Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Farmacia y Bioquímica
Escuela Profesional de Farmacia y Bioquímica

Determinación de plomo, níquel y mercurio total en huevos de gallina y evaluación de riesgo por efectos cancerígenos y no cancerígenos en tres empresas avícolas de Lima Metropolitana, 2025

TESIS

Para optar el Título Profesional de Químico Farmacéutico

AUTOR

Edwar ARIZABAL CASA

ASESOR

Dr. José Antonio LLAHUILLA QUEA

Lima, Perú

2026



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Arizabal E. Determinación de plomo, níquel y mercurio total en huevos de gallina y evaluación de riesgo por efectos cancerígenos y no cancerígenos en tres empresas avícolas de Lima Metropolitana, 2025 [Tesis de pregrado]. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Farmacia y Bioquímica, Escuela Profesional de Farmacia y Bioquímica; 2026.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Edwar Arizabal Casa
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	72468871
URL de ORCID	https://orcid.org/0009-0002-5034-957X
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Llahuilla Quea José Antonio
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	09780810
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-3926-8069
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Dr. José Alfonso Apesteguia Infantes
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	09359857
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Dra. Mónica Evencia Poma Vivas
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	28307350
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Mg. Sixto Antonio Gonzales Elera
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08063663
Datos de investigación	

Línea de investigación	B.2.3.2. Toxicología Alimentaria
Grupo de investigación	No aplica
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento

Ubicación geográfica de la investigación	Ubicación geográfica de la investigación
	• País: Perú
	• Departamento: Lima
	• Provincia: Lima
	• Distritos:
	  ○ Mercado de Santa Anita
	  ▪ Latitud: -12.038733
	  ▪ Longitud: -76.947406
	  ○ Mercado de Caquetá
	  ▪ Latitud: -12.033908
	  ▪ Longitud: -77.043983
	  ○ Mercado de Pro
	  ▪ Latitud: -11.938353
	  ▪ Longitud: -77.070600

Año o rango de años en que se realizó la investigación	2025-2026
URL de disciplinas OCDE	Toxicología: https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#3.01.07

Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Farmacia y Bioquímica
Decanato

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Los miembros del Jurado Examinador y Calificador de la Tesis titulada:

Determinación de plomo, níquel y mercurio total en huevos de gallina y evaluación de riesgo por efectos cancerígenos y no cancerígenos en tres empresas avícolas de Lima Metropolitana, 2025

Que presenta el Bachiller en Farmacia y Bioquímica:

EDWAR ARIZABAL CASA

Que reunidos en la fecha se llevó a cabo la **SUSTENTACIÓN** de la **TESIS**, y después de las respuestas satisfactorias a las preguntas y objeciones formuladas por el Jurado, ha obtenido la siguiente calificación final:

DIECIOCHO (18) - APROBADO CON MENCIÓN HONROSA

de conformidad con el Art. 14.° del Reglamento General de Grados y Títulos de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos para la obtención del Título Profesional de Químico Farmacéutico (a) de la Facultad de Farmacia y Bioquímica.

Lima, 22 de junio 2026.

Dr. José Alfonso Apesteguía Infantes
Presidente

Dra. Mónica Evencia Poma Vivas
Miembro

Mg. Sixto Antonio González Elera
Miembro

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
Universidad del Perú, Decana de América

Anexo 1

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, José Antonio Llahuilla Quea en mi condición de asesor acreditado mediante Dictamen N° 036-FFB-EPFB-2025 de la tesis, cuyo título es Determinación de plomo, níquel y mercurio total en huevos de gallina y evaluación de riesgo por efectos cancerígenos y no cancerígenos en tres empresas avícolas de Lima Metropolitana, 2025, presentado por el bachiller Edwar Arizabal Casa, para optar el título profesional de Químico Farmacéutico.

CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el 7% de similitud, nivel PERMITIDO para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional.**

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título profesional de Químico Farmacéutico.

Lima, 10 de junio del 2026

Firma del Asesor

Nombres y Apellidos del asesor: Dr. José Antonio Llahuilla Quea

DNI: 09780810

* Según corresponda: bachiller, magíster, doctor; título profesional o título de segunda especialidad

La vigencia del presente certificado corresponde a un período de noventa (90) días desde la fecha de su emisión; siempre que no haya observaciones en el texto durante el proceso de revisión por el jurado informante o surja alguna contingencia.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, que representa la culminación de mi etapa universitaria, a mis padres, Lucio Arizabal y Soledad Casa, a mi hermana Elizabeth Arizabal. Por su incansable apoyo y soporte durante este largo proceso. Este logro es fruto de su constante sacrificio. Gracias por creer en mi sueño de ser sanmarquino.

