entre 9,78 y 127,73 mg/kg. A pesar de ser el tejido con la menor media, su variabilidad fue amplia, lo que sugiere una exposición ambiental irregular o una diferencia individual en los mecanismos fisiológicos de acumulación.

Tabla 20.

Niveles de cadmio en muestras de tejido hepático, muscular y óseo provenientes de palomas de Castilla (*Columba livia*) Medel mediante espectroscopía para monitoreo biológico de contaminación ambiental por bio-centinelas

Estadísticos	Hígado	Hueso	Músculo
Media	0,46	0,43	0,29
Desviación	0,62	0,62	0,00
Mínimo	0,29	0,29	0,29
Máximo	3,00	3,00	0,31
TAMAÑO	20	20	20

H=1.72 P>0.05 P=0.42

La Tabla 20 presenta los niveles de cadmio en muestras de tejido hepático, óseo y muscular de palomas de Castilla (*Columba livia*), con el fin de comparar la distribución de este metal entre los distintos tipos de tejido. La comparación estadística se realizó mediante la prueba de Kruskal-Wallis, la cual arrojó un valor de $H = 1,72$ con una $p = 0,42$, lo que indica que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los niveles de cadmio en los tejidos analizados.

En términos descriptivos, el tejido hepático presentó una media de 0,46 mg/kg, con una desviación estándar de 0,62 y un rango que fue de 0,29 hasta un máximo de 3,00 mg/kg. Esta variabilidad sugiere que, aunque en la mayoría de muestras el cadmio estuvo cerca del límite de cuantificación (0,30 mg/kg), algunas presentaron una bioacumulación considerable en el hígado.

En el tejido óseo, el valor promedio fue muy similar, 0,43 mg/kg, con la misma desviación estándar de 0,62, y con un rango también entre 0,29 y 3,00 mg/kg. Esto muestra que el hueso también tiene la capacidad de acumular cadmio, aunque no de forma significativamente diferente al hígado.

Por el contrario, el tejido muscular mostró niveles constantes y mínimos de cadmio, con una media de 0,29 mg/kg, sin desviación estándar (0,00) y con valores mínimo y máximo idénticos, lo que indica que en todas las muestras analizadas el cadmio estuvo justo en el umbral inferior de detección y sin variación alguna.

CONCLUSIONES

- Primera.** Se logró identificar los niveles de arsénico, plomo, cadmio, zinc y mercurio en muestras de tejido hepático, muscular, óseo y sanguíneo de palomas de Castilla (*Columba livia*) mediante espectroscopía ICP-OES. Los resultados mostraron que el zinc fue el metal con mayor concentración y variabilidad en todas las zonas evaluadas, mientras que el arsénico, plomo, cadmio y mercurio presentaron niveles más bajos y en varios casos se ubicaron en el límite de cuantificación del método, con excepción de Chivay, donde se evidenció una mayor acumulación de plomo y cadmio.
- Segunda.** Se determinó que la paloma de Castilla es una especie biológicamente apta para ser utilizada como centinela en el biomonitoreo ambiental de metales pesados. Su amplia distribución urbana y su contacto constante con el entorno contaminado permiten evidenciar la bioacumulación de metales pesados de manera eficaz, especialmente en tejidos como el hígado, hueso y músculo.
- Tercera.** Aunque se observó cierta variabilidad descriptiva en los niveles de plomo, cadmio y zinc entre los distritos evaluados, las pruebas estadísticas no mostraron diferencias significativas ($p > 0.05$). Esto sugiere que, desde el punto de vista estadístico, no se puede afirmar que exista una diferencia real en los niveles de metales pesados entre zonas, aunque Chivay presentó valores notablemente más altos en términos descriptivos.
- Cuarta.** Se concluye que los tipos de muestra utilizados (tejido hepático, muscular, óseo y sanguíneo) resultaron adecuados para la detección de metales pesados. En particular, el tejido hepático y óseo mostraron mayor utilidad para reflejar acumulaciones crónicas de plomo y cadmio, lo cual demuestra que estas matrices biológicas pueden ser empleadas en futuras investigaciones en especies silvestres en las que la eutanasia no sea viable por razones de conservación.

