UNIVERSIDAD PERUANA
CAYETANO HEREDIA

Facultad de
Ciencias e Ingeniería

Evaluación del riesgo para la salud humana por presencia de mercurio, cadmio y plomo en jurel (*Trachurus murphyi*) y bonito (*Sarda chiliensis chiliensis*) comercializados en los terminales pesqueros de Ventanilla y Villa María del Triunfo, Lima – Perú

TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO PROFESIONAL DE QUÍMICO FARMACÉUTICO

AUTOR(ES):
ANGELA CRISTINA TINTA MAGUIÑA
LAURA NATALIA HUAMULLO AREVALO

ASESOR(ES)
Mag. ELSA CAROLINA PONCE DE LEON DE LAMA

CO-ASESOR(ES)
Dr. CESAR YOSHI LOPEZ MATAYOSHI

LIMA - PERÚ
2026

Jurado calificador

Presidente: MSc. Leon Faustino Villegas Vilchez

Vocal: Dra. Maria Susana Roque Marroquin

Secretaria: Mag. Gaby Espinoza Cordova

UNIVERSIDAD PERUANA
CAYETANO HEREDIA

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Los egresados:

N°	APELLIDOS Y NOMBRES
1.	TINTA MAGUIÑA ANGELA CRISTINA
2.	HUAMULLO AREVALO LAURA NATALIA

(Agregar filas adicionales si hay más autores)

Pertenecientes al programa de la **CARRERA PROFESIONAL DE FARMACIA Y BIOQUÍMICA,** autores del trabajo titulado: **Evaluación del riesgo para la salud humana por presencia de mercurio, cadmio y plomo en jurel *(Trachurus Murphyi)* y bonito *(Sarda Chiliensis Chiliensis)* comercializados en los terminales pesqueros de Ventanilla y Villa María del Triunfo, Lima – Perú,** el cual ha sido elaborado, sustentado y aprobado, según corresponda, para optar por el **TÍTULO PROFESIONAL DE QUÍMICO FARMCEÚTICO** bajo la modalidad de **TESIS.**

En calidad de docentes asesores de la Universidad Peruana Cayetano Heredia:

N°	APELLIDOS Y NOMBRES DEL DOCENTE	FACULTAD	NIVEL DE ASESORÍA
1.	PONCE DE LEON DE LAMA ELSA CAROLINA	FACI	ASESORA
2.	LOPEZ MATAYOSHI CESAR YOSHI	FACI	CO ASESOR

Declaramos que el contenido del presente documento es original y que las citas y referencias a otros autores cumplen con las normas académicas establecidas. En ese sentido, hacemos constar que:

- El documento presenta un porcentaje de similitud de **19%**, según el reporte emitido por el software **Turnitin®** (identificador de entrega: **3681255731**; fecha de entrega: **16/10/2026**).
- Tras una revisión detallada del reporte y del contenido del trabajo en cuestión, no se han identificado indicios de plagio.
- Se certifica que el documento respeta los principios de integridad académica y cumple con los requisitos institucionales de originalidad.

Lugar y fecha: **Lima, 16 de octubre de 2026**

Firma del asesor
N° DNI: 41040862
ORCID: 0000-0003-2086-8600

Firma del Co-asesor
N° DNI: 25827545
ORCID: 0000-0002-9351-2392

ÍNDICE

RESUMEN 1

ABSTRACT 2

I. INTRODUCCIÓN 3

1.1 Contaminación del ecosistema marino 3

1.2 Esencialidad y no esencialidad de un metal 4

1.3 Biomagnificación y bioacumulación 6

1.4 Toxicidad del mercurio, cadmio y plomo 6

1.5 Normativa internacional y nacional 8

1.6 Antecedentes internacionales 9

1.7 Antecedentes nacionales 10

1.8 Evaluación del riesgo para la salud humana 11

1.9 Consumo de pescado en el Perú 12

1.10 Terminales pesqueros de Ventanilla y Villa María del Triunfo 13

II. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN 14

III. JUSTIFICACIÓN 15

IV. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN 15

V. OBJETIVOS 16

5.1 Objetivo general 16

5.2 Objetivos específicos 16

VI. METODOLOGÍA 16

6.1 Diseño metodológico 16

6.2 Muestra 17

6.2.1 Tamaño de muestra 17

6.2.2 Criterios de inclusión 17

6.2.3 Criterios de exclusión 18

6.3 Lugar de toma de muestra 18
6.4 Recolección de muestras 19
6.5 Preparación de las muestras 19
6.6 Métodos para determinar las concentraciones de Hg, Cd y Pb 20
6.7 Comparación de las concentraciones con la normativa nacional e internacional . 23
6.8 Evaluación de riesgo para la salud humana 24
6.8.1 Ingesta diaria estimada (EDI) 24
6.8.2 Riesgo no cancerígeno (THQ y HI) 25
6.8.3 Riesgo cancerígeno (CR) 26
6.9 Análisis estadístico 27
VII. RESULTADOS 28
VIII. DISCUSIÓN 39
IX. CONCLUSIONES 47
X. LIMITACIONES 47
XI. RECOMENDACIONES 48
XII. BIBLIOGRAFÍA 49
ANEXOS 62

RESUMEN

El uso del mercurio, cadmio y plomo en distintos sectores industriales ha provocado un incremento de la contaminación marina. Los peces tienen la capacidad de bioacumular y biomagnificar estos metales. En humanos, una de las fuentes de exposición es el consumo de estos pescados contaminados que pueden desencadenar enfermedades neurológicas, cancerígenas, entre otras. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue evaluar el riesgo para la salud humana por la presencia de mercurio, cadmio y plomo en jurel (*Trachurus murphyi*) y bonito (*Sarda chiliensis chiliensis*) comercializados en los terminales pesqueros de Ventanilla y Villa María del Triunfo, Lima - Perú.

Se recolectaron 5 muestras por especie y terminal de estudio. La determinación de los metales se realizó con la técnica de espectrofotometría de absorción atómica. Los valores obtenidos se compararon con los límites establecidos por la CE, Codex Alimentarius y SANIPES. A su vez, se calcularon la ingesta diaria estimada, el cociente de riesgo objetivo, el índice de riesgo y el riesgo cancerígeno. El análisis estadístico se realizó con el programa IBM SPSS Statistics. El bonito del terminal de Villa María del Triunfo presentó la concentración media más alta de mercurio (0,063 mg/kg) mientras que, el jurel del terminal pesquero de Ventanilla presentó la concentración media más alta de Cd (0,020 mg/kg) y Pb (0,122 mg/kg). Ninguna de las muestras superó los límites de las normativas. De acuerdo con los cálculos realizados, el consumo de estas especies no representa un riesgo potencial para la salud.

Palabras clave: pescados, mercurio, cadmio, plomo, riesgo para la salud humana.

ABSTRACT

The utilization of mercury, cadmium and lead in industrial sectors has caused an increase in marine pollution. Fish have the capability to bioaccumulate and biomagnify these metals. In humans, one of the sources of exposure is the consumption of contaminated fish, which may lead to neurological and carcinogenic diseases, among other effects. Therefore, the aim of this study was to assess the human health risk associated with the presence of mercury, cadmium, and lead in jack mackerel (*Trachurus murphyi*) and bonito (*Sarda chiliensis chiliensis*) marketed at the fish wholesale markets of Ventanilla and Villa María del Triunfo, Lima, Peru. Five samples were collected per species and study terminal. Metal determination was carried out using atomic absorption spectrophotometry. The values obtained were compared with the limits established by the CE, Codex Alimentarius, and SANIPES. Parallelly, estimated daily intake, target hazard quotient, hazard index, and cancer risk were calculated. Statistical analysis was performed using IBM SPSS Statistics software. Bonito samples from Villa María del Triunfo fish terminal presented the highest mean mercury concentration (0.063 mg/kg), meanwhile jurel samples from Ventanilla fish terminal showed the highest mean concentrations of cadmium (0.020 mg/kg) and lead (0.122 mg/kg). None of the samples exceeded the regulatory limits. According to the indicators calculated, the consumption of these species does not represent a potential risk to human health.

Keywords: fish, mercury, cadmium, lead, human health risk.

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Contaminación del ecosistema marino

Los metales se definen como elementos que son buenos conductores de electricidad y de calor, tienden a formar cationes por pérdida de electrones y producen óxidos e hidróxidos de carácter básico [1]. Entre estos se incluyen el mercurio (Hg), el cadmio (Cd) y el plomo (Pb) que se encuentran naturalmente en el suelo, el agua y el aire. Estos metales pueden liberarse al ambiente por procesos naturales, como la actividad volcánica, los incendios forestales y la meteorización de suelos y rocas. Sin embargo, la literatura científica ha evidenciado un incremento de sus concentraciones, especialmente en el ecosistema marino, como consecuencia de diversas actividades antropogénicas [2-4].

Se estima que las emisiones antropogénicas de Hg ascienden a miles de toneladas anualmente. Entre las principales fuentes de contaminación derivadas de actividades humanas se incluyen la minería, la fundición de minerales, la producción de cemento, la incineración de residuos y la quema de combustibles fósiles (como en centrales eléctricas de carbón). Una vez liberadas a la atmósfera, las trazas de Hg son transportadas y depositadas en los cuerpos de agua. A nivel global, se ha determinado que las concentraciones ambientales de Hg son aproximadamente tres veces mayores debido a las actividades humanas que a las fuentes naturales [2,5].

Si bien los peces se encuentran expuestos tanto a la forma inorgánica de Hg (Hg^{+2}) como a su forma orgánica, conocida como metilmercurio (MeHg), es más frecuente encontrar este metal en el medio marino en la segunda forma. El MeHg se obtiene mediante la metilación de la forma inorgánica (Hg^{+2}), un proceso mediado por bacterias (predominantemente reductoras de sulfato) presentes en el medio marino. Cabe mencionar que estas dos formas de Hg son consideradas tóxicas [2].

En el caso del Cd, actividades como la minería, la fundición de minerales, la galvanoplastia y la producción y uso de baterías, pigmentos, fertilizantes y plásticos provocan el aumento de la concentración de este metal en el mar debido a las grandes cantidades de aguas servidas que recibe [2,6]. Adicionalmente, procesos industriales que

requieren operar a altas temperaturas producen cloruro y sulfato de Cd, que se liberan al ambiente para luego ser trasladados por las lluvias hacia el mar [2,7].

El Cd suele encontrarse en el ambiente marino en su forma inorgánica (Cd^{+2}), la cual está asociada con la toxicidad [2,7]. Una vez en dicho ecosistema, este metal disuelto interactúa con diversos componentes como minerales de arcilla, materia particulada y óxidos de hierro. Estas interacciones favorecen su incorporación a los sedimentos, lo que provoca su desplazamiento hacia zonas más profundas del medio. Con el tiempo, ante una entrada continua de Cd, pueden acumularse concentraciones significativas en el sedimento, lo que constituye una fuente potencial de contaminación al poder ser asimilado eventualmente por organismos marinos, con posible transferencia a los peces [2].

Finalmente, respecto al Pb, la contaminación por este metal es un problema de preocupación pública debido al gran incremento en su uso durante el periodo 1950-2000, época en la que el plomo tetraetilo se utilizó como aditivo en la gasolina, lo que incrementó las emisiones y la acumulación de este metal en el ambiente [8]. Si bien la Organización Mundial de la Salud (OMS) declaró en el 2011 la erradicación del uso de la gasolina con Pb [9], actualmente la contaminación del ecosistema marino por este metal se produce principalmente mediante precipitación, sedimentación ácida, lixiviación del metal en el suelo y eliminación inadecuada de residuos municipales e industriales [7].

En el medio marino, la forma inorgánica de Pb (Pb^{+2}) es la más abundante y la más reportada en organismos marinos, siendo la principal responsable de los efectos tóxicos [2,7].

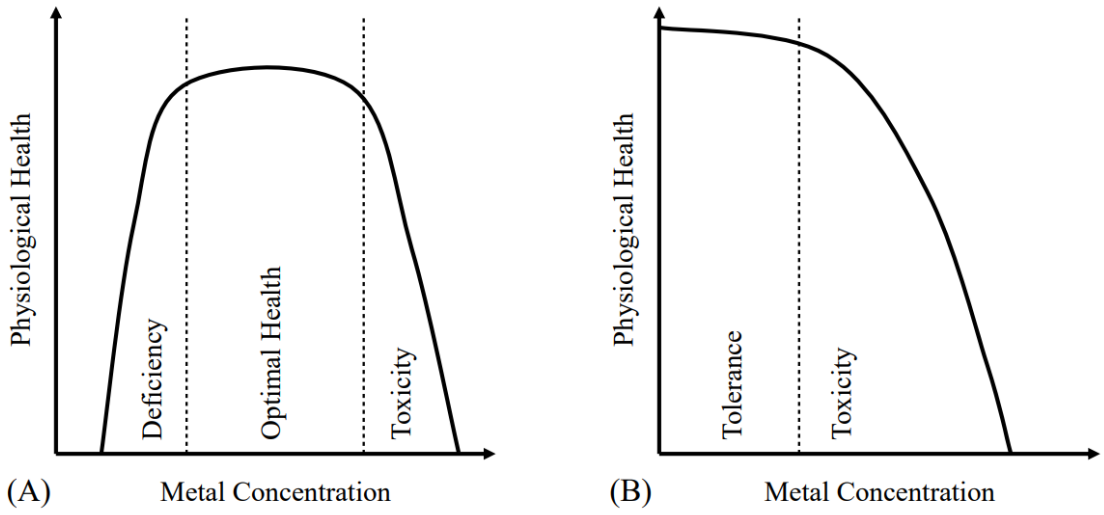
1.2 Esencialidad y no esencialidad de un metal

Los metales pueden clasificarse en dos grupos: esenciales y no esenciales. Los metales esenciales participan en diversos procesos biológicos como cofactores proteicos y, en concentraciones trazas, no se consideran tóxicos, ya que son necesarios para el correcto funcionamiento del organismo. En contraste, los metales no esenciales carecen de función biológica y resultan tóxicos incluso en cantidades trazas [1].

Como se puede observar en la Figura 1 [1], si el metal es esencial, la curva de concentración-respuesta presenta una forma de campana para la salud, con una meseta en el centro que representa el rango de concentración requerido para el funcionamiento óptimo de la fisiología de un organismo. Si la concentración del metal esencial está por debajo del rango óptimo, se presentarán síntomas de deficiencia, como la disminución de la función biológica. Por el contrario, si la concentración del metal supera los límites del rango óptimo, producirá respuestas fisiológicas severas, como intoxicaciones o incluso la muerte [1].

En cambio, cuando un metal no es esencial, se estrecha o se suprime la parte de deficiencia en la curva concentración-respuesta y sólo habrá una meseta de tolerancia, donde la fisiología es normal en el rango siempre que los mecanismos de excreción y/o desintoxicación estén a la par con la tasa de ingreso del metal al organismo. Al igual que con los metales esenciales, al superar este rango se produce toxicidad [1].

Figura 1. Diagrama conceptual de las curvas concentración-respuesta para (A) un metal esencial y (B) un metal no esencial [1]



En el 2020, la OMS anunció las diez sustancias químicas más preocupantes para la salud pública, exhortando a los países a implementar medidas de gestión del riesgo a nivel global. Dentro de estas sustancias se encuentran cuatro metales: Hg, Cd, Pb y arsénico (As), considerados no esenciales debido a su alta toxicidad a bajas concentraciones [10].

1.3 Biomagnificación y bioacumulación

En el ambiente acuático, los metales pueden incrementar su concentración en los organismos a lo largo de niveles tróficos sucesivos (proceso denominado biomagnificación) y/o acumularse en concentraciones superiores a las presentes en el cuerpo de agua circundante (proceso denominado bioacumulación) [2].

La importancia de estos procesos radica en que la biomagnificación indica la existencia de una potencial toxicidad para los organismos que se encuentren en niveles superiores de la cadena alimentaria, mientras que la bioacumulación permite comprender la capacidad de un compuesto para acumularse en un organismo o en un tejido específico de este [2].

La interferencia de Hg, Cd, Pb y/o As con otros metales esenciales facilita su bioacumulación; no obstante, solo el Hg se biomagnifica, por lo que constituye el problema más importante en relación con este metal y su contaminación en el ecosistema marino. Caso contrario ocurre con el As, que no se biomagnifica, sino que se biodisminuye; es decir, su concentración disminuye a medida que ascienden los niveles tróficos [2].