A mis abuelos que los recuerdo con mucho cariño, por sus valiosos consejos de vida que han guiado mi camino, hoy soy quien soy gracias a ustedes.

Esta tesis es el reflejo del sacrificio, dedicación de todos ustedes.

AGRADECIMIENTOS

A mis queridos padres Lucio Arizabal y Soledad Casa, a mi querida hermana Elizabeth por todo su cariño y constante apoyo a lo largo de todos estos años.

A mis abuelos Juan (†) y Matías por toda su enseñanza y consejos de vida, que me guían en diversos momentos.

A mi abuela Elizabeth por su cariño y apoyo emocional durante mi adolescencia y por sus enseñanzas en un hogar cálido.

A todas mis amistades. Al elenco de danza de mi facultad Hampy Kamayuq que formaron parte de mi vida universitaria, gracias por acompañarme en este camino que tantas veces se sintió largo, pero, fue un lugar donde volví a escuchar las melodías con las que crecí, esas que Arguedas decía: “Acarician el alma, como el viento de los cerros”. Ser parte del elenco no solo me permitió bailar y competir, me permitió sentir y abrazar mi identidad, sentir los yaravíes en el pecho, esa mezcla de alegría y nostalgia que solo entiende quien tuvo que dejar su tierra para buscar nuevas oportunidades. Aprendí que la danza no es solo movimiento, por el contrario, es una manera de resistir, revalorar y sostener lo que somos. Gracias por permitirme ser parte de una familia que cultiva cariño, empatía y cultura en cada ensayo y escenario.

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN 2
I.1. Planteamiento del problema: 2
I.2. Objetivos 3
I.2.1. Objetivo general 3
I.2.2. Objetivos específicos 3
I.3. Importancia y alcance de la investigación 4
I.4. Limitaciones de la investigación 5
II. REVISIÓN DE LA LITERATURA 5
II.1. Marco teórico: 5
II.2. Antecedentes del estudio 21
II.3. Bases teóricas 31
II.4. Glosario de términos 51
III.HIPÓTESIS Y VARIABLES 53
III.1. Hipótesis general 53
III.2. Hipótesis específicas 53
III.3. Variables 54
III.4. Operacionalización de variables 55
IV.MATERIALES Y MÉTODOS 57
V.RESULTADOS 65
V.1. Presentación y análisis de los resultados 65
V.DISCUSIÓN 74
VI.CONCLUSIONES 79
VIII.RECOMENDACIONES 81
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 82

X. ANEXOS.....97

ABREVIATURAS

ICP-OES: Espectroscopía de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente

ICP-MS: Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente

AAS: Espectrofotometría de Absorción Atómica

LDM: Límite de Detección

LCM: Límite de cuantificación

Pb: Plomo

Hg: Mercurio

Ni: Níquel

HQ: Cociente de Peligro

HI: Índice de Peligro

CR: Riesgo Cancerígeno

IDE: Ingesta Diaria Estimada

IDT / TDI: Ingesta Diaria Tolerable

RfD: Dosis de Referencia

THQ: Cociente de Riesgo Objetivo

MOE: Margen de Exposición

BMDL: Límite Inferior de la Dosis Benchmarking

ROS: especies reactivas de oxígeno

ILCR: Riesgo de Cáncer a lo Largo de la Vida

RESUMEN

El consumo de huevo en el Perú crece de forma sostenida por ser un alimento altamente completo en diversos nutrientes, esto vuelve necesario verificar su inocuidad frente a metales pesados por su persistencia y potencial impacto en salud pública. Para generar antecedentes científicos locales y orientar la vigilancia sanitaria, se determinó la presencia de plomo (Pb), níquel (Ni) y mercurio total (HgT) en yema y clara por separado en huevos de tres empresas avícolas de Lima Metropolitana (2025) y se evaluó el riesgo toxicológico asociado a su consumo en adultos. Se realizó un estudio no experimental, descriptivo y transversal: se recolectaron 3 kg de huevos en tres mercados, se separaron en yema y clara (18 determinaciones), se efectuó digestión ácida por vía húmeda (DigiBlock) y análisis por ICP-OES. Todas las determinaciones de Pb, Ni y HgT estuvieron por debajo del límite de cuantificación del método; usando dicho límite como concentración conservadora se estimaron IDE de 0.043 (Pb), 0.0086 (Ni) y 0.0086 µg/kg p.c./día (HgT). Los riesgos no cancerígenos fueron no apreciables (HQ-Ni = 0.0004; HQ-HgT = 0.086; HI = 0.09) y el riesgo cancerígeno por Ni resultó aceptable (ILCR = 7.8×10^{-6}). Para Pb, el MOE fue de 11.6 (infantil) y 34.8 (adultos), lo que sugiere un margen de seguridad reducido desde un enfoque de precaución. En conjunto, los huevos evaluados no representan un riesgo relevante para adultos, pero se recomienda mantener vigilancia periódica en zonas cercanas de producción de huevos de gallina donde las actividades industriales y agrícolas sean constantes o hayan aumentado gradualmente durante los últimos años.