RECOMENDACIONES

- Primera.** Implementar programas de monitoreo ambiental con aves urbanas como biomonitores, considerando que las palomas (*Columba livia*) demostraron presencia de metales pesados, se recomienda desarrollar programas de monitoreo ambiental que utilicen a esta especie como indicador de contaminación en zonas urbanas. Esto permitiría obtener datos continuos sobre la calidad ambiental sin afectar especies en peligro.
- Segunda.** Incorporar los hallazgos en políticas públicas de gestión ambiental en Arequipa. Las autoridades regionales y municipales deberían incluir estrategias basadas en biomonitoreo con fauna urbana dentro de sus planes de vigilancia ambiental. Esto facilitaría la detección temprana de focos de contaminación, especialmente aquellos relacionados con actividades mineras y metalúrgicas en la región.
- Tercera.** Se sugiere profundizar en investigaciones que evalúen la posible transferencia de metales pesados desde aves urbanas hacia humanos y otros animales, así como su impacto en la salud. Esto permitirá dimensionar el riesgo y orientar campañas preventivas en salud pública.
- Cuarta.** Ampliar las investigaciones hacia otras especies y diferentes zonas urbanas y rurales para validar la eficacia de las palomas como biomonitores, es necesario compararlas con otras especies indicadoras y replicar el estudio en distintas áreas de Arequipa y otras regiones afectadas por minería. Esto permitirá diseñar un modelo de monitoreo aplicable a nivel regional y nacional.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **Frisancho, Jean.** Arequipa: de 1443 millones de canon y regalías mineras solo se ha ejecutado alrededor de 736. *Arequipa: de 1443 millones de canon y regalías mineras solo se ha ejecutado alrededor de 736.* [En línea] Diciembre de 2023. [Citado el: 30 de Abril de 2024.] <http://www.elbuho.pe>.
2. **Rafiq, Hina, y otros.** Molecular Taxonomy and Phylogenetic Analysis of Dove and Pigeon Species (Aves: Columbidae) of Pakistan, Based on COI Pigeon Species (Aves: Columbidae) of Pakistan, Based on COI Region of Mitochondrial DNA Region of Mitochondrial DNA. [En línea] 2020.
3. **Pulido, Víctor.** A cinco siglos de la introducción de la paloma de Castilla (*Columba livia* Gmelin, 1789) en el Perú. [En línea] Diciembre de 2023.
4. **Cano-Terriza, David, y otros.** Epidemiological survey of zoonotic pathogens in feral pigeons (*Columba livia* var. domestica) and sympatric zoo species in Southern Spain. [En línea] December de 2015.
5. **IUCN.** *IUCN Red List.* [En línea] 2023. [Citado el: 21 de Abril de 2024.] <https://www.iucnredlist.org/>.
6. **Brand, R., Snell, Howard y Vargas, Hernán.** Feral rock doves in the Galápagos Islands: biological and economic threats. [En línea] Diciembre de 2003.
7. **Zúñiga, Erika, León, Daphne y Falcón, Néstor.** Plagas Urbanas: Las palomas y su impacto sobre el ambiente y la salud pública. [En línea] 2017.
8. **Estado Peruano.** *gob.pe.* [En línea] 2022. [Citado el: 26 de Abril de 2024.] <http://www.gob.pe>.
9. **Chitty, John.** Pigeons and doves. [aut. libro] British Small Animal Veterinary Association. [ed.] Elizabeth Mullineaux y Emma Keeble. *BSAVA Manual of Wildlife Casualties.* Gloucester : British Small Animal Veterinary Association, 2016, págs. 389-397.
10. **Coxen, Christopher, Collins, Daniel y Carleton, Scott.** Capture and injury rates of Band-tailed Pigeons using whoosh nets. [En línea] Mayo de 2018.
11. **Chitty, John.** Gamebirds. [aut. libro] BSAVA. [ed.] Elizabeth Mullineaux y Emma Keeble. *BSAVA Manual of Wildlife Casualties.* Gloucester : British Small Animal Veterinary Association , 2016, pág. 490.
12. **Cui, Jai, y otros.** Use of homing pigeons as biomonitors of atmospheric metal concentrations in Beijing and Guangzhou, China. [En línea] Abril de 216.
13. **Tabor, Gary y Aguirre, Alonso.** Ecosystem Health and Sentinel Species: Adding an Ecological Element to the Proverbial “Canary in the Mineshaft”. [En línea] Mayo de 2004.
14. **Abuduwaili, J, Jiang, F y Liu, D.** Heavy metal bioaccumulation in feral pigeons (*Columba livia*) around mining and urban areas. [En línea] 2020.
15. **Zalups, R K.** Molecular interactions with mercury in the kidney. [En línea] 2000.