Dado que tanto la bioacumulación como la biomagnificación son indicadores de toxicidad, este estudio solo se va a enfocar en la determinación de las concentraciones de Hg, Cd y Pb en muestras de pescado.

1.4 Toxicidad del mercurio, cadmio y plomo

Tanto la forma inorgánica de Hg (Hg^{+2}) como su forma orgánica (MeHg) se encuentran en el ambiente marino; sin embargo, esta última es la forma más predominante y preocupante debido a sus propiedades neurotóxicas. El MeHg consumido es absorbido en el tracto gastrointestinal y luego transportado a la sangre, pudiendo cruzar la barrera hematoencefálica y acceder al sistema nervioso central (SNC), el principal órgano diana de este compuesto [11].

La intoxicación aguda conlleva un conjunto de cambios neurológicos conocidos como Síndrome de Minamata, una enfermedad neurológica caracterizada por disminución de la coordinación motora fina, constricción del campo visual y alteraciones sensoriales, entre otros síntomas [7,11]. Por otra parte, la exposición crónica puede causar efectos teratogénicos, expresados como malformaciones congénitas, y carcinogénicos, expresados como formación de tumores. [7].

Si bien no se considera al Hg carcinógeno, de acuerdo con la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) [12], el MeHg es reconocido como un contaminante altamente tóxico para el consumo humano [11].

El Cd es considerado uno de los metales no esenciales más tóxicos cuya principal ruta de exposición es la gastrointestinal, especialmente a través del consumo de productos hidrobiológicos contaminados [7].

La toxicidad aguda por Cd se manifiesta con, entre otros efectos, sialorrea, disnea, vómitos, dolor abdominal, vértigo, pérdida de conocimiento, espasmo doloroso del esfínter anal y disfunción renal en casos de toxicidad severa. En cambio, la toxicidad crónica puede generar alteraciones óseas (como fracturas, malformaciones, hipercalciuria o alteraciones del metabolismo de la vitamina D), así como daños hepáticos (caracterizados por hepatotoxicidad, a la que suele seguir una nefrotoxicidad) [7].

De acuerdo con la clasificación de la IARC, el Cd se encuentra en el Grupo 1 por ser un agente carcinogénico en humanos con evidencia de asociación con diversos tipos de cáncer, como el de mama, pulmón, estómago, próstata, riñón, endometrio, páncreas e hígado [7,12].

En el caso del Pb, los sistemas diana son el digestivo, el reproductivo, el inmunológico y el sistema nervioso central y periférico, además de afectar órganos como los riñones y los huesos [7].

Tras su absorción, los síntomas de toxicidad aguda pueden agruparse en alteraciones del sistema nervioso (como cefalea, déficit de atención, irritabilidad, pérdida de memoria,

etc.) y en disfunción renal (como disfunción de los túbulos proximales, glucosuria, aminoaciduria, fosfaturia con hipofosfatemia, etc.). Además, la hipertensión es otro síntoma de intoxicación por Pb. Ante una exposición crónica, el Pb puede ocasionar neurotoxicidad, toxicidad en el desarrollo neurológico, cardiotoxicidad, nefrotoxicidad, genotoxicidad y carcinogenicidad en los riñones [7].

Según lo descrito anteriormente, la IARC clasifica al Pb en el grupo 2A como probable carcinogénico para los humanos. No obstante, el Pb es el segundo metal más tóxico después del As y uno de los metales de mayor abundancia en el ambiente [12].

1.5 Normativa internacional y nacional

El pescado se considera un modelo de alimento saludable y una excelente fuente de proteínas, ácidos grasos, como el omega-3, y vitaminas, entre ellas la vitamina D [6]. No obstante, debido a la capacidad de los peces para bioacumular y biomagnificar metales en sus tejidos, estos representan una vía relevante de exposición a estos compuestos, principalmente de Hg, Cd y Pb. En consecuencia, el consumo de pescado puede provocar alteraciones en diversos sistemas del organismo y contribuir al desarrollo de patologías asociadas a la toxicidad de los metales descritos anteriormente.

Con el fin de garantizar la seguridad alimentaria, se han establecido normas que fijan los valores máximos de metales en los pescados. La Comisión Europea (CE) establece los valores máximos de Hg y Cd en 0,500 mg/kg y 0,050 mg/kg, respectivamente [13]. En el caso del Pb, tanto la CE como la Comisión del *Codex Alimentarius* indican que el límite máximo para este metal es de 0,300 mg/kg [13,14].

En el Perú, el Organismo Nacional de Sanidad Pesquera (SANIPES) es la entidad encargada de normar, supervisar y fiscalizar los aspectos relacionados con la sanidad e inocuidad pesquera y acuícola a nivel nacional. Adicionalmente, establece los límites máximos para estos metales tomando como referencia los valores definidos por la CE [15].

Es importante recalcar que los valores mencionados anteriormente son de carácter general. Las normativas mencionadas contemplan listados de Hg, Cd y Pb que agrupan diversas especies de pescados de agua marina y dulce, las cuales comparten el mismo valor máximo, con ligeras variaciones respecto a los límites máximos generales.

1.6 Antecedentes internacionales

Existen estudios donde los valores de Hg, Cd y Pb superan los límites máximos establecidos por los entes reguladores. En Pakistán, Junejo et al. (2018) analizaron la presencia de Cd y Pb en los tejidos musculares de *Cirrhinus mrigala*, *Labeo rohita* y *Catla catla* provenientes de los estanques piscícolas de Jamshoro y Larkana. El análisis se llevó a cabo utilizando la técnica de espectrometría de absorción atómica. Los autores encontraron que las concentraciones medias de Cd en los tejidos musculares de *C. mrigala* de Larkana (0,670 mg/kg), *L. rohita* y *C. catla* de Jamshoro (0,390 mg/kg y 0,340 mg/kg, respectivamente) eran mayores al límite máximo establecido por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés, *Food and Agriculture Organization*) (0,050 mg/kg). Asimismo, las concentraciones medias de Pb en los tejidos musculares de *C. mrigala* de ambos estanques (14,900 mg/kg en Jamshoro y 3,430 mg/kg en Larkana), *L. rohita* de Jamshoro (7,260 mg/kg) y *C. catla* de ambos lugares (4,800 mg/kg en Jamshoro y 7,260 mg/kg en Larkana) superaron el límite máximo establecido por la FAO (0,500 mg/kg). Dado que las tres especies analizadas presentaron concentraciones medias altas para los metales estudiados, los autores recomendaron a las agencias gubernamentales establecer regulaciones para la calidad de los alimentos, el agua y los sedimentos de los estanques [16].

En Tanzania, Mwakalapa et al. (2019) cuantificaron las concentraciones de Fe, Zn, Cu, níquel (Ni), cobalto (Co), cromo (Cr), aluminio (Al), As, Pb, Cd y Hg en los tejidos musculares del pez de leche (*Chanos chanos*) de piscifactoría y vida silvestre, y en salmonetes (*Mugil cephalus*) de vida silvestre, recolectados en las islas Unguja y Pemba y en la aldea Ndumbwe, en Mtwara. El análisis se efectuó empleando la técnica de espectrometría de absorción atómica. Los autores detectaron la presencia de Pb en los músculos de todas las muestras analizadas, cuyas concentraciones medias superaron el

límite máximo establecido por la OMS/FAO (0,300 mg/kg), siendo el salmonete de Pemba (1,390 mg/kg) y el pez de leche de Mtwara (1,440 mg/kg), ambos de vida silvestre, los que registraron las concentraciones medias más altas. Los autores recomendaron un monitoreo constante de metales en pescados de piscifactoría y de vida silvestre para garantizar la seguridad y el bienestar de los consumidores locales [17].

En Brasil, Hacon et al. (2020) determinaron la presencia de Hg en los tejidos musculares de 45 especies de pescados provenientes de los ríos Cassiporé, Amapá Grande, Oiapoque, Araguari y Amapari, ubicados en el estado de Amapá. El análisis se realizó con la técnica de espectrometría de fluorescencia atómica de vapor frío. Como resultado, se obtuvo que el 28,700 % del total de muestras superó el límite de Hg establecido por la OMS (0,500 mg/kg). Los peces carnívoros presentaron los valores más altos de Hg, entre ellos destacaron el pirapucu (*Boulengerella cuvieri*), el tucunaré (*Cichla monoculus*) y la traírão (*Hoplias aimara*) con concentraciones medias de 2,100 mg/kg, 1,900 mg/kg y 1,800 mg/kg, respectivamente. Ante este hallazgo, los autores propusieron reducir la ingesta de peces carnívoros para minimizar los riesgos para la salud asociados al consumo de Hg [18].

1.7 Antecedentes nacionales

El Perú no es ajeno a esta realidad, ya que diversas investigaciones han confirmado la presencia de Hg, Cd y Pb en distintas especies de pescado que también superan los límites máximos permisibles. En Lima, Marín G. (2015) analizó la presencia de Cd en 8 especies de alimentos de origen marino provenientes del terminal pesquero de Villa María del Triunfo. El análisis se llevó a cabo utilizando la técnica de espectrometría de absorción atómica. El autor concluyó que el jurel (*Trachurus picturatus*) fue una de las especies que superó el límite de Cd establecido por la CE (0,050 mg/kg) con una concentración media de 0,350 mg/kg [19].

En Lima, Palacios y Paz (2020) cuantificaron las concentraciones de Pb en los tejidos musculares del pampanito (*Trachinotus kennedyi*), jurel (*Trachurus picturatus*), bonito (*Sarda sarda*), caballa (*Scomber scombrus*), cojinova (*Seriolella violacea*) y sardina (*Sardina pilchardus*) provenientes de los mercados San Hilarión, San Fernando, San Juan

de Lurigancho, Huáscar, Canto Rey y Constructores, respectivamente. El análisis se efectuó empleando la técnica de espectrometría de absorción atómica con horno de grafito. Los autores detectaron la presencia de Pb en todas las especies analizadas, donde el 57% del total de las muestras superaron el límite establecido en el Codex Alimentarius (0,200 mg/kg). Con respecto al límite establecido por SANIPES (0,300 mg/kg), el 37% del total de las muestras excedió dicho valor. Es importante señalar que, de las 6 especies de pescado analizadas, el jurel presentó la concentración media más alta, de 0,640 mg/kg. Las autoras recomendaron implementar controles exhaustivos y periódicos y exhortaron a las autoridades sanitarias nacionales a adoptar medidas que salvaguarden la seguridad alimentaria de los consumidores [20].

En Tacna, Ninaja P. (2020) determinó la presencia de Hg en los tejidos musculares de bonito (*Sarda sarda*), caballa (*Scomber scombrus*), lisa (*Mugil cephalus*), lorna (*Sciaena deliciosa*) y diamante (*Isurus oxyrinchus*) provenientes de los mercados Miguel Grau, Dos de Mayo y Santa Rosa. El análisis se realizó con la técnica de espectroscopía de emisión atómica por plasma de acoplamiento inductivo. Los autores hallaron que el 73,300 % del total de muestras superó el límite de Hg establecido por la OMS y la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, por sus siglas en inglés, *U.S. Environmental Protection Agency*) (0,500 mg/kg). En cuanto al límite establecido por la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA, por sus siglas en inglés, *Food and Drug Administration)* y por SANIPES (1,000 mg/kg), el 43,300 % del total de muestras excedió dicho valor. De igual forma, se reportó que el bonito fue la especie que presentó la concentración media más alta, de 1,260 mg/kg. La autora propuso realizar más estudios sobre el tema para que los profesionales de la salud adquieran mayor conocimiento [21].

1.8 Evaluación del riesgo para la salud humana

La USEPA provee ecuaciones para evaluar el riesgo en la salud humana tras la ingesta de alimentos contaminados con sustancias químicas, estimando la ingesta diaria estimada (EDI, del término en inglés *Estimated Daily Intake*), el cociente de riesgo objetivo (THQ, del término en inglés *Target Hazard Quotient*), índice de riesgo (HI, del término en inglés *Hazard Index*) y el riesgo cancerígeno (CR, del término en inglés *Carcinogenic Risk*) [22,23].

La EDI nos permite calcular la cantidad de sustancia química a la que una persona está expuesta tras la ingesta de alimentos contaminados. Los resultados se comparan con la dosis de referencia (Rfd, del término en inglés *Reference Dose), valor preestablecido por la USEPA que permite* determinar si la exposición a la sustancia química se encuentra dentro de los límites considerados seguros [24].

En el caso del THQ y del HI, se emplean para evaluar el riesgo de desarrollar un efecto no cancerígeno. El THQ se emplea para evaluar el riesgo potencial de una sustancia tóxica, mientras que el HI se emplea para evaluar el riesgo potencial de una mezcla de sustancias tóxicas. Si los valores de THQ y HI son > 1, ello indica un riesgo potencial de presentar un efecto adverso no cancerígeno [24].

Finalmente, el CR se calcula para evaluar la probabilidad de que una persona desarrolle cáncer debido a la exposición a un carcinógeno a lo largo de toda su vida. El rango aceptable es de 10^{-6} a 10^{-4}. Si el valor obtenido se encuentra por encima de 10^{-4}, significa que hay una probabilidad de riesgo carcinogénico [24].

En Perú, Guabloche et al. (2023) analizaron los niveles de Cd, Hg, Pb, Ni, Cr y As en el tejido de *Sciaena deliciosa* (comúnmente conocida como lorna) de la costa de la Bahía del Callao, Perú. Tras el análisis de riesgo, los autores concluyeron que el consumo de especímenes de la Bahía del Callao podría acarrear un problema grave para la salud de los individuos. El valor del EDI fue mayor que la dosis referencial en los casos de Hg, Cd y Pb. Asimismo, el THQ superó el valor de 1 para Cd y Pb; sin embargo, no se encontró CR para Pb [25].

1.9 Consumo de pescado en el Perú

El Perú es uno de los países con un ecosistema marino diverso, gracias a la Cuenca del Pacífico y a la formación de la Corriente de Humboldt. Por lo tanto, la pesca se ha convertido en una de las actividades de mayor importancia, ya que genera empleos e impulsa la economía del país. Esto se traduce en un gran volumen de desembarques de recursos hidrobiológicos destinados al consumo humano o como materia prima para la elaboración de otros productos [26].

En el 2024, se registró un consumo per cápita de pescado de 17,400 kg por habitante [27], lo que lo consolidó como la proteína de mayor consumo [28]. Esto se debe al conocimiento que tienen los peruanos sobre el aporte nutricional que este alimento les brinda y a la disponibilidad de encontrarlo en los mercados a un precio asequible.

Por otra parte, el país cuenta con el "Programa Nacional A Comer Pescado" (PNACP) del Ministerio de la Producción (PRODUCE), cuyo objetivo es mejorar los hábitos de consumo de pescado en la población peruana [26]. No obstante, la FAO proyectó como meta un consumo per cápita de 27,600 kilogramos para el Perú en 2025; en ese sentido, se prevé que medidas como el PNACP continúen guiándose por esta cifra como referencia para los años posteriores [29].

Entre las especies de pescado que más consume un peruano se encuentran el jurel y el bonito. Por ende, hay una mayor demanda y comercialización de estas especies, sobre todo en estado fresco [27,28]. Es importante mencionar que los géneros de jurel y de bonito de mayor presencia en las costas del Perú son *Trachurus murphyi* y *Sarda chiliensis chiliensis*, respectivamente [30].

1.10 Terminales pesqueros de Ventanilla y Villa María del Triunfo

Lima cuenta con dos terminales pesqueros importantes: Ventanilla y Villa María del Triunfo, también consideradas mercados mayoristas, donde se comercializan principalmente productos hidrobiológicos en estado fresco [27,28]. Según datos del Ministerio de Producción (PRODUCE) y del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), los pescados frescos son los de mayor ingreso en estos terminales donde destacan el jurel y el bonito, por ende, son los de mayor comercialización [27,31].

Las empresas dedicadas a la pesca, al transporte y/o a la venta de productos hidrobiológicos al por mayor trasladan sus productos a estos terminales mediante camiones frigoríficos o isotérmicos, donde alquilan un espacio para su venta al público en general. Sus principales compradores son los mercados de abasto de las zonas norte, centro, sur y este de Lima Metropolitana [28,32], por lo que estos terminales se consideran sus principales proveedores.

II. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La contaminación del ecosistema marino por Hg, Cd y Pb, debido a actividades industriales y antropogénicas, ha provocado la bioacumulación y la biomagnificación de estos metales en los peces. Esto representa un grave problema para la salud de las personas que consumen pescado, ya que estos metales son considerados no esenciales pues teóricamente no tienen función biológica en el organismo y resultan tóxicos incluso en bajas concentraciones. Aun así, la presencia de estos elementos en el ser humano puede desencadenar la aparición de enfermedades cancerígenas, neurológicas, entre otras.

El mar peruano alberga una gran variedad de especies de peces, por lo que organizaciones como la FAO y PRODUCE se encargan de promover el consumo de pescado debido a su alto valor nutricional y su accesibilidad económica. A pesar de ello, distintas investigaciones científicas demuestran la creciente posibilidad de intoxicación por ciertos metales derivada del consumo de pescado, lo cual contrarresta las medidas nacionales para fomentar su consumo.

En este marco, surge la necesidad de evaluar si la presencia de Hg, Cd y Pb en especies de mayor consumo, como el jurel y el bonito que se comercializan en los terminales pesqueros de Ventanilla y Villa María del Triunfo, Lima - Perú, representan un riesgo para la población.

Por ello, el presente estudio tiene como objetivo evaluar el riesgo para la salud humana por la presencia de mercurio, cadmio y plomo en jurel (*Trachurus murphyi*) y bonito (*Sarda chiliensis chiliensis*) comercializados en los terminales mencionados, determinando las concentraciones de estos metales y verificando su conformidad con los límites máximos permisibles establecidos por organismos reguladores nacionales e internacionales.

Además, el riesgo asociado con su consumo se evaluará mediante la estimación de EDI, THQ, HI y CR. El análisis de los metales se realizará en el tejido muscular, debido a que constituye una de las porciones del pescado más consumidas por la población.

III. JUSTIFICACIÓN

El pescado es uno de los alimentos esenciales en la canasta familiar básica de los peruanos, siendo el jurel y el bonito las especies de mayor preferencia. La falta de datos sobre la inocuidad o la contaminación por metales como Hg, Cd y Pb en estos alimentos resalta la necesidad de estudios actualizados para garantizar la salud y promover la vigilancia sanitaria conforme a la normativa de productos de consumo humano.

Este vacío de información justifica la relevancia de esta investigación, debido a que constituye el primer aporte de evidencia local que evalúa el riesgo para la salud humana por la presencia de estos metales en jurel (*Trachurus murphyi*) y bonito (*Sarda chiliensis chiliensis*) comercializados en los terminales pesqueros de Ventanilla y Villa María del Triunfo, Lima - Perú.

Con esta investigación se busca beneficiar principalmente a los consumidores, ya que se determinará si la ingesta de este alimento representa un riesgo para la salud debido a la presencia de estas tres sustancias tóxicas. De igual forma, proporcionará a las autoridades regulatorias peruanas información actualizada que contribuirá a garantizar la inocuidad alimentaria.

En definitiva, este estudio es importante porque aborda un problema crítico para la salud humana y permite implementar políticas y medidas más efectivas para garantizar la seguridad alimentaria y proteger la salud pública.

IV. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿La presencia de mercurio, cadmio y plomo en jurel (*Trachurus murphyi*) y bonito (*Sarda chiliensis chiliensis*) comercializados en los terminales pesqueros de Ventanilla y Villa María del Triunfo, constituye un riesgo para la salud humana?

V. OBJETIVOS

5.1 Objetivo general

Evaluar el riesgo para la salud humana por presencia de mercurio, cadmio y plomo en jurel (*Trachurus murphyi*) y bonito (*Sarda chiliensis chiliensis*) comercializados en los terminales pesqueros de Ventanilla y Villa María del Triunfo, Lima - Perú

5.2 Objetivos específicos

- Determinar las concentraciones de mercurio, cadmio y plomo en las muestras de jurel (*Trachurus murphyi)* y bonito (*Sarda chiliensis chiliensis*).
- Comparar los valores obtenidos de las muestras con los límites máximos establecidos por las normativas internacionales y nacionales.
- Evaluar el riesgo para la salud humana mediante la estimación de la ingesta diaria estimada (EDI), el cociente de riesgo objetivo (THQ) y el índice de riesgo (HI) para mercurio, cadmio y plomo, así como el riesgo cancerígeno (CR) para cadmio y plomo.

VI. METODOLOGÍA

6.1 Diseño metodológico

En este estudio se recolectaron de manera aleatoria y por conveniencia 5 muestras de jurel y de bonito por cada terminal de estudio. La determinación de Hg, Cd y Pb se llevó a cabo mediante el método validado-modificado "Determinación de Cadmio, Plomo, Mercurio y Estaño en Productos Hidrobiológicos, por Espectrofotometría de Absorción Atómica" del laboratorio ALS Life Science Perú SAC. Los valores obtenidos del análisis de las muestras se compararon con los límites de la CE, del Codex Alimentarius y de SANIPES. A su vez, se estimaron el EDI, THQ, HI y CR.

El análisis estadístico se realizó utilizando el programa IBM SPSS Statistics (Versión 27). Para el análisis descriptivo se calcularon la media y la desviación estándar, mientras que para el análisis inferencial se estimó el intervalo de confianza al 95 %. Como técnica paramétrica, se utilizó la prueba t de Student y, como técnica no paramétrica, la prueba de rangos de Wilcoxon. La normalidad de los datos se evaluó mediante la prueba de Shapiro-Wilk

6.2 Muestra

La muestra de nuestro trabajo estuvo conformada por pescados frescos de jurel y bonito.

6.2.1 Tamaño de muestra

De acuerdo con la Norma Técnica Peruana 700.002.2012: Lineamientos y Procedimientos de Muestreo del Pescado y Productos Pesqueros para Inspección (NTP 700.002.2012), en el apartado 6.5.4.4 se indica que, para realizar el análisis de contaminantes químicos, como Hg, Cd y Pb, se deben recolectar 5 unidades de muestra de pescado [33].

Con respecto a la estrategia de muestreo, se empleó un muestreo aleatorio por conveniencia, que consiste en seleccionar las unidades de muestreo al azar entre aquellas que se encuentren disponibles en los terminales pesqueros durante el periodo de estudio [34-35].

Por lo tanto, para este trabajo se seleccionaron de manera aleatoria y por conveniencia 5 muestras de jurel y de bonito por cada terminal de estudio. Es pertinente destacar que todas las muestras cumplieron con los criterios de inclusión y exclusión que se detallan más adelante.

6.2.2 Criterios de inclusión

Los criterios de inclusión que se consideraron para este estudio fueron los siguientes:

- Pescados frescos de jurel y bonito.

- Pescados expendidos por comerciantes mayoristas en los terminales pesqueros de Ventanilla y Villa María del Triunfo.
- Cumplir con las tallas mínimas para su captura y consumo (Anexo 1).
- Presentar las siguientes características:

Tabla 1. Características organolépticas del pescado fresco [36].

Órgano	Características del pescado fresco
Piel	- Iridiscente - Brillante - Uniforme - Firme
Mucosidad	- Transparente
Ojos	- Convexos - Córnea transparente - Pupila negra y brillante
Branquias	- Color rojo - Brillantes - Mucus ausente
Olor	- Fresco a mar

6.2.3 Criterios de exclusión

Los criterios de exclusión que se consideraron para este estudio fueron los siguientes:

- Pescados frescos de jurel y bonito en temporada de veda.
- Muestras que no cumplan con los criterios de inclusión.

6.3 Lugar de toma de muestra

Terminales pesqueros de Ventanilla y Villa María del Triunfo, ubicados en Lima Metropolitana.

6.4 Recolección de muestras

Las cámaras isotérmicas que llegaron a los terminales pesqueros de Ventanilla y Villa María del Triunfo, con las especies de interés en estado fresco, fueron seleccionadas para extraer de manera aleatoria y por conveniencia una cantidad determinada de muestras que debían cumplir con los criterios de inclusión y exclusión. Cabe mencionar que se utilizó el catálogo digital de la biodiversidad acuática del Perú como referencia, el cual se encuentra publicado en la página del Instituto del Mar del Perú (IMARPE) [37], con el fin de cerciorarnos de que los especímenes recolectados pertenezcan a las especies de interés de este estudio.

Cada muestra fue colocada en dos bolsas de polietileno transparente de alta densidad de primer uso y de tamaño adecuado para cubrirlas por completo. La primera bolsa se rotuló con el N° de muestra, el nombre común del pescado y el lugar de recolección [38]. Simultáneamente, se completó la ficha de recolección de datos (Anexo 2).

6.5 Preparación de las muestras

Tras la recolección, las muestras fueron trasladadas de inmediato a la zona de fileteado de cada terminal, limpia y acondicionada para su extracción de forma segura. Se verificó que la persona encargada de manipular las muestras estuviera equipada con la indumentaria adecuada para evitar cualquier tipo de contaminación. Posteriormente, se aseguró de que los materiales y equipos a utilizar estuvieran limpios, secos y desinfectados con alcohol al 70 % [38]. Por último, se corroboró que las muestras estuvieran correctamente rotuladas y no estuvieran comprometidas; de lo contrario, serían rechazadas.

Se extrajo un mínimo de 300 g del tejido muscular de cada muestra, según lo solicitado por el laboratorio, realizando el corte en las siguientes zonas: detrás de la aleta pectoral, en el medio entre el primer corte y el vientre, y detrás del vientre. Para evitar alteraciones, en cada toma se cambiaron los materiales desechables y se limpiaron y desinfectaron los materiales reutilizables.

Al igual que en la recolección, cada porción extraída fue colocada en dos bolsas de polietileno de alta densidad de primer uso, asegurando un cierre correcto. La primera bolsa se rotuló con la misma información que la bolsa original, incluido el peso de la muestra en gramos, para asegurar la trazabilidad. Paralelamente, se completó la columna final del Anexo 2 con la información recopilada en ese momento.

Tras la verificación del correcto empaquetado y rotulado, las muestras preparadas fueron enviadas al laboratorio de análisis, previa coordinación con el personal de recepción, en un cooler que contenía la cantidad suficiente de hielo seco para mantener una temperatura igual o menor a 10 °C [36].

6.6 Métodos para determinar las concentraciones de Hg, Cd y Pb

Los análisis de Hg, Cd y Pb se realizaron en el laboratorio ALS Life Science Perú SAC, especializado en el análisis de metales en alimentos. Este laboratorio cuenta con la acreditación otorgada por el Instituto Nacional de Calidad (INACAL) y cumple con los requisitos de la norma ISO/IEC 17025, lo que garantiza la fiabilidad de los resultados.

La determinación de Hg, Cd y Pb se llevó a cabo utilizando el método validado-modificado del laboratorio "Determinación de Cadmio, Plomo, Mercurio y Estaño en Productos Hidrobiológicos, por Espectrofotometría de Absorción Atómica", el cual toma como referencia las siguientes normas [39-42]:

- Norma Chilena 2667: Productos hidrobiológicos - Determinación de mercurio - Método espectrofotométrico de absorción atómica por generación de vapor frío (NCh 2667.Of2001).
- Norma Chilena Oficial 2638: Productos hidrobiológicos - Determinación de cadmio - Método espectrofotométrico de absorción atómica por llama (NCh 2638.Of2001)
- Norma Chilena Oficial 2751: Productos hidrobiológicos - Determinación de plomo mediante espectrofotometría de absorción atómica (NCh 2751.Of2003)
- Norma Oficial Mexicana 117-SSA1-1994, Bienes y Servicios: Método de prueba para la determinación de cadmio, arsénico, plomo, estaño, cobre, fierro, zinc y

mercurio en alimentos, agua potable y agua purificada por espectrometría de absorción atómica (NOM-117-SSA1-1994).

Para determinar el Hg, se realizó una digestión ácida en cada muestra usando óxido de vanadio, una mezcla de ácido sulfúrico (95 % - 97 %) y ácido nítrico (65 %) en proporción 1:1, y peróxido de hidrógeno (30 %). Posteriormente, se adicionó cloruro estañoso (20 %) como agente reductor.

A partir de la solución patrón de Hg de 1000 mg/L, se preparó una solución intermedia de 1 mg/L el día del análisis, que sirvió como base para la preparación de las soluciones estándar necesarias para la construcción de la curva de calibración. Los puntos de calibración fueron: 1,000, 2,500, 5,000, 10,000 y 15,000 µg/L. Cabe señalar que la solución diluyente empleada fue una mezcla de ácido nítrico (5 %) y ácido clorhídrico (5 %).

La medición se realizó mediante un espectrómetro de absorción atómica a una longitud de onda de 253,700 nm. Las lecturas de las absorbancias de las muestras se interpolaron en la ecuación de la curva de calibración, y luego se calculó la concentración de Hg con la siguiente fórmula:

$$Hg = \frac{C \; x \; V \; x \; F}{M}$$

Donde
Hg = Contenido de Hg (mg/kg)
C = Concentración de Hg obtenida en la curva de calibración (mg/L)
V = Volumen de aforo (mL)
F = Factor de dilución (cuando corresponde)
M = Masa de la muestra (g)

Para determinar el Cd, se realizó una digestión por vía seca, en la que cada muestra fue secada en una plancha calefactora a una temperatura de 200 °C ± 50 °C y posteriormente calcinada en una mufla hasta obtener cenizas blanco-grises y libres de carbón. Con el fin

de asegurarse de que las cenizas estuvieran libres de restos de carbón, estas se disolvieron en ácido nítrico (65 %), se secaron en una plancha calefactora y se calcinaron nuevamente. Una vez que se obtuvieron las cenizas deseadas, se disolvieron en ácido nítrico (3 %) y ácido clorhídrico (6 %).

A partir de la solución patrón de Cd de 1000 mg/L, se preparó la solución intermedia de 10 mg/L el día del análisis, que sirvió como base para la preparación de las soluciones estándar necesarias para la construcción de la curva de calibración. Los puntos de calibración fueron: 0,010, 0,050, 0,100, 0,200 y 0,250 mg/L. Cabe señalar que la solución diluyente empleada fue una mezcla de ácido nítrico (3 %) y ácido clorhídrico (6 %).

La medición se realizó mediante un espectrómetro de absorción atómica a una longitud de onda de 228,800 nm. Las lecturas de las absorbancias de las muestras se interpolaron en la ecuación de la curva de calibración, y luego se calculó la concentración de Cd con la siguiente fórmula:

$$Cd = \frac{C \; x \; V \; x \; F}{M}$$

Donde
Cd = Contenido de Cd (mg/kg)
C = Concentración de Cd obtenida en la curva de calibración (mg/L)
V = Volumen de aforo (mL)
F = Factor de dilución (cuando corresponde)
M = Masa de la muestra (g)

Finalmente, para determinar el Pb, se siguió el mismo procedimiento que para el análisis de Cd (digestión por vía seca). A partir de la solución patrón de Pb de 1000 mg/L se preparó la solución intermedia de 100 mg/L el día del análisis, que sirvió como base para la preparación de las soluciones estándar necesarias para la construcción de la curva de calibración. Los puntos de calibración fueron: 0,100, 0,250, 0,500, 0,750 y 1,000 mg/L. Cabe señalar que la solución diluyente empleada fue una mezcla de ácido nítrico (3 %) y ácido clorhídrico (6 %).

La medición se realizó mediante un espectrómetro de absorción atómica, a una longitud de onda de 217 nm. Las lecturas de las absorbancias de las muestras se interpolaron en la ecuación de la curva de calibración, y luego se calculó la concentración de Pb con la siguiente fórmula:

$$Pb = \frac{C\ x\ V\ x\ F}{M}$$

Donde

Pb = Contenido de Pb (mg/kg)

C = Concentración de Pb obtenida en la curva de calibración (mg/L)

V = Volumen de aforo (mL)

F = Factor de dilución (cuando corresponde)

M = Masa de la muestra (g)

Es importante mencionar que las mediciones se realizaron por duplicado para asegurar una mayor precisión. Asimismo, los métodos de ensayo descritos para la determinación de Hg, Cd y Pb en muestras de pescado fresco están acreditados por el INACAL.