Palabras clave: Huevos de gallina, metales pesados (Pb, Ni, HgT), inocuidad alimentaria, ICP-OES, evaluación de riesgo toxicológico (IDE, HQ, HI, ILCR, MOE), empresas avícolas.

ABSTRACT

The consumption of eggs in Peru has been growing steadily, as they are a highly nutritious food. This makes it necessary to verify their safety with respect to heavy metals due to their persistence and potential impact on public health. To generate local scientific background and guide sanitary surveillance, the presence of lead (Pb), nickel (Ni), and total mercury (HgT) was determined separately in yolk and egg white from eggs produced by three poultry companies in Metropolitan Lima (2025). In addition, the toxicological risk associated with adult consumption was evaluated. A non-experimental, descriptive, cross-sectional study was conducted: 3 kg of eggs were collected from three markets, separated into yolk and egg white (18 determinations), subjected to wet-acid digestion (DigiBlock), and analyzed by ICP-OES. All Pb, Ni, and HgT determinations were below the method's limit of quantification; using this limit as a conservative concentration, estimated EDIs were 0.043 (Pb), 0.0086 (Ni), and 0.0086 µg/kg b.w./day (HgT). Non-carcinogenic risks were negligible (HQ-Ni = 0.0004; HQ-HgT = 0.086; HI = 0.09), and the carcinogenic risk from Ni was within the acceptable range (ILCR = 7.8×10^{-6}). For Pb, the MOE was 11.6 (children) and 34.8 (adults), suggesting a reduced safety margin under a precautionary approach. Overall, the evaluated eggs do not pose a relevant risk to adults; however, periodic monitoring is recommended in production areas where industrial and agricultural activities are constant or have gradually increased in recent years.

Keywords: Chicken eggs, heavy metals (Pb, Ni, THg), food safety, ICP-OES, toxicological risk assessment (EDI, HQ, HI, ILCR, MOE), poultry farms.

I. INTRODUCCIÓN

I.1. Planteamiento del problema:

Con el avance de la tecnología en los últimos años se han logrado técnicas analíticas adecuadas junto a equipos especializados para identificar diversos compuestos tóxicos, metales pesados y fertilizantes que contribuyen a la contaminación ambiental, muchos de estos compuestos son un problema en salud pública porque persisten durante mucho tiempo y son altamente tóxicos. Los metales pesados se encuentran de forma natural en la corteza terrestre de la superficie y se liberan de forma natural en procesos de: erupciones volcánicas, actividades sísmicas, etc. (1). La actividad antropogénica causa la liberación de estos metales pesados al medio ambiente en grandes cantidades, como la industria química, petrolera, minera, entre otros, el procesamiento de minerales, la agricultura y la producción de energía contribuyen inmensamente en la contaminación por metales (2,3). La emisión de los metales pesados al medio ambiente facilita que estos puedan distribuirse por toda la superficie, encontrándose en el aire, suelo y agua (4). Las gallinas de granja y de campo están constantemente en contacto con su entorno, por tanto, la ingesta de metales pesados hacia estas aves es de vía oral y cutánea llegando a tener concentraciones altas de metales pesados en su sistema y el impacto de los metales pesados en la salud humana va desde casos de problemas de crecimiento y desarrollo, hasta problemas mucho más graves como el cáncer o problemas degenerativos severos (4,5).