16. **Palacios, Ítalo-del-Carmen y Castro, Denny.** Contaminación ambiental. [En línea] Abril-Junio de 2022.
17. **World Health Organization.** Zinc in Drinking-water. [aut. libro] World Health Organization. *Guidelines for Drinking-water Quality*. Génova : s.n., 1996.
18. **Martínez-Haro, M, Green, A J y Mateo, R.** Effects of lead exposure on birds' immune response. [En línea] 2011.
19. **Godt, J, y otros.** The toxicity of cadmium and resulting hazards for human health. [En línea] 2006.
20. **Jadaa, Waleed y Mohammed, Hamad.** Heavy Metals – Definition, Natural and Anthropogenic Sources of Releasing into Ecosystems, Toxicity, and Removal Methods – An Overview Study. [En línea] Mayo de 2023.
21. **Ali, Hazrat y Khan, Ezzat.** What are heavy metals? Long-standing controversy over the scientific use of the term “heavy metals”—Proposal of a comprehensive definition. [En línea] Diciembre de 2017.
22. **Burger, J y Gochfeld, M.** Heavy metal concentrations in feathers of birds from the Philippines. [En línea] 2000.
23. **Hutton, M.** Accumulation of heavy metals and selenium in tissues of birds from Britain. 1981. Vol. 26, 2, págs. 129–144.
24. **Evers , D C, y otros.** Adverse effects from environmental mercury loads on breeding common loons. 2008. Vol. 17, 2, págs. 69–81.
25. **Scheuhammer, A M, y otros.** Effects of environmental methylmercury on the health of wild birds, mammals, and fish. 2007. Vol. 36, 1, págs. 12–18.
26. **Draghici, Camelia, y otros.** *Heavy Metals Determination in Environmental and Biological Samples*. Dordrecht : s.n., 2010. págs. 145-158.
27. **Skoog, D A, Holler, F J y Crouch, S R.** *Principios de análisis instrumental*. . México : Cengage Learning, 2007.
28. **Krachler, M y Shotyk, W.** Analytical methods for the determination of selected heavy metals in solid environmental samples. 2009. Vol. 28, 2, págs. 143–154.
29. **Chen, M, y otros.** Determination of trace metals in animal tissues by ICP-OES. 2001, Vol. 55, págs. 1171–1177.
30. **Perkin, Elmer.** Determination of Heavy Metals in Biological Samples Using the Optima 8000 ICP-OES. 2014. Vol. 22, 3.
31. **INACAL.** *Norma Técnica Peruana NTP 214.001:2020. Métodos para la determinación de metales pesados en alimentos*. Lima : Instituto Nacional de Calidad del Perú, 2020.
32. **Hu, Z, Richter, R y Barnes, R M.** Determination of trace elements in environmental and biological materials by ICP-MS and ICP-OES. 3 de 1996. Vol. 322, 2, págs. 193–201.

33. **Mandal, B K y Suzuki , K T.** Arsenic round the world: a review. 2002. Vol. 58, 1, págs. 201–235.
34. **Smith, A H, Lingas, E O y Rahman, M.** Contamination of drinking-water by arsenic in Bangladesh: a public health emergency. 2000. Vol. 78, 9, págs. 1093–1103.
35. **Vahter, M.** Mechanisms of arsenic biotransformation. 2002. Vol. 1817, págs. 211–217.
36. **Hughes, M F.** Arsenic toxicity and potential mechanisms of action. 2002. Vol. 133, 1, págs. 1–16.
37. **Ratnaike, R N.** Acute and chronic arsenic toxicity. 2003. Vol. 79, 933, págs. 391–396.
38. **Naujokas, M J, y otros.** The broad scope of health effects from chronic arsenic exposure: update on a worldwide public health problem. 2013. Vol. 121, 3, págs. 295–302.
39. **IARC.** Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Arsenic, Metals, Fibres and Dusts. 2012. Vol. 100, Pt C, págs. 11–465.
40. **Pain, D J, y otros.** Lead concentrations in bones and feathers of the globally threatened Spanish imperial eagle. 2005. Vol. 121, 4, págs. 603–610.
41. **Clarkson, T W y Magos, L.** The toxicology of mercury and its chemical compounds. 2006, Vol. 36, págs. 609–662.
42. **ATSDR.** Toxicological Profile for Mercury. [En línea] 2022.
43. **Mergler, D, y otros.** Methylmercury exposure and health effects in humans: a worldwide concern. 2007. Vol. 36, 1, págs. 3–11.
44. **Bernhoft, R A.** Mercury toxicity and treatment: a review of the literature. [En línea] 2012.
45. **Rice, K M, y otros.** Environmental mercury and its toxic effects. 2014. Vol. 47, 2, págs. 74–83.
46. **Grandjean , P y Landrigan, P J.** Neurobehavioural effects of developmental toxicity. 2014. Vol. 13, 3, págs. 330–338.
47. **Havarinasab, S y Hultman , P.** Organic mercury compounds and autoimmunity. 2005. Vol. 4, 5, págs. 270–275.
48. **Houston, M C.** Role of mercury toxicity in hypertension, cardiovascular disease, and stroke. 2011. Vol. 13, 8, págs. 621–627.
49. **Tan, S W, Meiller, J C y Mahaffey, K R.** The endocrine effects of mercury in humans and wildlife. 2009. Vol. 39, 3, págs. 228–269.
50. **United Nations Environment Programme (UNEP).** *Minamata Convention on Mercury*. Geneva : UNEP, 2017.
51. **Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR).** *Toxicological Profile for Mercury*. U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service. Atlanta : s.n., 2022. pág. 847, Informe toxicológico. CAS#: 7439-97-6.