6.7 Comparación de las concentraciones con la normativa nacional e internacional

Las concentraciones medias de Hg, Cd y Pb del jurel y bonito provenientes de los terminales pesqueros de Ventanilla y Villa María del Triunfo se compararon con los límites máximos establecidos por la CE, Codex Alimentarius y SANIPES.

Tabla 2. Límites máximos de Hg, Cd y Pb establecidos por la CE, Codex Alimentarius y SANIPES para el jurel y bonito [13-15].

Especie	Metal	Normativa internacional		Normativa nacional
		CE (mg/kg peso fresco)	Codex Alimentarius (mg/kg peso fresco)	SANIPES (mg/kg peso fresco)
Jurel *(Trachurus murphyi)*	**Hg**	0,500	-	0,500
	Cd	0,050	-	0,100
	Pb	0,300	0,300	0,300
Bonito *(Sarda chiliensis chiliensis)*	**Hg**	0,500	-	0,500
	Cd	0,050	-	0,050
	Pb	0,300	0,300	0,300

6.8 Evaluación de riesgo para la salud humana

Con el fin de saber si el jurel y el bonito que se expenden en los terminales pesqueros de Ventanilla y Villa María del Triunfo representan un riesgo para la salud humana, se utilizaron las concentraciones medias de Hg, Cd y Pb del jurel y bonito provenientes de estos terminales pesqueros para aplicarlas a las fórmulas establecidas por la USEPA.

6.8.1 Ingesta diaria estimada (EDI)

El EDI determina la cantidad de sustancia química a la que una persona está expuesta mediante la ingesta de alimentos. Este se calculó para el Hg, Cd y Pb empleando la siguiente fórmula [24, 43]:

$$EDI_{(\mu g/kg/día)} = CM\ x\ \frac{FIR}{ABW}$$

Donde:

CM = Concentración media de Hg/Cd/Pb presente en el músculo del jurel/bonito (µg/g peso fresco)
FIR = Consumo diario per cápita de pescado (47,670 g/día/persona) [27]
ABW = Peso corporal medio de un adulto (70 kg/persona) [44]

Los valores de FIR y ABW están relacionados con el contexto peruano.
Lo obtenido se comparó con los valores de la dosis de referencia (RfD) [24], dosis máxima aceptable establecida por la USEPA, de Hg (0,100 µg/kg/día) [11], Cd (1,000 µg/kg/día) [43] y Pb (4,000 µg/kg/día) [45].

Cuando el EDI es menor al RfD, se considera que el consumo de pescado representa una exposición segura para la salud de los consumidores; de lo contrario, si el EDI supera el valor de referencia, existe un riesgo para la salud humana de los consumidores de pescado.

6.8.2 Riesgo no cancerígeno (THQ y HI)

Para evaluar los riesgos de desarrollar efectos no cancerígenos en las personas expuestas al consumo de pescado contaminado, se calcularon el THQ y el HI. El THQ nos permite evaluar el riesgo potencial de un elemento. Este se calculó para el Hg, Cd y Pb empleando la siguiente fórmula [24,43]:

$$THQ = \frac{(EF\ x\ ED\ x\ FIR\ x\ CM)}{RfD\ x\ ABW\ x\ AT}\ x\ 10^{-3}$$

Donde:
EF = Frecuencia de exposición (365 días/año)
ED = Duración de la exposición (80,500 años/persona) [46]
FIR = Consumo diario per cápita de pescado (47,670 g/día/persona) [27]
CM = Concentración media de Hg/Cd/Pb presente en el músculo del jurel/bonito (mg/kg peso fresco)
RfD = Dosis de referencia (Hg: 1,000 x 10^{-4} mg/kg/día, Cd: 1,000 x 10^{-3} mg/kg/día y Pb: 4,000 x 10^{-3} mg/kg/día) [11,43,45]

ABW = Peso corporal medio de un adulto (70 kg/persona) [44]
AT = Tiempo medio de exposición (EF x ED = 365 días/año x 80,500 años/persona)

Es necesario indicar que el valor del ED se refiere a la esperanza de vida de un peruano.

El HI nos permite evaluar el riesgo potencial asociado a la mezcla de metales tóxicos [24,45]. Este se calculó con la suma de los THQ´s de Hg, Cd y Pb.

$$HI = THQ_{(Hg)} + THQ_{(Cd)} + THQ_{(Pb)}$$

En caso de que los valores de THQ y HI sean <1, no existe un riesgo potencial de efectos adversos no cancerígenos; de lo contrario, si esos valores son >1, se considera que existe una probabilidad de que la persona desarrolle algún efecto no cancerígeno [24,45].

6.8.3 Riesgo cancerígeno (CR)

El CR mide la probabilidad de que un individuo desarrolle cáncer a lo largo de su vida debido a la exposición a un carcinógeno. Debido a que el Hg es considerado un neurotóxico, el CR solo se calculó para el Cd y Pb empleando la siguiente fórmula [24,43]:

$$CR = \frac{(EF\ x\ ED\ x\ FIR\ x\ CM\ x\ CPSo)}{ABW\ x\ AT}\ x\ 10^{-3}$$

Donde:
EF = Frecuencia de exposición (365 días/año)
ED = Duración de la exposición (80,500 años/persona) [46]
FIR = Consumo diario per cápita de pescado (47,670 g/día/persona) [27]
CM = Concentración media de Cd/Pb presente en el músculo del jurel/bonito (mg/kg peso fresco)
CPSo = Factor pendiente del cáncer (Cd: 0,380 $(mg/kg/día)^{-1}$ y Pb: 8,500 x 10^{-3} $(mg/kg/día)^{-1}$) [43,45]
ABW = Peso corporal medio de un adulto (70 kg/persona) [44]

AT = Tiempo medio de exposición (EF x ED = 365 días/año x 80,500 años/persona)

El rango aceptable se encuentra entre 10^{-6} y 10^{-4}. Si el valor obtenido es $<10^{-6}$ indica que no hay riesgo carcinogénico, mientras que si el valor es $>10^{-4}$ significa que hay una probabilidad de un riesgo carcinogénico [24,43].

6.9 Análisis estadístico

Las concentraciones obtenidas tras el análisis de Hg, Cd y Pb en las muestras de jurel y bonito provenientes de los terminales pesqueros de Ventanilla y Villa María del Triunfo se ingresaron al programa IBM SPSS Statistics (Versión 27) para realizar el análisis descriptivo, calculando la media y la desviación estándar. Posteriormente, se realizó el análisis inferencial empleando el intervalo de confianza al 95 % con el fin de definir el rango de valores en el que se sitúa la media poblacional.

Para evaluar si las concentraciones medias de los metales de interés superaban los límites máximos permisibles, se emplearon la prueba t de Student (técnica paramétrica) y la prueba de rangos de Wilcoxon (técnica no paramétrica), según la normalidad de los datos, la cual se evaluó mediante la prueba de Shapiro-Wilk.

Todos los contrastes se realizaron con un nivel de significancia del 5 %.

VII. RESULTADOS

Tras determinar las concentraciones de Hg, Cd y Pb en las muestras analizadas, se obtuvieron los siguientes resultados.

La tabla 3 presenta las estadísticas descriptivas e inferenciales aplicadas a las concentraciones de los metales de interés detectados en el jurel recolectado de los terminales de Ventanilla y Villa María del Triunfo. La media general de las muestras analizadas fue de 0,018±0,005 mg/kg para Hg, 0,019±0,005 mg/kg para Cd y 0,096±0,029 mg/kg para Pb. Cabe mencionar que el intervalo de confianza al 95 % indica el rango estimado en el que se espera se encuentre la concentración media de Hg, Cd y Pb en la población de jurel de estos terminales.

Tabla 3. Estadísticas descriptivas e inferenciales de las concentraciones de Hg, Cd y Pb en el jurel recolectado en los terminales de Ventanilla y Villa María del Triunfo.

Especie	**Jurel** (*Trachurus murphyi*)				
Terminal	**Metal**	**Media**	**Desviación estándar**	**Intervalo de confianza al 95 %**	
				Inferior	**Superior**
Ventanilla (n=5)	Hg (mg/kg)	0,017	0,007	0,008	0,026
	Cd (mg/kg)	0,020	0,003	0,016	0,024
	Pb (mg/kg)	0,122	0,011	0,109	0,135
Villa María del Triunfo (n=5)	Hg (mg/kg)	0,019	0,001	0,017	0,020
	Cd (mg/kg)	0,018	0,006	0,010	0,026
	Pb (mg/kg)	0,069	0,006	0,061	0,077
Total (n=10)	Hg (mg/kg)	0,018	0,005	0,014	0,021
	Cd (mg/kg)	0,019	0,005	0,015	0,022
	Pb (mg/kg)	0,096	0,029	0,075	0,116

La tabla 4 presenta las estadísticas descriptivas e inferenciales aplicadas a las concentraciones de los metales de interés detectados en el bonito recolectado de los terminales de Ventanilla y Villa María del Triunfo. La media general de las muestras analizadas fue de 0,043±0,022 mg/kg para Hg, 0,012±0,006 mg/kg para Cd y 0,080±0,027 mg/kg para Pb. Asimismo, se visualiza el intervalo de confianza al 95 % que indica el rango estimado en el que se espera se encuentre la concentración media de Hg, Cd y Pb en la población de bonito de estos terminales.

Tabla 4. Estadísticas descriptivas e inferenciales de las concentraciones de Hg, Cd y Pb en el bonito recolectado en los terminales de Ventanilla y Villa María del Triunfo.

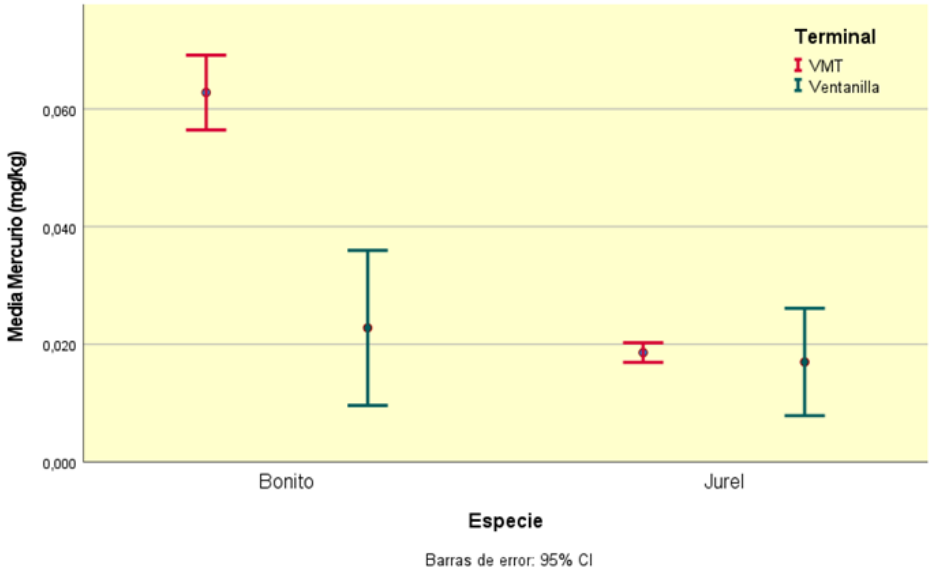
Especie	**Bonito** *(Sarda chiliensis chiliensis)*				
Terminal	**Metal**	**Media**	**Desviación estándar**	**Intervalo de confianza al 95 %**	
				Inferior	**Superior**
Ventanilla (n=5)	Hg (mg/kg)	0,023	0,011	0,010	0,036
	Cd (mg/kg)	0,018	0,003	0,014	0,022
	Pb (mg/kg)	0,097	0,029	0,061	0,134
Villa María del Triunfo (n=5)	Hg (mg/kg)	0,063	0,005	0,056	0,069
	Cd (mg/kg)	0,007	0,002	0,004	0,009
	Pb (mg/kg)	0,063	0,007	0,054	0,071
Total (n=10)	Hg (mg/kg)	0,043	0,022	0,027	0,059
	Cd (mg/kg)	0,012	0,006	0,008	0,017
	Pb (mg/kg)	0,080	0,027	0,060	0,100

Para visualizar con mayor claridad la incertidumbre y la variabilidad de las concentraciones medias de Hg, Cd y Pb del jurel y bonito, se utilizó el diagrama de barras de error.

La Figura 2 muestra que, en el caso del bonito, la concentración media de Hg en el terminal de Villa María del Triunfo es mayor en comparación con los valores del terminal

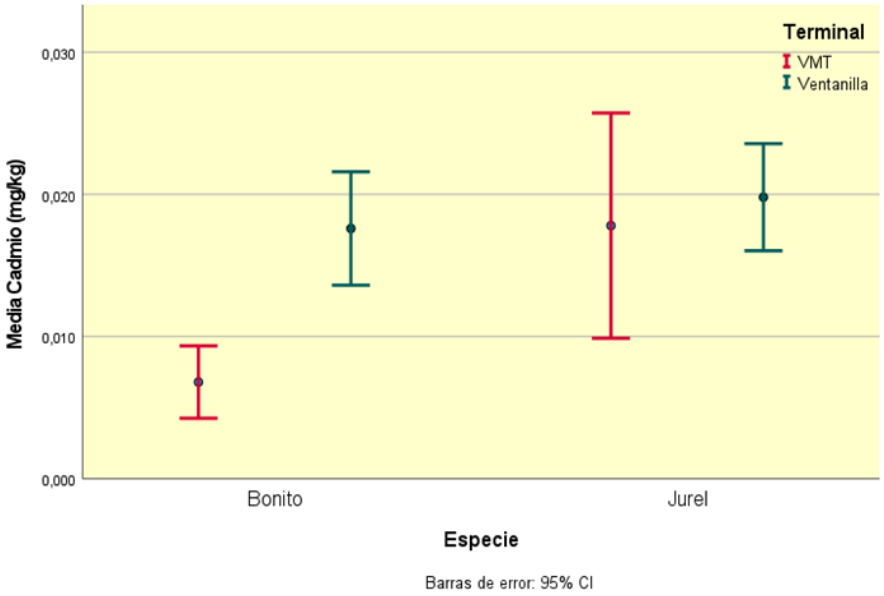
de Ventanilla, mientras que, en el caso del jurel, las concentraciones medias de Hg en ambos terminales son similares. Además, se observa una menor dispersión en los valores del terminal de Villa María del Triunfo para la especie jurel.

Figura 2. Distribución de las concentraciones medias de Hg (mg/kg) en bonito y jurel recolectados en los terminales de Villa María del Triunfo y Ventanilla.



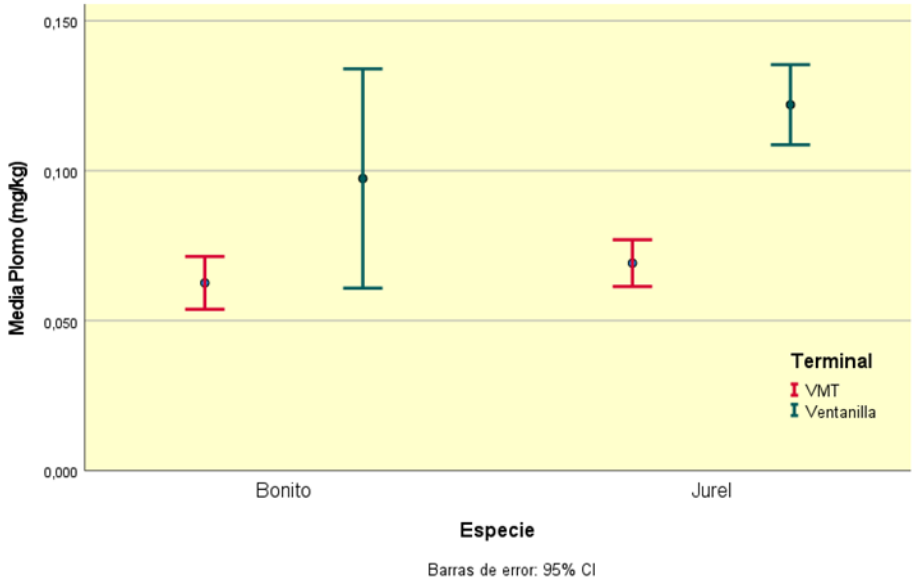
El diagrama de barras de error de la Figura 3 muestra que, en el caso del bonito, la concentración media de Cd en el terminal de Villa María del Triunfo es menor en comparación con los valores del terminal de Ventanilla, mientras que, en el caso del jurel, las concentraciones medias de Cd en ambos terminales son similares. Asimismo, se observa una menor dispersión en los valores del terminal de Villa María del Triunfo para la especie bonito.