Los países con alto grado de industrialización son los responsables de la emisión en grandes cantidades de metales pesados, como China, EE. UU., etc. (6, 7). El Perú es uno de los 5 países en américa del sur que consume grandes cantidades de huevo, según el Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MINAGRI) se registra que la última década la producción nacional de huevos presentó un crecimiento anual de 3.8% según cifras de la asociación de avicultores del Perú (APA) (8). Por otra parte, el Perú tiene diversas industrias como industrias: petrolera, minera, maderera, etc. La emisión de compuestos tóxicos de estas industrias, son elevadas; sumado a la ineficiente regulación, corrupción de funcionarios y falta de seguimiento

e incumplimiento de normativas. Por otro lado, la agricultura es una actividad ampliamente practicada en nuestro país, lo que conlleva al uso indiscriminado de plaguicidas y pesticidas en muchas ocasiones lo que conlleva a un mayor riesgo de tener alimentos contaminados con metales pesados.

Formulación del problema:

¿Las concentraciones de plomo y mercurio en huevos de gallina superan los límites máximos permisibles, y la concentración de níquel supera la ingesta diaria tolerable?

I.2. Objetivos

I.2.1. Objetivo general

Determinar las concentraciones de plomo (Pb), níquel (Ni) y mercurio total (Hg) en huevos de gallina comercializados por tres empresas avícolas de Lima Metropolitana durante el año 2025, y evaluar el riesgo para la salud humana por efectos cancerígenos y no cancerígenos asociado a su consumo.

I.2.2. Objetivos específicos

I. Cuantificar las concentraciones de plomo (Pb), níquel (Ni) y mercurio total (Hg) en muestras de huevos de gallina provenientes de tres empresas avícolas de Lima Metropolitana.

II. Comparar las concentraciones obtenidas con los límites máximos permisibles establecidos en normativas nacionales e internacionales vigentes para metales pesados en alimentos.

III. Estimar la ingesta diaria estimada (IDE) de plomo, níquel y mercurio total en la población consumidora de huevos, considerando datos de consumo promedio

IV. Evaluar el riesgo no cancerígeno mediante el cálculo del Cociente de Peligro (HQ) y del Índice de Peligro (HI) para Ni, HgT y para el Pb el margen de exposición (MOE).

V. Evaluar el riesgo cancerígeno asociado a la exposición crónica a níquel, mediante la estimación del Riesgo Cancerígeno Incremental (ILCR), siguiendo metodologías internacionales de evaluación de riesgo.

VI. Comparar los niveles de riesgo obtenidos entre las tres empresas avícolas evaluadas.

I.3. Importancia y alcance de la investigación

Este trabajo de investigación es de gran importancia debido a su enfoque en la identificación y cuantificación de metales pesados como el plomo (Pb), mercurio (Hg) y níquel (Ni) en huevos de gallina de consumo humano en Lima Metropolitana, lo cual representa una contribución significativa al conocimiento sobre los riesgos para la salud pública asociados con estos contaminantes en la dieta habitual. Dado que el Perú no cuenta con una normativa específica que regule los límites máximos permisibles de estos metales en alimentos, el estudio busca llenar un vacío importante en la literatura científica nacional, proporcionando datos clave que podrán guiar futuras investigaciones y el desarrollo de políticas públicas en seguridad alimentaria.

El alcance de la investigación se limita al análisis de huevos provenientes de tres empresas avícolas que abastecen mercados de Lima, utilizando técnicas avanzadas como la espectrometría de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES). Además de la cuantificación de metales, el estudio incorpora una evaluación de riesgo toxicológico por exposición alimentaria, considerando efectos cancerígenos y no cancerígenos en la población consumidora. Esta dimensión permite estimar el impacto potencial en la salud pública y aporta evidencia útil para la toma de decisiones regulatorias.

Los resultados obtenidos no solo contribuirán al fortalecimiento del marco normativo en seguridad alimentaria, sino que también podrán ser utilizados por entidades como DIGESA y el Ministerio de Salud para establecer límites permisibles y protocolos de vigilancia en productos de origen avícola. Aunque este estudio no aborda otras fuentes de contaminación ni se extiende a otros productos alimenticios,

sus hallazgos servirán como base para futuras investigaciones sobre la presencia de metales pesados en alimentos y para el diseño de estrategias de prevención y control en el país.

I.4. Limitaciones de la investigación

El presente estudio es de carácter individual y autofinanciado, esto limitó principalmente el tipo de equipo a usar, así como la recolección de más muestras para su análisis, esto puede afectar potencialmente la representatividad estadística. Además, el análisis se limitó a huevo de gallina provenientes de tres empresas avícolas de Lima metropolitana, lo que genera cierta limitación en la extrapolación de los resultados a nivel nacional, además se tiene que considerar los aspectos geográficos y condiciones ambientales en los que se encuentran dichas avícolas. Además, el enfoque del presente estudio es exclusivamente en la cuantificación de plomo (Pb), mercurio total (Hg) y níquel (Ni), sin considerar el resto de los metales pesados o pesticidas y se consideró únicamente un tipo de alimento, sin evaluar otras posibles fuentes de exposición alimentaria.