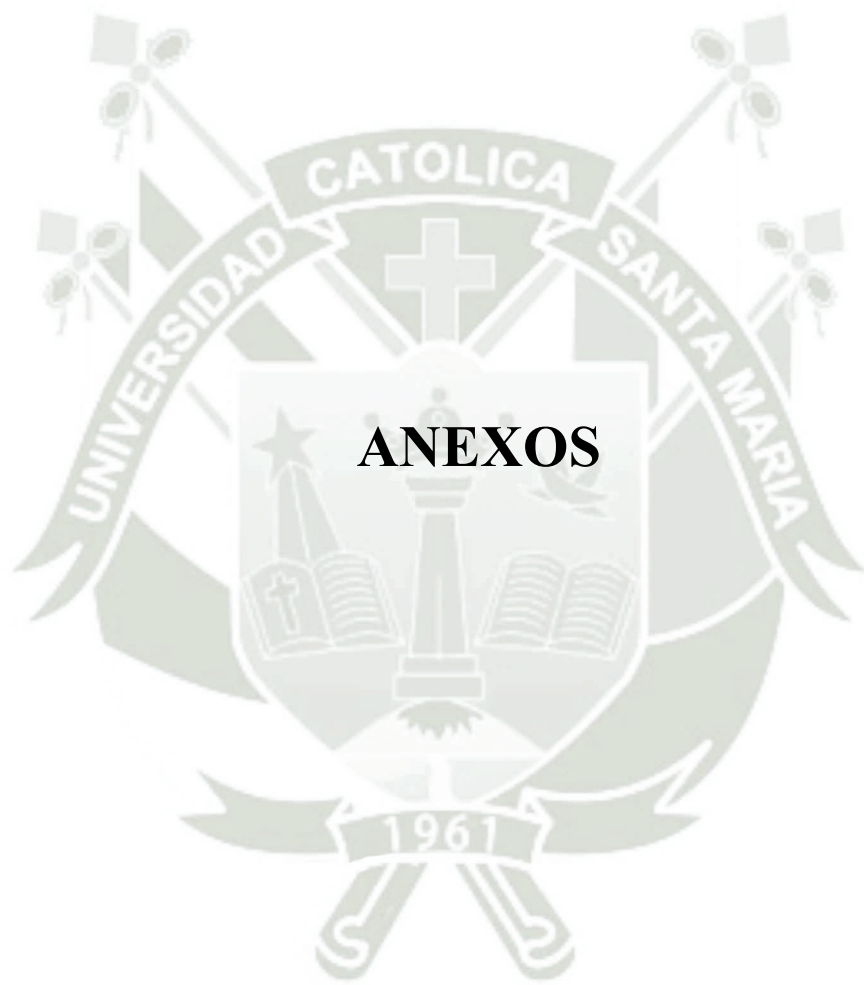
52. **Needleman, H L.** The removal of lead from gasoline: historical and personal reflections. 2000. Vol. 84, 1, págs. 20–35.
53. **Rabinowitz, M B.** Toxicokinetics of bone lead. 1991. Vol. 91, 33, págs. 33–37.
54. **Gulson, B L, y otros.** Mobilization of lead from human bone tissue during pregnancy and lactation—a summary of long-term research. 2003. Vol. 303, (1–2), págs. 79–104.
55. **Canfield, R L, y otros.** Intellectual impairment in children with blood lead concentrations below 10 µg per deciliter. 2003, Vol. 348, págs. 1517–1526.
56. **Flora, S J, Flora, G y Saxena, G.** *Environmental occurrence, health effects and management of lead poisoning.* [ed.] Analytical Aspects, Environmental Impacts and Health Effects. Lead: Chemistry. Amsterdam : Elsevier, 2009. págs. 158–228.
57. **Ekong, E B, Jaar, B G y Weaver, V M.** Lead-related nephrotoxicity: a review of the epidemiologic evidence. 2006. Vol. 70, 12, págs. 2074–2084.
58. **Navas-Acien, A, y otros.** Lead exposure and cardiovascular disease—a systematic review. 2007. Vol. 115, 3, págs. 472–482.
59. **Wirth, J J y Mijal, R S.** Adverse effects of low level heavy metal exposure on male reproductive function. 2010. Vol. 56, 2, págs. 147–167.
60. **Mateo, R, y otros.** Lead poisoning in wild birds from southern Spain: a comparative study of wetland areas and species affected, and trends over time. 2007. Vol. 145, 2, págs. 305–313.
61. **Nam, D H, Lee, D P y Koo, T H.** Monitoring for lead pollution using feathers of feral pigeons (*Columba livia*) from Korea. 2005. Vol. 107, (1–3), págs. 283–292.
62. **WHO.** *Lead poisoning and health.* World Health Organization. Ginebra : WHO, 2023.
63. **Prasad, A S.** Zinc in human health: effect of zinc on immune cells. 2008. Vol. 14, (5–6), págs. 353–357.
64. **Naccari, C, Cicero, N y Ferrantelli, V.** Tissue distribution of heavy metals in urban feral pigeons (*Columba livia*) and potential use as bioindicators of environmental contamination. 2020. Vol. 27, 10, págs. 10291–10302.
65. **De Wet, L y Bouwman, H.** *Urban birds as sentinels for environmental exposure to lead in South African cities.* 2021. Vol. 751.
66. **Torres, R y Guerrero, J.** Bioacumulación de metales pesados en palomas urbanas (*Columba livia*) de Santiago. 2020. Vol. 51, 2, págs. 93–101.
67. **Tello, G y Ramírez, M.** Palomas como bioindicadores de contaminación por plomo en la Ciudad de México. 2022. Vol. 38, 3, págs. 583–591.
68. **Zeballos, R y Choquehuanca, J.** *Palomas como centinelas de contaminación urbana en zonas industriales de Arequipa.* Universidad Católica de Santa María. Arequipa : s.n., 2020. Tesis.