Figura 3. Distribución de las concentraciones medias de Cd (mg/kg) en bonito y jurel recolectados en los terminales de Villa María del Triunfo y Ventanilla.



El diagrama de barras de error de la Figura 4 muestra que, en el caso del bonito, la concentración media de Pb en el terminal de Villa María del Triunfo presenta una distribución más homogénea en comparación con los valores del terminal de Ventanilla. Sin embargo, no se observan diferencias significativas en términos de concentraciones medias. Por otro lado, en el caso del jurel, la concentración media de Pb es menor en el terminal de Villa María del Triunfo. De igual manera, se observa una menor dispersión de los valores en el terminal de Villa María del Triunfo en ambas especies.

Figura 4. Distribución de las concentraciones medias de Pb (mg/kg) en bonito y jurel recolectados en los terminales de Villa María del Triunfo y Ventanilla.



Las tablas 5, 6 y 7 presentan las comparaciones entre las concentraciones medias de los metales de interés y los límites máximos permisibles en el jurel y el bonito.

Para ello, se empleó la prueba paramétrica t de Student, en la que se utilizó como valor de prueba el menor límite máximo establecido entre las normativas internacionales y nacionales. De esta manera, si la concentración media superaba dicho valor, se comparaba con los demás límites máximos permisibles establecidos por las demás normativas; de lo contrario, se determinaba que dicho valor no superaba ninguna de las normativas.

En la parte inferior de las tablas se detalla la normativa específica a la que corresponde el valor de prueba utilizado como referencia para comparar las concentraciones medias.

La tabla 5 presenta la comparación de la concentración media de Hg en el jurel y bonito de los terminales de Ventanilla y Villa María del Triunfo, junto con el valor de prueba. El sig. Bilateral obtenido por el SPSS fue significativo (Sig < 0,050), lo que demuestra que la concentración de Hg en jurel y bonito no superó el límite máximo permisible en ninguno de los terminales.

La prueba de normalidad de Shapiro-Wilk mostró que, a excepción de la concentración de Hg en bonito del terminal de Ventanilla, los valores presentaron una distribución normal (p-valor > 0,050), lo que justificó el uso de la prueba t de Student. Dado que la concentración de Hg en la especie de bonito del terminal Ventanilla no presentó una distribución normal, se utilizó la prueba no paramétrica de rangos con signo de Wilcoxon. Los resultados de esta prueba también fueron significativos (p-valor < 0,050), coincidiendo con los de la prueba t de Student.

Con base en estos resultados y un nivel de significancia del 5%, se determinó que la concentración media de Hg no superó los límites máximos permisibles.

Tabla 5. Comparación de la concentración media de Hg (mg/kg) con el límite máximo permisible en el jurel y bonito recolectados en los terminales de Ventanilla y Villa María del Triunfo.

Especie	**Terminal**	**Media muestral (mg/kg)**	**Valor de prueba = 0,500 mg/kg (*)**			**Shapiro-Wilk**	**Rangos con signo de Wilcoxon**
			t	**gl**	**Sig. (bilateral)**	**p-valor**	
Jurel (*Trachurus murphyi*)	**Ventanilla**	0,017	-147,000	4	0,000	0,146	
	Villa María del Triunfo	0,019	-802,300	4	0,000	0,201	
Bonito *(Sarda chiliensis chiliensis)*	**Ventanilla**	0,023	-100,500	4	0,000	0,044(**)	0,039
	Villa María del Triunfo	0,063	-191,000	4	0,000	0,073	

(*): Para el valor de prueba se utilizó la Resolución de Dirección Ejecutiva N 057-2016-SANIPES-DE: Indicadores Sanitarios y de Inocuidad para los Productos Pesqueros y Acuícolas para el Mercado Nacional

y de Exportación de la Autoridad Nacional de Sanidad e Inocuidad en Pesca y Acuicultura (SANIPES).
(**) No presenta una distribución normal.

La tabla 6 presenta la comparación de la concentración media de Cd en el jurel y bonito de los terminales de Ventanilla y Villa María del Triunfo, junto con el valor de prueba. El sig. Bilateral obtenido por el SPSS fue significativo (Sig < 0,050), lo que demuestra que la concentración de Cd en jurel y bonito no superó el límite máximo permisible en ninguno de los terminales.

La prueba de normalidad de Shapiro-Wilk mostró que, a excepción de la concentración de Cd en jurel del terminal de Villa María del Triunfo, los valores presentaron una distribución normal (p-valor > 0,050), lo que justificó el uso de la prueba t de Student. Dado que la concentración de Cd en la especie de jurel del terminal Villa María del Triunfo no presentó una distribución normal, se utilizó la prueba no paramétrica de rangos con signo de Wilcoxon. Los resultados de esta prueba también fueron significativos (p-valor < 0,050), coincidiendo con los de la prueba t de Student.

Con base en estos resultados y un nivel de significancia del 5%, se determinó que la concentración media de Cd no superó los límites máximos permisibles.

Tabla 6. Comparación de la concentración media de Cd (mg/kg) con el límite máximo permisible en el jurel y bonito recolectados en los terminales de Ventanilla y Villa María del Triunfo.

Especie	Terminal	Media muestral (mg/kg)	Valor de prueba = 0,050 mg/kg (*)			Shapiro-Wilk	Rangos con signo de Wilcoxon
			t	gl	Sig. (bilateral)	p-valor	
Jurel (*Trachurus murphyi*)	**Ventanilla**	0,020	-22,300	4	0,000	0,985	
	Villa María del Triunfo	0,018	-11,300	4	0,000	0,010(**)	0,042
Bonito *(Sarda chiliensis chiliensis)*	**Ventanilla**	0,018	-22,600	4	0,000	0,666	
	Villa María del Triunfo	0,007	-47,100	4	0,000	0,057	

(*): Para el valor de prueba se utilizó el Reglamento (UE) 2023/915 de la Comisión de 25 de abril de 2023 relativo a los límites máximos de determinados contaminantes en los alimentos y por el que se deroga el Reglamento (CE) n° 1881/2006 de la Comisión Europea.

(**) No presenta una distribución normal.

La tabla 7 presenta la comparación de la concentración media de Pb en el jurel y bonito de los terminales de Ventanilla y Villa María del Triunfo, junto con el valor de prueba. El sig. Bilateral obtenido por el SPSS fue significativo (Sig < 0,050), lo que demuestra que la concentración de Pb en jurel y bonito no superó el límite máximo permisible en ninguno de los terminales.

La prueba de normalidad de Shapiro-Wilk mostró que los valores presentan una distribución normal (p-valor > 0,050), lo que justificó el uso de la prueba t de Student.

Con base en estos resultados y un nivel de significancia del 5 %, se determinó que la concentración media de Pb no superó los límites máximos permisibles.

Tabla 7. Comparación de la concentración media de Pb (mg/kg) con el límite máximo permisible en el jurel y bonito recolectados en los terminales de Ventanilla y Villa María del Triunfo.

Especie	Terminal	Media muestral (mg/kg)	Valor de prueba = 0,300 mg/kg (*)			Shapiro-Wilk
			t	gl	Sig. (bilateral)	p-valor
Jurel (*Trachurus murphyi*)	**Ventanilla**	0,122	-37,000	4	0,000	0,995
	Villa María del Triunfo	0,069	-82,400	4	0,000	0,334
Bonito *(Sarda chiliensis chiliensis)*	**Ventanilla**	0,097	-15,400	4	0,000	0,836
	Villa María del Triunfo	0,063	-74,800	4	0,000	0,747

(*): Para el valor de prueba se utilizó el Reglamento (UE) 2023/915 de la Comisión de 25 de abril de 2023 relativo a los límites máximos de determinados contaminantes en los alimentos y por el que se deroga el Reglamento (CE) n° 1881/2006 de la Comisión Europea.

Las tablas 8 y 9 presentan la evaluación del riesgo para la salud humana asociado al consumo de jurel y bonito recolectados en los terminales de Ventanilla y Villa María del Triunfo.

Los indicadores EDI, THQ, HI y CR fueron calculados con base en las concentraciones medias. Los límites de cada indicador se especifican en la parte inferior de las tablas.

Los valores del EDI, expresados en las tablas 8 y 9, no superan la Rfd establecida por la USEPA para los metales de interés, lo que indica que se encuentran dentro de límites considerados seguros.

Respecto a los valores de los THQ's en las tablas 8 y 9, se observa que estos son inferiores a 1, lo que indica que la exposición humana a los metales de interés a través del consumo de los pescados analizados se encuentra dentro de un rango seguro. En concordancia, los valores de HI, al ser menores a 1 para las especies jurel y bonito recolectadas en los terminales de Ventanilla y Villa María del Triunfo, sugieren que la exposición combinada se encuentra dentro de un nivel seguro, sin riesgo apreciable para la salud.

Finalmente, los resultados del CR calculado, que se muestran en las tablas 8 y 9, al encontrarse en un rango de 10^{-6} y 10^{-7}, reflejan que el riesgo es muy bajo y no representa una amenaza para la salud pública.

Tabla 8. Evaluación de riesgo para la salud humana del jurel recolectado en los terminales de Ventanilla y Villa María del Triunfo.

Muestra	**Evaluación de Riesgo**	**Terminal: Ventanilla**			**Terminal: Villa María del Triunfo**		
		Hg	**Cd**	**Pb**	**Hg**	**Cd**	**Pb**
Jurel (*Trachurus murphyi*)	**EDI** (µg/kg día)	0,012	0,014	0,083	0,013	0,012	0,047
	THQ	0,116	0,014	0,021	0,129	0,012	0,012
	HI	0,151			0,153		
	CR	-	$5,176 \times 10^{-6}$	$7,062 \times 10^{-7}$	-	$4,658 \times 10^{-6}$	$3,994 \times 10^{-7}$

NOTA: Límites: EDI (Rfd: 0,100 µg/kg/día, 1,000 µg/kg/día y 4,000 µg/kg/día para Hg, Cd y Pb, respectivamente); THQ + HI (Valores < 1) y CR (Rango aceptable: 10^{-6} a 10^{-4}).

Tabla 9. Evaluación de riesgo para la salud humana del bonito recolectado en los terminales de Ventanilla y Villa María del Triunfo.

Muestra	Evaluación de Riesgo	Terminal: Ventanilla			Terminal: Villa María del Triunfo		
		Hg	Cd	Pb	Hg	Cd	Pb
Bonito *(Sarda chiliensis chiliensis)*	**EDI** (µg/kg día)	0,016	0,012	0,066	0,043	0,005	0,043
	THQ	0,157	0,012	0,017	0,429	0,005	0,011
	HI	0,186			0,445		
	CR	-	$4,658 \times 10^{-6}$	$5,615 \times 10^{-7}$	-	$1,811 \times 10^{-6}$	$3,647 \times 10^{-7}$

NOTA: Límites: EDI (Rfd: 0,100 µg/kg/día, 1,000 µg/kg/día y 4,000 µg/kg/día para Hg, Cd y Pb, respectivamente); THQ + HI (Valores < 1) y CR (Rango aceptable: 10^{-6} a 10^{-4}).

VIII. DISCUSIÓN

El presente trabajo tuvo como objetivo determinar las concentraciones de Hg, Cd y Pb en jurel y bonito provenientes de los terminales pesqueros de Ventanilla y Villa María del Triunfo, así como comparar estos valores con los límites máximos permisibles establecidos por la CE, el Codex Alimentarius y SANIPES, y realizar la evaluación de riesgo para la salud humana.

Es importante mencionar que, si bien los metales ingresan a través del alimento, el agua y los sedimentos, las diferencias en las concentraciones de los metales que se encuentran en sus órganos y tejidos se ven influenciados por factores endógenos y exógenos [24,25]. Los factores endógenos corresponden a las características propias de cada organismo (edad, talla, hábitos alimentarios, capacidad metabólica, etc.) que repercuten en el proceso de bioacumulación de los metales [49,50]. Por su parte, los factores exógenos se refieren a las condiciones fisicoquímicas del medio marino (salinidad, pH, dureza, temperatura, etc.) que afectan la biodisponibilidad de los metales [49,51]. Por lo tanto, las diferencias observadas en las concentraciones de Hg, Cd y Pb en el jurel y bonito son un reflejo de sus distintas capacidades de bioacumulación como de sus interacciones específicas con el ambiente.

Como se ha descrito anteriormente, en el medio marino predomina la forma orgánica del Hg: el MeHg. Este compuesto se caracteriza por su naturaleza lipofílica, lo que le permite cruzar cualquier barrera celular, facilitando así su absorción en los peces [11,52]. Asimismo, tiene una gran afinidad por los grupos sulfhidrilo o tiol (R-SH) de los aminoácidos, especialmente por la cisteína (Cys) [53]. Al formar el complejo MeHg-Cys, estructura similar a la metionina, este es reconocido por los transportadores de aminoácidos. De esta manera, el complejo ingresa a las células musculares, en donde se une a los grupos sulfhidrilo de las proteínas musculares [53]. La formación de enlaces covalentes entre el MeHg y los grupos sulfhidrilo dificultan la movilización y excreción del Hg [53], lo cual explica la acumulación de este metal en los tejidos musculares del jurel y bonito.

La acumulación del MeHg en el tejido muscular favorece la transferencia eficiente del Hg a través de la cadena alimenticia. De acuerdo con los datos obtenidos, la concentración media de Hg fue mayor en el bonito de Villa María del Triunfo (0,063 mg/kg), seguida del bonito de Ventanilla (0,023 mg/kg), el jurel de Villa María del Triunfo (0,019 mg/kg) y, por último, el jurel de Ventanilla (0,017 mg/kg). Las concentraciones elevadas de Hg en el bonito podrían deberse a su nivel trófico y hábitos alimentarios. El bonito se ubica en un nivel trófico superior [54,55] y es considerado un pez carnívoro [56], ya que su dieta principal se basa en la anchoveta y otras variedades de peces (sardina y samasa), así como cefalópodos (pota y calamar) y pequeños crustáceos (camarón) [37]. En contraste, el jurel se ubica en un nivel trófico inferior [54,57], con una dieta mixta a base de crustáceos (eufáusidos, munida y larvas zoeas) y peces de menor tamaño (anchoveta, mictófidos y vinciguerria) [37].

Por otro lado, investigaciones han reportado que las especies de mayor talla que se alimentan de especies de menor tamaño tienden a acumular una mayor cantidad de Hg, ya que son más longevas [56]. Para el caso del presente estudio, las muestras de bonito presentaron una talla más grande que las del jurel, así como concentraciones más elevadas de Hg. Estos hallazgos son compatibles con lo reportado previamente.

Si bien se detectaron concentraciones de Hg en el jurel y bonito, ninguna de las muestras superó el límite máximo permisible de 0,500 mg/kg establecido por la CE y SANIPES. Esto coincide con los resultados obtenidos por Huatarongo y Santamaría (2023), quienes determinaron que la concentración media de Hg en el tejido muscular del jurel (0,065 mg/kg), proveniente del distrito de San Juan de Lurigancho, no superó los límites de la FDA (1,000 mg/kg), OMS (0,500 mg/kg) y SANIPES (1,100 mg/kg) [58]. De igual forma, Perez y Rodriguez (2025) reportaron que las concentraciones medias de Hg en los tejidos musculares del jurel (0,017 mg/kg) y bonito (0,015 mg/kg), recolectados en el terminal de Ventanilla, tampoco superaron el límite del Codex Alimentarius (0,500 mg/kg) [56].

En este sentido, el hecho de que el jurel y bonito no hayan superado el límite máximo permisible de Hg podría deberse a que estas son especies pelágicas que se concentran en aguas superficiales costeras [37], donde la biodisponibilidad del MeHg se ve reducida

debido a que el proceso de metilación ocurre en las capas superiores de los sedimentos del fondo marino [59]. Por otra parte, estas especies presentan un ciclo de vida corto, ya que, por su alta demanda comercial, son capturadas al alcanzar la madurez [27], lo cual limita el tiempo de exposición para la bioacumulación de Hg. Finalmente, se podría inferir que los hábitos alimenticios de estas especies podrían haber influido en una menor integración de este metal, lo que en consecuencia habría limitado su transferencia a lo largo de la cadena trófica.