69. **Guevara, Diego, Williams, Marta y Palacios, Gloria.** Uso de la paloma de Castilla (Columba livia) como biomonitor de contaminación por metales traza en Lima, Perú. Agosto de 2022. Vol. 21, 2.

70. **Valladares-Faundez, Pablo, Cáceres, Grimanesa y Valdés, Jorge.** Contenido de Plomo, Cadmio y Arsénico en Tejidos Biológicos de la Paloma Común (Columba Livia) presentes en un Área Urbana previamente contaminada con residuos mineros. Mayo de 2020. Vol. XXXVI, 2.

71. **Gómez, Pilar.** *El búho real (Bubo bubo) como especie biomonitora de contaminantes ambientales persistentes en el Sureste de España.* Departamento de Ciencias Sociosanitarias, Universidad de Murcia. Murcia : s.n., 2011. pág. 313, Tesis doctoral .

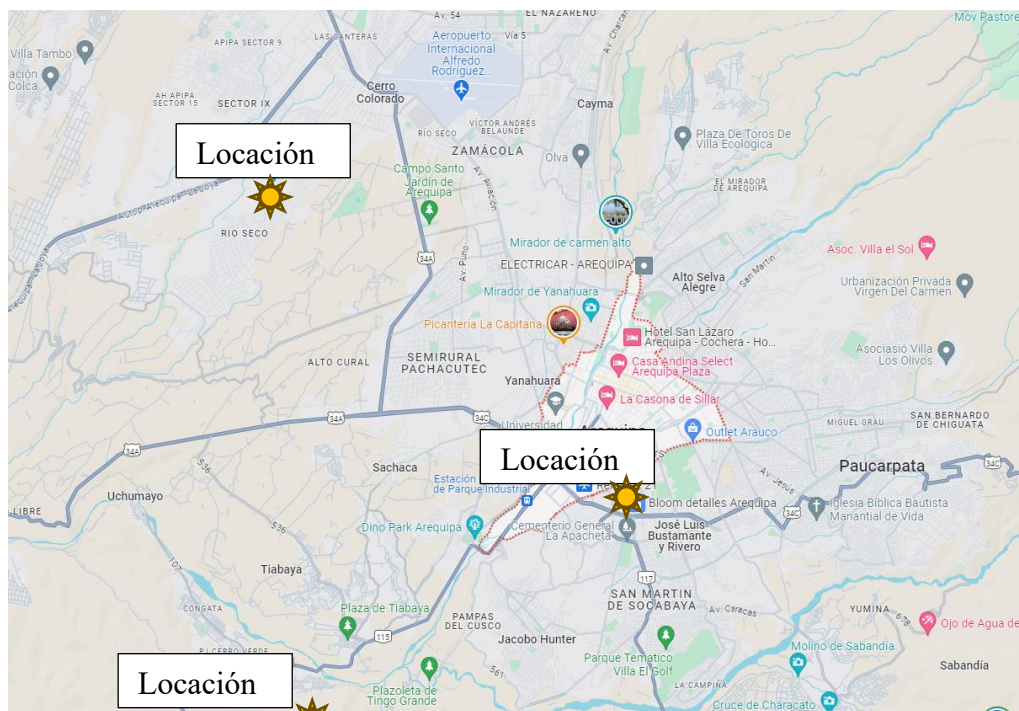




Anexo 1.
Mapas de ubicación

Figura 10.

Locaciones de toma de muestra dentro de la ciudad de Arequipa



* Tomado de Google Maps

Figura 11.

Locación de toma de muestras fuera de la ciudad de Arequipa



* Tomado de Google Maps

Anexo 2.

Dictamen favorable por parte del Comité de Ética de Investigación de la UCSM

COMITÉ DE ÉTICA INSTITUCIONAL DE INVESTIGACIÓN UCSM



DICTAMEN COMITÉ DE ETICA DE INVESTIGACION
UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTA MARIA

Arequipa, 2 setiembre de 2024

Investigador Light Rodríguez, Nicholas

Presente. –

De mi especial consideración.

Me dirijo a usted para hacerle llegar el resultado de la evaluación de su proyecto de tesis y dictamen del Comité Institucional de Ética de Investigación.

TÍTULO: “Determinación de la Presencia de Metales Pesados en Muestras Provenientes de Palomas de Castilla (*Columba livia*) para Monitoreo Biológico de Contaminación Ambiental mediante Biocentinelas en la Ciudad de Arequipa, 2024”.

INVESTIGADOR: Light Rodríguez, Nicholas

TIPO Y DISEÑO: Observacional, retrospectivo y transversal.

OBJETIVO: Determinar la presencia de contaminación por metales pesados (arsénico, plomo, cadmio, zinc y mercurio) empleando palomas bravías silvestres (*Columba livia*) como centinelas biológicos recurriendo a la técnica de espectroscopía ICP OES para la evaluación de muestras de tejido hepático, muscular y sanguíneo provenientes de la especie de estudio planteada en la ciudad de Arequipa - 2024.

PROCEDIMIENTOS:

Toma de muestras de sangre mediante venopunción ulnar.

Sacrificio indoloro de los animales capturados mediante intoxicación con dosis



COMITÉ DE ÉTICA INSTITUCIONAL DE INVESTIGACIÓN UCSM



DICTAMEN COMITÉ DE ETICA DE INVESTIGACION UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTA MARIA

eutanásica de pentobarbital sódico por recomendación del Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre

Extracción de muestra de tejido muscular de patas y pechuga, huesos femorales e hígado.

Análisis de espectroscopía de emisión atómica con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-OES)

Disposición final de los desechos biológicos resultantes según disposición del laboratorio asignado por la UCSM.

ANIMALES DE EXPERIMENTACIÓN:

Se trabajará con muestras de tejidos hepático, muscular, óseo y sanguíneo provenientes de un total de 20 especímenes de palomas (con 4 colonias de palomas identificadas en base a lugar: Colonia 1: Plaza de Armas de la ciudad de Arequipa, Colonia 2: Río Seco, Colonia 3: Tiabaya y Colonia 4: Caylloma).

RIESGO DEL ESTUDIO:

Mínimo.

OBSERVACIONES, SUGERENCIAS:

Debe proteger bienestar de los animales.



COMITÉ DE ÉTICA INSTITUCIONAL DE INVESTIGACIÓN UCSM



**DICTAMEN COMITÉ DE ETICA DE INVESTIGACION
UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTA MARIA**

DICTAMEN:

***DICTAMEN FAVORABLE
190 - 2024***



Agueda Muñoz Del Carpio Toia
Comité Institucional de Ética de la Investigación UCSM