Con respecto al Cd, en el medio marino prevalece la forma inorgánica (Cd^{+2}), la cual posee una gran afinidad por los grupos sulfhidrilo [7]. Cuando este metal ingresa a los peces, el Cd se une a la metalotioneína (MT), convirtiéndolo en una forma menos tóxica, siempre que el metal permanezca unido a esta proteína [7]. Cabe mencionar que la MT es una proteína de bajo peso molecular rica en cisteína, producida principalmente por el hígado y el riñón, que se sintetiza y libera en respuesta a la detección de iones metálicos blandos (cationes de gran tamaño) al organismo [60]. Al formar el complejo Cd-MT, este se distribuye a través del torrente sanguíneo y se acumula principalmente en el hígado y el riñón, órganos que participan en la desintoxicación y la excreción de este metal, respectivamente [24,61]. Sin embargo, cuando estos órganos alcanzan su límite de retención, el Cd puede depositarse en el tejido muscular, formando enlaces con los grupos sulfhidrilo de las proteínas presentes [24,61]. Este mecanismo podría explicar la detección de Cd en los tejidos musculares del jurel y bonito.

En relación con los resultados obtenidos, la concentración media de Cd fue mayor en el jurel de Ventanilla (0,020 mg/kg), seguido del jurel de Villa María del Triunfo (0,018 mg/kg) y el bonito de Ventanilla (0,018 mg/kg), mientras que el bonito de Villa María del Triunfo presentó la menor concentración (0,007 mg/kg). Estos hallazgos sugieren que las concentraciones elevadas de Cd en el jurel podrían estar asociados a sus hábitos alimentarios. La dieta preferida de esta especie son los eufáusidos y la munida, organismos que habitan cerca de los sedimentos marinos, los cuales son el principal reservorio de metales como el Cd [57,61]. Por lo tanto, la exposición de estos organismos al Cd podría favorecer su transferencia al jurel a través de la cadena alimenticia, contribuyendo en la bioacumulación de este metal.

La presencia de Cd en las muestras de jurel y bonito no superó el límite máximo permisible de 0,050 mg/kg establecido por la CE y SANIPES. Estos hallazgos concuerdan con lo reportado por Masco et al. (2022), quienes evidenciaron que la concentración de Cd en el tejido muscular del jurel (< 0,010 mg/kg), proveniente de los principales centros de abasto de Cusco, no superó los límites de la Unión Europea (0,050 mg/kg) [62]. Por el contrario, Talavera (2025) reportó que las concentraciones medias de Cd en los tejidos musculares de bonito (0,160 mg/kg) y jurel (0,053 mg/kg), recolectados en el terminal de Villa María del Triunfo, superaron el límite de la CE y SANIPES (0,050 mg/kg) [44]. Estos resultados podrían indicar que los ejemplares estuvieron más expuestos al Cd en comparación con las muestras utilizadas en la presente investigación.

Por otro lado, las bajas concentraciones de Cd en el jurel y bonito podrían atribuirse a la afinidad de este metal por acumularse en órganos metabólicamente activos, como el hígado y riñón, en lugar del tejido muscular [24,60,61], mecanismo explicado anteriormente. Sumado al corto tiempo de vida de estas especies y la menor exposición de sus presas a este metal podrían haber contribuido a una menor bioacumulación del Cd en las muestras analizadas.

Referente al Pb, la forma inorgánica (Pb^{+2}) es la que se encuentra principalmente en el medio marino y posee una gran afinidad por los grupos sulfhidrilo [7]. A diferencia del Cd, la MT no se sintetiza cuando ingresa el Pb, ya que se une a otras moléculas de mayor tamaño que poseen grupos de cisteína, como la delta-aminolevulinato deshidratasa (ALAD), inactivándola [7]. Por otro lado, la similitud del Pb con el Ca ocasiona que participe en el recambio de Ca en vertebrados, lo que resulta en su acumulación en el sistema óseo [7,49]. Igualmente, este metal se puede distribuir y acumular en diversos órganos como el hígado, riñón, músculo y branquias [49]. Lo mencionado anteriormente explicaría el hallazgo de Pb en los tejidos musculares de jurel y bonito.

Según los resultados obtenidos, la concentración media de Pb más alta se detectó en el jurel de Ventanilla (0,122 mg/kg), seguido del bonito de Ventanilla (0,097 mg/kg), el jurel de Villa María del Triunfo (0,069 mg/kg) y, por último, el bonito de Villa María del Triunfo (0,063 mg/kg). En resumen, el jurel presentó las mayores concentraciones de Pb que el bonito en ambos terminales. Esta diferencia podría explicarse por sus hábitos

alimentarios. Como se explicó anteriormente, los organismos que componen la dieta del jurel habitan cerca de los sedimentos marinos, donde se encuentra el Pb [49], a diferencia de las presas que conforman la dieta del bonito.

Los niveles de Pb hallados en las muestras de jurel y bonito no excedieron el límite máximo permisible de 0,300 mg/kg establecido por la CE, Codex Alimentarius y SANIPES. Estos datos se alinean con los resultados de Masco et al. (2022), quienes evidenciaron que la concentración del Pb en el tejido muscular del jurel (< 0,050 mg/kg), provenientes de los principales centros de abasto de Cusco, no superó los límites de la Unión Europea (0,300 mg/kg) [62]. Por el contrario, contrario, Pancca y Riveros (2025) reportaron que la concentración media de Pb en el tejido muscular del bonito (2,140 mg/kg), recolectado en dos centros de abasto del distrito de Lurigancho - Chosica, superó el límite del Codex Alimentarius (0,200 mg/kg) y SANIPES (0,300 mg/kg). Esto sugiere que los ejemplares analizados en dicho estudio estuvieron expuestos un mayor tiempo al Pb en comparación con las muestras del presente trabajo, ya que los metales se caracterizan por su naturaleza no biodegradable y su potencial para ser acumulados [63].

A partir de lo expuesto, el hecho de que los niveles de Pb en el jurel y bonito se mantuvieran por debajo del límite permisible se podría explicar principalmente a la afinidad de este metal por el sistema óseo en comparación del tejido muscular. De la misma manera, el corto tiempo de vida de estas especies y la baja exposición de sus presas al Pb podrían haber contribuido a una menor bioacumulación del metal en las muestras obtenidas.

Es preciso señalar que no se realizó una comparación de las concentraciones de Hg, Cd y Pb entre los terminales de Ventanilla y Villa María del Triunfo, ya que estos son lugares de acopio que reciben jurel y bonito de diversas zonas del litoral peruano para su comercialización. Por lo tanto, la biodisponibilidad de estos metales para su posterior bioacumulación por parte de las especies de estudio podría estar sujeta a factores exógenos propios de sus hábitats, los cuales varían constantemente.

Entre estos factores, el pH, la temperatura y salinidad han sido identificados como moduladores críticos de la biodisponibilidad de los metales en el medio marino [61]. Por

ejemplo, un pH ácido intensifica la metilación de Hg y favorece la disponibilidad y solubilidad del Cd y Pb [57]. Por otro lado, el aumento de la temperatura acelera las tasas metabólicas y respiratorias de los peces, aumentando el flujo de agua a través de las branquias con el fin de obtener el oxígeno (O_2) necesario, facilitando el ingreso de los metales disueltos en agua. Asimismo, la menor disponibilidad de O_2 en aguas calientes limita la formación de compuestos menos solubles con los metales, permitiendo que estos se encuentren más disponibles para su captación [49]. Finalmente, los bajos niveles de salinidad podrían reducir la formación de complejos estables, incrementando la concentración de metales libres, los cuales se encuentran más biodisponibles para su absorción [59].

Aunque estudios previos han evaluado la presencia de metales no esenciales en especies de pescados altamente consumidas en el Perú, como el jurel (*Trachurus murphyi*) y bonito (*Sarda chiliensis chiliensis*), existe información limitada que asocie las concentraciones reportadas con las implicancias para la salud humana en la comunidad adulta de Perú consumidora de pescado.

Hasta la fecha, solo se ha identificado un estudio que haya realizado una evaluación de riesgo para la salud humana en ambas especies, realizado por Talavera (2025). Tras determinar los niveles de Cd en 15 muestras frescas de bonito y jurel, se concluyó que las concentraciones no representaron un riesgo significativo para la salud pública bajo las condiciones evaluadas. Sin embargo, si bien el autor analizó el potencial riesgo para la salud humana que podrían representar las concentraciones halladas, esta evaluación fue desarrollada mediante la metodología de la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR), cuyos criterios y cálculos difieren de la metodología de la USEPA, la cual es ampliamente implementada para estimar riesgos y establecer orientaciones relacionadas con el consumo de alimentos [23,44].

Pese a la escasa información disponible en la evaluación de riesgo en jurel y bonito en el país, se pueden encontrar investigaciones enfocadas a la evaluación del riesgo asociado al consumo de pescados frescos en otras regiones del Perú.

En Loreto, Brousett-Minaya et al. (2024), analizaron las concentraciones de Hg, Pb, Cd, As, Zn, Cu, Ni y Cr en el músculo de más de 50 especies de pescados nativos muestreados de cuatro ríos que confluyen en el Río Amazonas. Tras el análisis, los autores determinaron el potencial riesgo para la salud humana que podría suponer el consumo de estos productos hidrobiológicos. Los resultados mostraron que, respecto a los indicadores EDI y THQ, el Hg fue el único metal que excedió los niveles recomendados por la USEPA. Mientras que, respecto al indicador CR, hallaron que únicamente el Cr poseía un potencial riesgo carcinogénico [64].

También en Loreto, Del Águila Chávez et al. (2020) cuantificaron el mercurio total (T-Hg) de la zona muscular de cinco pescados provenientes del Río Alto Nanay: fasaco (*Hoplias malabaricus*), doncella (*Pseudoplatystoma punctifer*), bagre (*Pimelodus blochii*), tucunaré (*Cichla monoculus*) y yaraqui (*Semaprochilodus insignis*). Tras la evaluación de riesgo para la salud humana, concluyeron que las especies *C. monoculus* y *P. punctifer* poseían riesgos sustanciales para los consumidores, de acuerdo con los valores de THQ obtenidos. Adicionalmente, señalaron que *S. insignis*, al ser una especie detritívora a diferencia de las demás especies evaluadas (las cuales eran piscívoras), expresó menores concentraciones de mercurio, lo cual se explicaba por la diferenciación trófica, recomendando su consumo para la población [65].

Según la USEPA, la evaluación de riesgo implica la recopilación y análisis de datos relacionada con los posibles efectos en la salud de una población expuesta a sustancias de interés. Bajo este enfoque, la presente tesis se enfocó en el potencial efecto de la exposición al Hg, Cd y Pb en la población adulta de Lima Metropolitana a través del consumo de jurel y bonito fresco [23].
Para ello, se emplearon indicadores como la ingesta diaria estimada (EDI), el cociente de riesgo objetivo (THQ), el índice de riesgo (HI) y el riesgo cancerígeno (CR), mediante los cuales se evidenció que el consumo de jurel y bonito comercializados en los terminales de Ventanilla y Villa María del Triunfo, no representan un riesgo significativo para la salud humana bajo las condiciones evaluadas.

En términos de ingesta estimada diaria (EDI), se pudieron evidenciar variaciones entre especies y terminales. Debido a que todos los valores de EDI fueron menores que los

valores referenciales (RfD), no se podrían anticipar efectos adversos para la población objetivo.

De acuerdo con la Tabla 8, respecto al jurel, el Pb registró los valores más alto de EDI en las muestras de ambos terminales; Ventanilla (0,083 µg/kg día) y Villa María del Triunfo (0,047 µg/kg día); en contraste con los valores de Hg y Cd.

A partir de los resultados presentados en la Tabla 9, se observa que el valor más alto de EDI en el bonito correspondió al Pb en la muestra de Ventanilla (0,066 µg/kg día), en tanto que el valor de Pb de Villa María del Triunfo presentó un valor equivalente al Hg del mismo terminal (0,043 µg/kg día en ambos casos), superior a los valores del Cd en ambos terminales.

A pesar de no superar los valores de las dosis de referencia, la bioacumulación de metales potencialmente perjudiciales para salud humana se ve influenciada por factores como el tamaño, la edad, los hábitos alimenticios y el hábitat de las especies, por lo que los niveles de riesgo asociados a su consumo no son constantes y pueden modificarse con el tiempo.

Según la Tabla 8 y 9, los valores de THQ e HI obtenidos para las especies analizadas fueron inferiores a 1, sugiriendo un nivel de riesgo no carcinogénico aceptable asociado a los metales evaluados. Igualmente, los valores de CR se mantuvieron dentro del rango aceptable (10^{-6}-10^{-4}), lo que evidencia una baja probabilidad de desarrollar efectos cancerígenos en los consumidores frecuentes de las especies analizadas.

No obstante, como ya descrito anteriormente en la presente investigación, debe de considerarse que la exposición simultánea, y prolongada, a múltiples contaminantes puede influir en la susceptibilidad frente a efectos adversos en humanos. La USEPA, señala que el riesgo cancerígeno se considera proporcional a la exposición acumulativa. A niveles de exposición bajos, esté valor puede disminuir considerablemente, inclusive pudiendo aproximarse a cero [23].

A pesar de los resultados obtenidos, resulta imperante considerar la posible influencia de fuentes antropogénicos de contaminación cercanas a ecosistemas marinos, además de los

factores biológicos y ambientales asociados a la bioacumulación y biodisponibilidad de los metales analizados, y que podrían explicar las variaciones encontradas en la presente tesis.

IX. CONCLUSIONES

- El tejido muscular del bonito (*Sarda chiliensis chiliensis*) del terminal pesquero de Villa María del Triunfo presentó la concentración media más alta de Hg, mientras que el tejido muscular del jurel (*Trachurus murphyi*) del terminal pesquero de Ventanilla presentó la concentración media más alta de Cd y de Pb.
- Las concentraciones medias de Hg, Cd y Pb analizadas en el tejido muscular del jurel (*Trachurus murphyi*) y bonito (*Sarda chiliensis chiliensis*) comercializados en los terminales pesqueros de Ventanilla y de Villa María del Triunfo se encontraron dentro de los límites establecidos por el CE, Codex Alimentarius y SANIPES.
- Se evidenció que los valores de EDI obtenidos para Hg, Cd y Pb fueron inferiores a las RfD establecidas por USEPA, al igual que los valores de THQ, HI y CR los cuales se mantuvieron dentro del rango considerado aceptable, lo que permite concluir que el consumo del tejido muscular del jurel y bonito comercializados en los terminales pesqueros de Ventanilla y Villa María del Triunfo no representan un riesgo para la salud humana bajo las condiciones analizadas.

X. LIMITACIONES

- La presente investigación se enfocó en el análisis de Hg, Cd y Pb en el tejido muscular en el jurel y bonito, debido a que es la parte más consumida por la población peruana. Por consiguiente, otros órganos o tejidos de gran relevancia en términos de bioacumulación tales como el hígado, branquias o tejido óseo, no fueron analizados. Otros parámetros biológicos como el tamaño, edad, peso y hábitat de los pescados obtenidos de los terminales no fueron considerados.
- Al ser un estudio transversal que únicamente determinó las concentraciones de Hg, Cd y Pb; se excluyó a otros metales no esenciales potencialmente relevantes desde un punto de vista toxicológico, además de limitar los análisis de los

comportamientos de las concentraciones de los metales bajo diferentes estaciones o cambios meteorológicos.

- La evaluación de riesgo para la salud humana fue desarrollada únicamente para la población adulta consumidora de pescado de Lima Metropolitana, por lo que los resultados no se pueden extrapolar a otro grupo etario o región del país. No obstante, la limitada información disponible en el Perú respecto a la evaluación de riesgo para la salud humana asociada al consumo de jurel y bonito hace que los resultados obtenidos en la presente tesis constituyan evidencia relevante para futuras investigaciones.