Cualquier duda comunicarse a: comiteeticainvestigacionucsm@gmail.com



Anexo 3.
Matriz de datos

ID	Lugar	Muestra	Arsénico As	Plomo Pb	Mercurio Hg	Zinc Zn	Cadmio Cd
1	Cerro Colorado	Hígado	3	2,99	,70	26,08	,31
2	Cerro Colorado	Músculo	3	2,99	,49	20,65	,31
3	Cerro Colorado	Hueso	3	2,99	,49	78,11	,29
4	Cerro Colorado	Hígado	3	2,99	,49	28,86	,29
5	Cerro Colorado	Músculo	3	2,99	,49	20,60	,29
6	Cerro Colorado	Hueso	3	2,99	,49	118,29	,29
7	Cerro Colorado	Hígado	3	2,99	,49	33,58	,29
8	Cerro Colorado	Músculo	3	2,99	,49	17,19	,29
9	Cerro Colorado	Hueso	3	2,99	,49	91,02	,29
10	Cerro Colorado	Hígado	3	2,99	,49	25,55	,29
11	Cerro Colorado	Músculo	3	2,99	,49	28,51	,29
12	Cerro Colorado	Hueso	3	2,99	,49	189,97	,29
13	Cerro Colorado	Hígado	3	2,99	,49	24,85	,29
14	Cerro Colorado	Músculo	3	2,99	,49	22,14	,29
15	Cerro Colorado	Hueso	3	3,47	,49	97,09	,29
16	Tiabaya	Hígado	3	2,99	,49	21,55	,29
17	Tiabaya	Músculo	3	2,99	,49	25,67	,29
18	Tiabaya	Hueso	3	2,99	,49	85,09	,29
19	Tiabaya	Hígado	3	2,99	,49	34,18	,29
20	Tiabaya	Músculo	3	2,99	,49	21,52	,29
21	Tiabaya	Hueso	3	2,99	,49	122,01	,29
22	Tiabaya	Hígado	3	2,99	,49	21,33	,29
23	Tiabaya	Músculo	3	2,99	,49	24,69	,29
24	Tiabaya	Hueso	3	2,99	,49	80,30	,29
25	Tiabaya	Hígado	3	2,99	,49	29,66	,29
26	Tiabaya	Músculo	3	2,99	,49	32,29	,29
27	Tiabaya	Hueso	3	2,99	,49	107,99	,29
28	Tiabaya	Hígado	3	2,99	,49	24,23	,29
29	Tiabaya	Músculo	3	2,99	,49	27,83	,29
30	Tiabaya	Hueso	3	2,99	,49	72,91	,29
31	Chivay	Hígado	3	2,99	,49	76,15	1,02
32	Chivay	Músculo	3	2,99	,49	20,71	,29
33	Chivay	Hueso	3	5,83	,49	100,95	,29
34	Chivay	Hígado	3	2,99	,49	10,68	,29
35	Chivay	Músculo	3	2,99	,49	9,78	,29
36	Chivay	Hueso	3	2,99	,49	66,06	,29
37	Chivay	Hígado	3	2,99	,49	43,51	,29
38	Chivay	Músculo	3	2,99	,49	11,38	,29
39	Chivay	Hueso	3	23,70	,49	183,52	,29
40	Chivay	Hígado	3	2,99	,49	113,76	3,00

ID	Lugar	Muestra	Arsénico As	Plomo Pb	Mercurio Hg	Zinc Zn	Cadmio Cd
41	Chivay	Músculo	3	2,99	,49	16,39	,29
42	Chivay	Hueso	3	6,80	,49	114,15	3,00
43	Chivay	Hígado	3	2,99	,49	44,13	,29
44	Chivay	Músculo	3	2,99	,49	127,73	,29
45	Chivay	Hueso	3	5,61	,49	127,73	,29
46	Cercado	Hígado	3	3,96	,49	28,97	,29
47	Cercado	Músculo	3	2,99	,49	10,60	,29
48	Cercado	Hígado	3	2,99	,49	43,62	,29
49	Cercado	Músculo	3	2,99	,49	17,36	,29
50	Cercado	Hueso	3	7,92	,49	133,20	,29
51	Cercado	Hígado	3	2,99	,49	32,44	,29
52	Cercado	Músculo	3	2,99	,49	10,61	,29
53	Cercado	Hueso	3	5,28	,49	87,42	,29
54	Cercado	Hígado	3	2,99	,49	19,04	,29
55	Cercado	Músculo	3	2,99	,49	10,80	,29
56	Cercado	Hueso	3	13,13	,49	97,13	,29
57	Cercado	Hígado	3	2,99	,49	25,95	,29
58	Cercado	Músculo	3	2,99	,49	12,65	,29
59	Cercado	Hueso	3	2,99	,49	75,82	,29
60	Cercado	Músculo	3	2,99	,49	17,36	,29

Anexo 4.

Secuencia fotográfica

Figura 12.

Captura de palomas en el distrito de Cerro Colorado. Imagen propia, 2025



Figura 13.

Captura de palomas en el distrito de Tiabaya. Imagen propia, 2025



Figura 14.

Captura de palomas en el distrito de Cercado (Plaza Central). Imagen propia, 2025



Figura 15.

Enfoque de la trampa empleada para la captura. Imagen propia, 2025



Figura 16.

Marcaje de las palomas capturadas. Imagen propia, 2025



Figura 17.

Captura de palomas en el distrito de Chivay (Plaza Central). Imagen propia, 2025



Figura 18.

Necropsia para toma de muestras. Imagen propia, 2025



Figura 19.

Eutanasia de los especímenes recopilados. Imagen propia, 2025



Figura 20.

Muestras rotuladas. Imagen propia, 2025



Figura 21.

Almacenamiento de muestras para envío a laboratorio. Imagen propia, 2025



Anexo 5.

Informe y certificación de laboratorio



**SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS QUÍMICOS
S.A.C.**

**INFORME DE ENSAYO
IE-2025-1510**

1. DATOS DEL CLIENTE

- 1.1 Cliente : NICHOLAS LIGHT
1.2 RUC o DNI : 74148479
1.3 Dirección : CALLE PAZ SOLDÁN 322 - YANAHUARA, AREQUIPA

2. DATOS DE LA MUESTRA

- 2.1 Producto : BIOLÓGICAS
2.2 Muestreado por : CLIENTE (C)
2.3 Número de Muestras : 01
2.4 Fecha de Recepción : 2025-04-16
2.5 Periodo de Ensayo : 2025-04-21 al 2025-04-29
2.6 Fecha de Emisión : 2025-05-07
2.7 Fecha y Hora de Muestreo : No Precisa
2.8 N° de cotización : COT-119540-SL25

3. ENSAYO SOLICITADO - METODOLOGÍA UTILIZADA

ENSAYO	MÉTODO
Metales Pesados: Arsénico, Plomo, Mercurio, Zinc, Cadmio	Espectroscopia de Emisión Atómica con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-OES)

4. RESULTADOS

- 4.1. DESCRIPCIÓN DE MUESTRA: CC - 1 Hígado (C)


DIEGO ROMANO VERGARAY D'ARRIGO
QUÍMICO
CQP. 1337



HUROLAB S.A.C

**VERIFICACIÓN OPERACIONAL
ESPECTRÓMETRO
ICP-OES AVIO 550 Max**

Código: VOICP550MAX/REP-01
Edición: 01/Revisión: 01
Fecha de Revisión: 12/10/24
Elaborado: RD

No. DE CERTIFICADO: RD2411131 **FECHA DE EVALUACIÓN:** 13 de noviembre del 2024

5. PRECISIÓN: Precision-XL

para la muestra RSD STD (N069-1579), anotar valor de %RSD

ELEMENTO	% RSD	ESPECIFICACIÓN (%)	PRUEBA
As 193.696	0.88	≤ 1	Pasó
Zn 213.856	0.78	≤ 1	Pasó
Mn 257.610	0.91	≤ 1	Pasó
La 379.478	0.83	≤ 1	Pasó
Ba 455.403	0.95	≤ 1	Pasó
Ba 493.408	0.87	≤ 1	Pasó

6. Stability: Stability-XL

Todas las muestras (STB N0691579) deben estar entre 95 mg/L a 105mg/L

ELEMENTO	Valor Obtenido	ESPECIFICACIÓN	PRUEBA
Zn 213.856	99.4	95 mg/L ≤ x ≤ 105mg/L	Pasó
Mg 280.271	99.5	95 mg/L ≤ x ≤ 105mg/L	Pasó
Mg 257.610	100.4	95 mg/L ≤ x ≤ 105mg/L	Pasó
Mn 257.610	100.0	95 mg/L ≤ x ≤ 105mg/L	Pasó
Ba 455.403	100.2	95 mg/L ≤ x ≤ 105mg/L	Pasó

7. Resolución: RES-ONLY-XL

Anotar el valor mas alto de las 3 replicas de la muestra RES(N0691579)

ELEMENTO	ESPECIFICACIÓN	ESPECIFICACIÓN (nm)	PRUEBA
As 193.696	0.0045	≤ 0.007	Pasó
Ni 231.604	0.0072	≤ 0.008	Pasó
Ni 341.476	0.0187	≤ 0.012	Pasó
La 408.672	0.0175	≤ 0.020	Pasó
Ba 455.403	0.0225	≤ 0.025	Pasó