XI. RECOMENDACIONES

- Se recomienda la evaluación de los impactos ecológicos de la contaminación por metales no esenciales, lo que permitiría el fortalecimiento de la salud pública mediante el desarrollo de estrategias de vigilancia ambiental para los ecosistemas acuáticos.
- Se recomienda la implementación de un programa de monitoreo continuo de la concentración de Hg, Cd y Pb, además de otros metales no esenciales, en productos hidrobiológicos a largo plazo para observar fluctuaciones estacionales y determinar tendencias en la acumulación de metales no esenciales.
- Se recomienda investigar la relación intermetálica entre el Hg, Cd y Pb con otros metales esenciales o no esenciales en los productos hidrobiológicos con el propósito de proporcionar información más integral sobre los posibles riesgos asociados a la salud humana.
- Se recomienda la evaluación de la determinación de Hg, Cd y Pb en otras partes del jurel y bonito no analizadas en este estudio, tales como branquias, hígado, corazón, intestinos, piel y estructuras accesorias que también son consumidas debido a que, al ser metabólicamente activos, participan en la acumulación y/o excreción de los metales mencionados. Por ello, la distribución heterogénea de estos metales en el organismo podría implicar vías de exposición y riesgos potenciales para la salud humana no contemplados al analizar únicamente el tejido muscular.

XII. BIBLIOGRAFÍA

1. Wood CM, Farrel AP, Brauner CJ. Homeostasis and toxicology of essential metals. En: Fish Physiology [Internet]. Vol. 31A. Estados Unidos: Elsevier; 2012. 520 p. Disponible en: https://www.sciencedirect.com/bookseries/fish-physiology/vol/31/part/PA

2. Wood CM, Farrel AP, Brauner CJ. Homeostasis and toxicology of nonessential metals. En: Fish Physiology [Internet]. Vol. 31B. Estados Unidos: Elsevier; 2012. 528 p. Disponible en: https://www.sciencedirect.com/bookseries/fish-physiology/vol/31/part/PB

3. Collado-López S, Betanzos-Robledo L, Téllez-Rojo MM, Lamadrid-Figueroa H, Reyes M, Ríos C, et al. Heavy Metals in Unprocessed or Minimally Processed Foods Consumed by Humans Worldwide: A Scoping Review. Int J Environ Res Public Health [Internet]. 2022 [citado el 29 de febrero de 2024];19(14):8651. Disponible en: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9319294/

4. Rahman Z, Singh VP. Bioremediation of toxic heavy metals (THMs) contaminated sites: concepts, applications and challenges. Environ Sci Pollut Res Int [Internet]. 2020 [citado el 29 de febrero de 2024]; 27(22):27563-27581. Disponible en: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32418096/

5. Canham R, González-Prieto AM, Elliott JE. Mercury Exposure and Toxicological Consequences in Fish and Fish-Eating Wildlife from Anthropogenic Activity in Latin America. Integr Environ Assess Manag [Internet]. 2021 [citado el 29 de febrero de 2024]; 17(1):13–26. Disponible en: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7821190/

6. Naija A, Yalcin HC. Evaluation of cadmium and mercury on cardiovascular and neurological systems: Effects on humans and fish. Toxicology Reports [Internet]. 2023 [citado el 29 de febrero de 2024]; 10:498-508. Disponible en: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214750023000458

7. Tamele IJ, Vázquez Loureiro P. Lead, Mercury and Cadmium in Fish and Shellfish from the Indian Ocean and Red Sea (African Countries): Public Health Challenges. Journal of Marine Science and Engineering [Internet]. 2020 [citado el 29 de febrero de 2024];8(5):344-4. Disponible en: https://www.mdpi.com/2077-1312/8/5/344

8. Botté A, Seguin C, Nahrgang J, Zaidi M, Guery J, Leignel V. Lead in the marine environment: concentrations and effects on invertebrates. Ecotoxicology [Internet]. 2022 [citado el 29 de febrero de 2024];31(2):194-207. Disponible en: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35037181/

9. UN Environment [Internet]. 2021 [citado el 29 de febrero de 2024]. El mundo pone fin a la era de la gasolina con plomo y elimina una grave amenaza para la salud humana y ambiental. Disponible en: https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/el-mundo-pone-fin-la-era-de-la-gasolina-con-plomo-y

10. World Health Organization [Internet]. Lugar desconocido: WHO. Ten chemicals of public health concern; 2020. [citado el 31 de enero de 2024]. Disponible en: https://www.who.int/news-room/photo-story/detail/10-chemicals-of-public-health-concern

11. Crespo-Lopez ME, Augusto-Oliveira M, Lopes-Araújo A, Santos-Sacramento L, Yuki Takeda P, Macchi B de M, et al. Mercury: What can we learn from the Amazon? Environment International [Internet]. 2021 [citado el 29 de febrero de 2024]; 146:106223. Disponible en: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412020321784

12. IARC Monographs on the Identification of Carcinogenic Hazards to Humans [Internet]. Lugar desconocido: International Agency for Research on Cancer. List of Classifications [actualizado el 31 de enero de 2024; citado el 29 de febrero de 2024]. Disponible en: https://monographs.iarc.who.int/list-of-classifications/

13. Reglamento (UE) 2023/915 de la Comisión, de 25 de abril de 2023, relativo a los límites máximos de determinados contaminantes en los alimentos y por el que se deroga el Reglamento (CE) n.º 1881/2006 [Internet]. Luxemburgo: Comisión Europea, Dirección General de Salud y Seguridad Alimentaria; 2023 [citado el 07 de septiembre de 2025]. 02023R0915 — EN — 01.07.2025 — 005.001 — Pág. 1 - 81. Disponible en: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/915/2025-07-01

14. General Standard for Contaminants and Toxins in Food and Feed CXS 193-1995 [Internet]. Roma: Comisión del Codex Alimentarius; 1995 [modificado en 2025; citado el 12 de enero de 2026]. Disponible en: https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/codex-texts/list-standards/es/

15. Resolución de Dirección Ejecutiva N° 057-2016-SANIPES-DE. Indicadores Sanitarios y de Inocuidad para los Productos Pesqueros y Acuícolas para Mercado Nacional y de Exportación [Internet]. Lima: Organismo Nacional de Sanidad Pesquera; 2016 [citado el 29 de febrero de 2024]. Disponible en: https://www.gob.pe/institucion/sanipes/normas-legales/364044-057-2016-sanipes-de

16. Junejo SH, Baig J, Kazi T, Afridi H. Cadmium and Lead Hazardous Impact Assessment of Pond Fish Species. Biological Trace Element Research. [Internet]. 2019 [citado el 29 de febrero de 2024];191(2):502–11. Disponible en: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30612300/

17. Mwakalapa EB, Simukoko CK, Mmochi AJ, Mdegela RH, Berg V, Bjorge Müller MH, et al. Heavy metals in farmed and wild milkfish (Chanos chanos) and wild mullet (Mugil cephalus) along the coasts of Tanzania and associated health risk for humans and fish. Chemosphere [Internet]. 2019 [citado el 29 de febrero de 2024]; 224:176–86. Disponible en: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30822724/

18. Hacon SS, Oliveira-da-Costa M, Gama CS, Ferreira R, Basta PC, Schramm A, et al. Mercury Exposure through Fish Consumption in Traditional Communities in the Brazilian Northern Amazon. International Journal of Environmental Research and Public Health [Internet]. 2020 [citado el 29 de febrero de 2024];17(15):5269. Disponible en: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7432107/

19. Marín Vallejos GM. Contaminación de alimentos marinos por cadmio en Lima, 2015. Apuntes de Ciencia & Sociedad [Internet]. 2015 [citado el 29 de febrero de 2024]; 5(2):275-279 Disponible en: https://journals.continental.edu.pe/index.php/apuntes/article/view/335

20. Palacios Nonalaya LE, Paz Herrera YY. Determinación de los niveles de plomo en pescado fresco comercializado en los principales mercados de San Juan de Lurigancho, Lima. Mayo a junio del 2020. [Tesis para optar el título profesional de Químico Farmacéutico]. Lima: Universidad María Auxiliadora; 2020. 49p. Disponible en: https://repositorio.uma.edu.pe/handle/20.500.12970/368

21. Ninaja Sarmiento PN, Ortiz Faucheux R. Niveles de mercurio en los pescados de mayor consumo en los mercados de Tacna exceden límites permitidos por las entidades regulatorias. Revista Médica Basadrina [Internet]. 2020; 14(1):27-32. Disponible en: http://dx.doi.org/10.33326/26176068.2020.1.922

22. United States Environmental Protection Agency. Guidance for Assessing Chemical Contaminant Data for Use in Fish Advisories, Volume 1: Fish Sampling and Analysis, 3rd ed [Internet]. Washington: US EPA; 2000 [citado el 29 de febrero de 2024] Disponible en: https://www.epa.gov/sites/default/files/2018-11/documents/guidance-assess-chemical-contaminant-vol1-third-edition.pdf

23. United States Environmental Protection Agency. Guidance for Assessing Chemical Contaminant Data for Use in Fish Advisories, Volume 2: Risk Assessment and Fish Consumption Limits, 3rd ed [Internet]. Washington: US EPA; 2000 [citado el 29 de febrero de 2024] Disponible en:

https://www.epa.gov/sites/default/files/2018-11/documents/guidance-assess-chemical-contaminant-vol2-third-edition.pdf

24. Kaçar E. Heavy metal concentrations in various tissues of two fish species from Damsa Dam Lake (Türkiye) and associated health risk assessment. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology [Internet]. 2024 [citado el 29 de febrero de 2024]; 81:127339–9. Disponible en: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0946672X23002158#bib37

25. Guabloche A, Alvariño L, Acioly TM da S, Viana DC, Iannacone J. Assessment of Essential and Potentially Toxic Elements in Water and Sediment and the Tissues of Sciaena deliciosa (Tschudi, 1846) from the Coast of Callao Bay, Peru. Toxics [Internet]. 2024 [citado el 29 de febrero de 2024];12(1):68. Disponible en: https://www.mdpi.com/2305-6304/12/1/68

26. Resolución Ministerial N° 172-2016-PRODUCE. Plan de Implementación: Programa Nacional "A Comer Pescado" [Internet]. Lima: Ministerio de Producción; 2016 [citado el 29 de febrero de 2024]. Disponible en: https://www.acomerpescado.gob.pe/wp-content/uploads/2016/08/Plan-de-Implementaci%C3%B3n-de-ACP.pdf

27. Ministerio de Producción. Anuario Estadístico Pesquero y Acuícola 2024 [Internet]. Lima: PRODUCE; 2025 [citado el 12 de enero de 2026]. Disponible en: https://www.producempresarial.pe/anuario-estadistico-pesquero-y-acuicola-2024/

28. Del Carpio L, Vila B. El Mercado de Productos Pesqueros en la Región Metropolitana de Lima [Internet]. Montevideo: Infopesca; 2010 [citado el 29 de febrero de 2024]. Disponible en: https://www.infopesca.org/sites/default/files/complemento/publilibreacceso/286/informe-lima.pdf

29. PERÚ EP de SESAE. Perú: consumo per cápita de pescado debe alcanzar los 27.6 kg en el 2025 [Internet]. 2020 [citado el 29 de febrero de 2024]. Disponible en: https://andina.pe/agencia/noticia-peru-consumo-per-capita-pescado-debe-alcanzar-los-276-kg-el-2025-816191.aspx

30. INFOPES [Internet]. Lugar desconocido: INFOPES; 2022. Pesca marítima [citado el 29 de febrero de 2024]. Disponible en: https://tumi.lamolina.edu.pe/infopes/

31. Instituto Nacional de Estadística e Informática. Perú: Compendio Estadístico 2023-14. Pesca [Internet]. Lima: INEI, 2023 [citado el 29 de febrero de 2024]. Disponible en: https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Compendio2023/COMPENDIO2023.html

32. Patrones de consumo de productos hidrobiológicos en el Perú - Una aproximación con la Encuesta Nacional de Hogares [Internet]. Lima: Unidad de Gestión Estratégica y Evaluación; 2015 [citado el 29 de febrero de 2024]. Disponible en: https://www.acomerpescado.gob.pe/wp-content/uploads/2015/09/Patrones_Consumo_Productos_Hidrobiologicos_PNACP-2015.pdf

33. Norma Técnica Peruana NTP 700.002. Lineamientos y Procedimientos de muestreo del pescado y productos pesqueros para inspección 2da ed. [Internet]. Lima: INDECOPI; 2012 [citado el 29 de febrero de 2024]. Disponible en: https://www.sanipes.gob.pe/documentos/14_NTP700.0022012LineamientosyProcedimientosdeMuestreodePescadoyProductosPesquerosparaInspeccion.pdf

34. Arrogante O. Técnicas de muestreo y cálculo del tamaño muestral: Cómo y cuántos participantes debo seleccionar para mi investigación. Enfermería Intensiva [Internet]. 2022 [citado el 21 de julio de 2026];33:44-47. Disponible en: https://docta.ucm.es/entities/publication/a342ca3c-ff60-454d-8a6d-9a42fff3d516

35. Manterola C, Rivadeneira J. Estrategias de muestreo disponibles para aplicar en una población en estudio. Int J Morphol [Internet]. 2025 [citado el 21 de julio de 2026];43(6):2163-2175. Disponible en: https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0717-95022025000602163&script=sci_arttext

36. Resolución de Dirección Ejecutiva N° 038-2018-SANIPES-DE. Procedimiento: Ejecución del Control Oficial de Productos Hidrobiológicos Nacionales y de Exportación [Internet]. Lima: Organismo Nacional de Sanidad Pesquera; 2018 [citado el 29 de febrero de 2024]. Disponible en: https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/496252/c6c552e86275f82c6c2bf10f1268f43f.pdf?v=1580146325

37. Catálogo Digital de la Biodiversidad Acuática del Perú [Internet]. Lima: IMARPE; 2019 [citado el 29 de febrero de 2024]. Disponible en: https://biodiversidadacuatica.imarpe.gob.pe/

38. Instructivo: Toma, conservación y transporte de muestras para ensayos fisicoquímicos y microbiológicos [Internet]. Lima: Dirección del Servicio Nacional de Sanidad Pesquera; 2011 [citado el 29 de febrero de 2024]. Disponible en: https://www.sanipes.gob.pe/procedimientos/7_instructivo_toma_conservacionv1.compressed.pdf

39. Norma Chilena Oficial NCh 2667.Of2001. Productos hidrobiológicos - Determinación de mercurio - Método espectrofotométrico de absorción atómica por generación de vapor frío [Internet]. Chile: Instituto Nacional de Normalización; 2001 [citado el 29 de febrero de 2024] Disponible en: https://ecommerce.inn.cl/nch2667200144458

40. Norma Chilena Oficial NCh 2638.Of2001. Productos hidrobiológicos - Determinación de cadmio - Método espectrofotométrico de absorción atómica por

llama [Internet]. Chile: Instituto Nacional de Normalización; 2001 [citado el 29 de febrero de 2024] Disponible en: https://ecommerce.inn.cl/nch2638200144425

41. Norma Chilena Oficial NCh 2751.Of2003. Productos hidrobiológicos - Determinación de plomo mediante espectrofotometría de absorción atómica [Internet]. Chile: Instituto Nacional de Normalización; 2003 [citado el 29 de febrero de 2024] Disponible en: https://ecommerce.inn.cl/nch2751200344582

42. Norma Oficial Mexicana NOM-117-SSA1-1994, Bienes y servicios. Método de prueba para la determinación de cadmio, arsénico, plomo, estaño, cobre, fierro, zinc y mercurio en alimentos, agua potable y agua purificada por espectrometría de absorción atómica. [Internet]. México: Comité Consultivo Nacional de Normalización de Regulación y Fomento Sanitario; 1995 [citado el 29 de febrero de 2024] Disponible en: https://platiica.economia.gob.mx/normalizacion/nom-117-ssa1-1994/

43. Abdel-Kader HH, Mourad MH. Estimation of Cadmium in Muscles of Five Freshwater Fish Species from Manzalah Lake, and Possible Human Risk Assessment of Fish Consumption (Egypt). Biol Trace Elem Res [Internet]. 2023 [citado el 17 de octubre de 2025]; 201, 937–945. Disponible en https://doi.org/10.1007/s12011-022-03188-5

44. Talavera Gutierrez G. Evaluación de riesgo para la salud por Cadmio en pescado fresco comercializado en el Terminal pesquero de Villa María del Triunfo en agosto de 2025. [Tesis para optar el título profesional de Químico Farmacéutico]. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos; 2025. 83p. Disponible en: https://cybertesis.unmsm.edu.pe/item/3c309fc1-4bfa-4ead-9b75-10938c2ebd27

45. Fentie T, Kassa Y, Tibebe D, Mulugeta M, Legese M, Alemu AK, et al. Trace metal contamination and health risk assessment in fish from Lake Tana and Lake Hayqe, Ethiopia. J Agric Food Res [Internet]. 2025 [citado el 17 de octubre de 2025];20(101705):101705. Disponible en: http://dx.doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101705

46. Instituto Nacional de Estadística e Informática. Estimaciones y proyecciones de población departamental por años calendario y edad simple 1995-2030 [Internet]. Lima: INEI; 2020 [citado el 07 de mayo de 2025]. Boletín Especial N° 25. Disponible en: https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1722/

47. Resolución Ministerial N° 209-2001-PE. Aprueban relación de tallas mínimas de captura y tolerancia máxima de ejemplares juveniles de principales peces marinos e invertebrados [Internet]. Lima: Organismo Nacional de Sanidad Pesquera; 2001 [citado el 30 de noviembre de 2023]. Disponible en: https://www.sanipes.gob.pe/documentos/13_R.M.209-2001-PEApruebanRelaciondeTallasMinimasdeCapturayToleranciaMaximadeEjemplaresJuvenilesdePrincipalesPecesMarinoseInvertebrados.pdf

48. Resolución Ministerial N° 321-2019-PRODUCE. Establecer medidas temporales para la conservación y ordenamiento de la pesquería del recurso bonito (*Sarda chiliensis chiliensis*), así como la modificación de la talla mínima de captura y el porcentaje de tolerancia máxima por captura incidental de juveniles del recurso [Internet]. Lima: Ministerio de Producción; 2019 [citado el 29 de febrero de 2024]. Disponible en: https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/347906/Resoluci%C3%B3n_Ministerial_N__321-2019-PRODUCE20190726-11653-vkhh7k.pdf?v=1564164399

49. Barraza Martín HE. Análisis cuantitativo de metales pesados en pescados para exportación a la Unión Europea. [Tesina para optar el grado de Veterinario]. Tandil-Argentina: Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires; 2018. 72p. Disponible en: https://www.ridaa.unicen.edu.ar/bitstreams/7eee559a-2a41-4e7a-8d86-172b38b2dc28/download

50. Mahjoub M, Fadlaoui S, El Maadoudi M, Smiri Y. Mercury, Lead, and Cadmium in the Muscles of Five Fish Species from the Mechraâ-Hammadi Dam in Morocco and Health Risks for Their Consumers. Journal of Toxicology [Internet]. 2021 [citado el 31 de marzo de 2026]; 2021:1–10. Disponible en: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2021/8865869

51. Renieri EA, Safenkova IV, Alegakis AK, Slutskaya ES, Kokaraki V, Kentouri M, et al. Cadmium, lead and mercury in muscle tissue of gilthead seabream and seabass: Risk evaluation for consumers. Food and Chemical Toxicology [Internet]. 2019 [citado el 31 de marzo de 2026]; 124:439–49. Disponible en: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0278691518308937?casa_token=0m3nuXacQEkAAAAA:ew0Iv32Yhsvljpt5qB7xi_s26phIYEmoCMOzaiF16fcnNq7q_Lbogmkd5V_L73MXYrjkCYCqfmyw

52. Kim DY, Jeon H, Shin HS. Risk Assessment and Determination of Arsenic and Heavy Metals in Fishery Products in Korea. Foods [Internet]. 2023 [citado el 31 de marzo de 2026]; 12(20):3750. Disponible en: https://www.mdpi.com/2304-8158/12/20/3750

53. Llerena Ancori TM, Mendiola Ramos SP. Concentración de mercurio en productos hidrobiológicos de mayor consumo en la población escolar de las Instituciones Educativas de Mollendo, Arequipa. [Tesis para optar el título profesional de Licenciada en Nutrición Humana]. Arequipa - Lima: Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa; 2019. 110p. Disponible en: https://repositorio.unsa.edu.pe/items/30ef1a28-1f43-4875-a421-83658d931c43

54. Froese R, Pauly D. FishBase [Internet]. Suecia: World Wide Web; 2025. [citado el 31 de marzo de 2026]. Disponible en: https://www.fishbase.se/search.php

55. Medina M, Araya M. Alimentación del bonito *Sarda chiliensis* (Pisces: Scombridae) en el norte de Chile. Rev. biol. mar. oceanogr. [Internet]. 2023 [citado el 31 de marzo de 2026]; 58(1):55–60. Disponible en:

https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-19572023000100055

56. Perez Palomino PE, Rodriguez Guizado BJ. Principio de permisibilidad del Códex Alimentarius de arsénico y mercurio en "jurel" (Trachurus murphyi) y "bonito" (Sarda Chiliensis) comercializados en el terminal pesquero de Ventanilla, Lima - 2024. [Tesis para optar el título profesional de Químico Farmacéutico]. Lima - Perú: Universidad Norbert Wiener; 2025. 46p. Disponible en: https://repositorio.uwiener.edu.pe/entities/publication/76fe4df6-9993-4a27-b770-647210ee56cf

57. Orrego H, Mendo J. Hábitos alimenticios del jurel *trachurus murphyi* (Nichols) en la zona Nor-Central del mar peruano. Ecología Aplicada [Internet]. 2015 [citado el 31 de marzo de 2026]; 14(2):103-113. Disponible en: https://revistas.lamolina.edu.pe/index.php/eau/article/view/87

58. Huatarongo Gomez M, Santamaria Rosas M. Nivel de mercurio en el pescado comercializado en el mercado primero de setiembre y sus alrededores, distrito de San Juan de Lurigancho Marzo, Lima - 2022. [Tesis para optar el título profesional de Químico Farmacéutico]. Lima - Perú: Universidad Maria Auxiliadora; 2023. 42p. Disponible en: https://repositorio.uma.edu.pe/handle/20.500.12970/1367

59. Moiseenko TI, Gashkina NA. Distribution and bioaccumulation of heavy metals (Hg, Cd and Pb) in fish: influence of the aquatic environment and climate. Environ. Res. Lett. [Internet]. 2020 [citado el 31 de marzo de 2026]; 15(11):115013. Disponible en: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/abbf7c

60. Aissioui S, Poirier L, Ramdane Z. Assessment of levels of Pb, Cd and Hg in *Sardine pilchardus* (Walbaum, 1972) from the bay of Boumerdes (Algeria). Studia Universitatis "Vasile Goldis", Seria Stiintele Vietii [Internet]. 2021 [citado el 31 de marzo de 2026]; 31(4):172-7. Disponible en:

https://www.studiauniversitatis.ro/pdf/31-2021/31-4-2021/Art.%203%20ASSESSMENT%20OF%20LEVELS%20OF%20Pb,%20Cd%20AND%20Hg%20IN%20SARDINA%20PILCHARDUS%20(WALBAUM,%201792)%20FROM%20THE%20BAY%20OF%20BOUMERDES%20(ALGERIA).pdf

61. Oros A. Bioaccumulation and Trophic Transfer of Heavy Metals in Marine Fish: Ecological and Ecosystem-Level Impacts. J. Xenobiot [Internet]. 2025 [citado el 31 de marzo de 2026]; 15(2):59. Disponible en: https://www.mdpi.com/2039-4713/15/2/59

62. Masco Arriola ML, Callo Choquevilca Y, Loaiza Becerra A, Cantero Loaiza AN, Surco Fuentes J. Evaluación de la concentración de metales pesados (Pb, Hg, Cd) y As en pescados expendidos en los mercados de la ciudad del Cusco, Perú. Q'EUÑA [Internet]. 2022 [citado el 31 de marzo de 2026]; 12(2):29–34. Available from: https://www.researchgate.net/publication/372791046_Evaluacion_de_la_concentracion_de_metales_pesados_Pb_Hg_Cd_y_As_en_pescados_expendidos_en_los_mercados_de_la_ciudad_del_Cusco_Peru

63. Pancca Belizario JG, Riveros Soca M. Determinar la concentración por mercurio y plomo en pescados frescos comercializados en centros de abastos del distrito de Lurigancho-Chosica, Lima 2024-2025. [Tesis para optar el título profesional de Químico Farmacéutico]. Lima - Perú: Universidad Norbert Wiener; 2025. 77p. Disponible en: https://repositorio.uwiener.edu.pe/entities/publication/48149f83-5f57-4f79-8f9d-0ae8a6bf788e

64. Brousett-Minaya MA, Chu-Koo FW, Napuchi-Linares J, Zambrano Panduro CE, Reyes-Larico JA, Larrea-Valdivia AE, et al. Consumption of Native Fish Associated with a Potential Carcinogenic Risk for Indigenous Communities in the Peruvian Amazon. Toxics. J. Toxics [Internet]. 2024;12(8):552. Disponible en: 10.3390/toxics12080552

65. Del Águila Chávez J, Grandez Mori LR, Ruiz Angulo LM, Arévalo AA, Vásquez Chumbe J, Rojas Zamora RR. Assessment of Mercury Levels in Amazonian Fishes of the Nanay River, Loreto, Peru: Implications for Human Consumption. Sustainability. Sustainability [Internet]. 2026;18(2):552. Disponible en: 10.3390/su18020552

ANEXOS

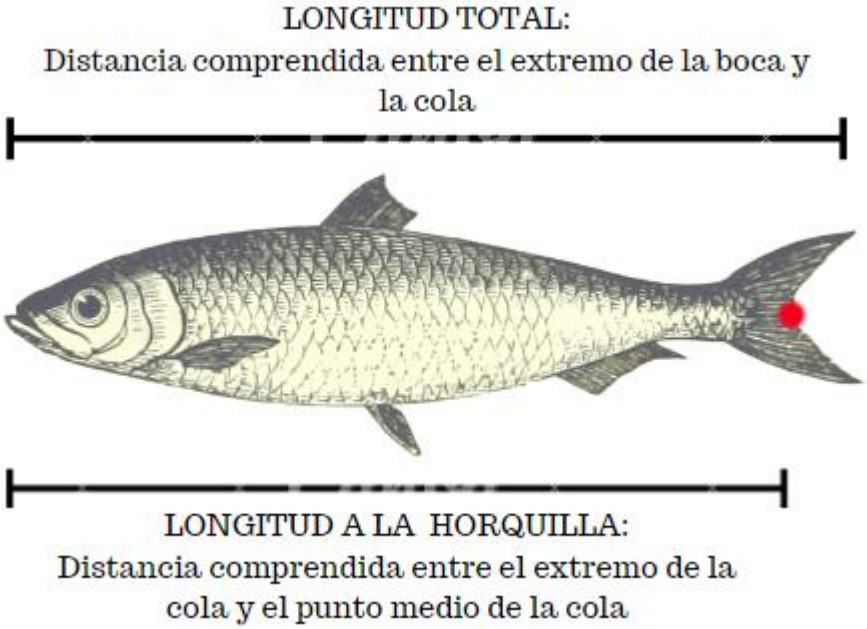
ANEXO 1

Tabla 10. Tallas mínimas de captura del jurel y bonito [47]

ESPECIES DE PESCADO		TALLA MÍNIMA DE CAPTURA	
Nombre común	**Nombre científico**	**Longitud (cm)**	**Tipo de Longitud***
Jurel [47]	*Trachurus murphyi*	31	Total
Bonito [48]	*Sarda chiliensis chiliensis*	46	Horquilla

*Indica la manera correcta de medir la longitud del pescado (ver la Figura 5).

Figura 5. Formas de medir la longitud del pescado



ANEXO 2

Tabla 11. Ficha de recolección de datos de jurel y bonito recolectados en el terminal de Ventanilla

Fecha: 10/09/2024

HORA	N° DE MUESTRA	ESPECIES DE PESCADO		LUGAR DE TOMA DE MUESTRA		CUMPLE CON LAS CARACTERÍSTICAS DE UN PESCADO		LONGITUD (cm)	PESO DEL MUESTREO (g)
		JUREL	BONITO	VENTANILLA	VILLA MARÍA DEL TRIUNFO	SI	NO		
4:30 am	1	-	✓	✓	-	✓	-	62	546 ± 4
4:35 am	2	-	✓	✓	-	✓	-	65	505 ± 4
4:40 am	3	-	✓	✓	-	✓	-	66	407 ± 4
4:45 am	4	-	✓	✓	-	✓	-	64	534 ± 4
4:50 am	5	-	✓	✓	-	✓	-	65	341 ± 4
4:55 am	6	✓	-	✓	-	✓	-	40	401 ± 4
4:59 am	7	✓	-	✓	-	✓	-	42	521 ± 4
5:04 am	8	✓	-	✓	-	✓	-	43	551 ± 4
5:09 am	9	✓	-	✓	-	✓	-	42	364 ± 4
5:14 am	10	✓	-	✓	-	✓	-	41	331 ± 4

Tabla 12. Ficha de recolección de datos de jurel y bonito recolectados en el terminal de Villa María del Triunfo

Fecha: 03/09/2024

HORA	N° DE MUESTRA	ESPECIES DE PESCADO		LUGAR DE TOMA DE MUESTRA		CUMPLE CON LAS CARACTERÍSTICAS DE UN PESCADO		LONGITUD (cm)	PESO DEL MUESTREO (g)
		JUREL	BONITO	VENTANILLA	VILLA MARIA DEL TRIUNFO	SI	NO		
3:24 am	1	-	✓	-	✓	✓	-	63	579 ± 9
3:29 am	2	-	✓	-	✓	✓	-	65	595 ± 9
3:34 am	3	-	✓	-	✓	✓	-	65	600 ± 9
3:39 am	4	-	✓	-	✓	✓	-	66	561 ± 9
3:44 am	5	-	✓	-	✓	✓	-	62	422 ± 9
3:49 am	6	✓	-	-	✓	✓	-	42	451 ± 9
3:54 am	7	✓	-	-	✓	✓	-	45	476 ± 9
3:59 am	8	✓	-	-	✓	✓	-	44	334 ± 9
4:04 am	9	✓	-	-	✓	✓	-	43	341 ± 9
4:09 am	10	✓	-	-	✓	✓	-	40	320 ± 9

ANEXO 3



Imagen 1. Piel uniforme y firme. Mucosidad transparente



c

Imagen 2. Ojos convexos, córnea transparente, pupila negra y brillante



Imagen 3. Piel iridiscente y brillante



Imagen 4. Branquias de color rojo, brillantes y moco ausente



Imagen 5. Rotulado de muestras recolectadas en los terminales de estudio



Imagen 6. Indumentaria utilizada por la persona que realizó el fileteado



Imagen 7. Área limpia y acondicionada para la preparación de las muestras



Imagen 8. Fileteado de las muestras recolectadas



Imagen 9. Limpieza y desinfección de los materiales reutilizables



Imagen 10. Temperatura de transporte de las muestras al laboratorio de análisis

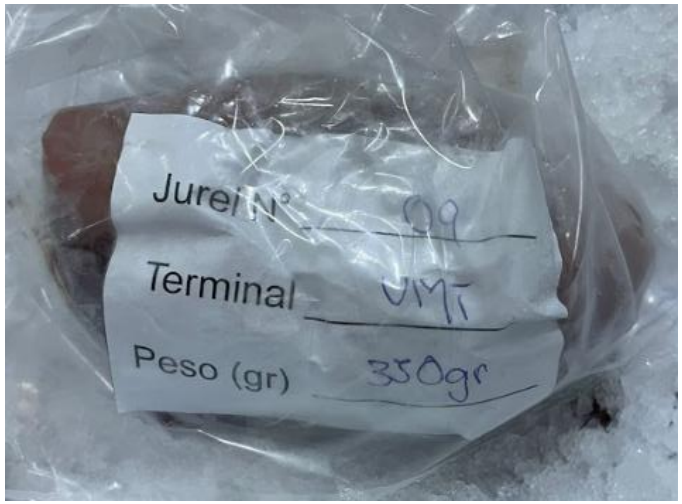


Imagen 11. Rotulado de la porción extraída de las muestras recolectadas en los terminales de estudio