Estas limitaciones deben ser consideradas al interpretar los resultados, ya que condicionan el alcance y a generalización de los hallazgos el estudio.

II. REVISIÓN DE LA LITERATURA

II.1. Marco teórico:

II.1.1 El huevo como alimento:

II.1.1.1 Composición general y nutricional del huevo

El huevo es un alimento que ha estado presente en la dieta humana desde tiempos antiguos. Su inclusión frecuente en la alimentación se debe a su alto valor nutricional, su bajo costo relativo y su fácil preparación. Su perfil nutritivo lo convierte en un alimento esencial, especialmente en dietas con requerimientos proteicos elevados (8).

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) considera al huevo un alimento de referencia a nivel nutricional. Esto se debe a la variedad de macronutrientes que aporta, lo cual ayuda a prevenir enfermedades relacionadas con la deficiencia de proteínas, vitaminas y minerales esenciales (8,10).

El huevo está compuesto por tres partes principales: la cáscara, la clara y la yema, cada una con características particulares que aportan valor nutricional y funcional al alimento (8).

La cáscara: Está compuesta principalmente por carbonato de calcio, así como pequeñas cantidades de carbonato de magnesio y fosfato de calcio. Esta estructura presenta poros recubiertos por fibras y proteínas que actúan como una barrera natural frente al ingreso de microorganismos del entorno. Representa entre el 9 % y 12 % del peso total del huevo y tiene un grosor que varía entre 0.2 y 0.4 milímetros (10).

La clara del huevo: Es una solución acuosa, ligeramente viscosa y de tonalidad amarillenta. Está compuesta en su mayoría por agua y proteínas de alto valor biológico. Entre las proteínas más relevantes se encuentra la ovomucina, responsable de la consistencia característica de la clara. El pH de esta fracción varía entre 7.6 y 7.9, y su valor puede cambiar dependiendo de la temperatura a la que el huevo esté expuesto (10,11).

La yema: Es una emulsión grasa en agua, rica en nutrientes. Su extracto seco representa aproximadamente el 50 % de su composición, formado principalmente por proteínas y lípidos. Esto la convierte en una fuente concentrada de vitaminas liposolubles (A, D, E y K), así como de minerales como el hierro y el fósforo, esenciales para el funcionamiento del organismo (11).

II.1.1.2 Producción y consume de huevos en el Perú

En el Perú, según el MIDAGRI (Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego) en sus boletines informativos indica que la producción nacional de huevos de gallina fue de 510 962 toneladas en 2022 y descendió ligeramente a 503 080 t en 2023 (12). Sin embargo, en 2024 se recuperó de forma moderada a 508 400 t, gracias a mejoras en genética y manejo productivo en el sector (13). En cuanto al consumo per cápita, en 2023 alcanzó 14,9 kg (en promedio 238 huevos/año) en el promedio nacional (8,14). Mientras que en Lima Metropolitana fue de 19,7 kg (en promedio 315 huevos/año) en el mismo año (15). Durante el primer bimestre de 2025, el sector avícola dedicado a la producción de huevos registró un crecimiento interanual del 3,8 %, evidenciando una oferta creciente de huevos en el mercado interno (13).

Se estima que el país mantiene alrededor de 28,5 millones de gallinas ponedoras en producción (16). Las regiones costeras continúan liderando la producción, con 40.0 % en Ica, 27.0 % en Lima y 17.0 % en La Libertad, conforme a datos consolidados del 2025 (17). Este sector también enfrenta diversos desafíos por los altos costos de insumos, particularmente maíz amarillo duro y soya, que son importados al 100 % para la alimentación de las gallinas ponedoras, así como el incremento en las demandas de sostenibilidad, incluyendo bienestar animal y reducción del uso de antibióticos en los procesos intensivos (18).

II.1.2 Contaminación ambiental por metales pesados

II.1.2.1 Naturaleza y fuentes de exposición a metales pesados

Los metales pesados como plomo, mercurio, níquel, entre otros, son compuestos altamente tóxicos que pueden causar graves efectos en la salud humana y animal incluso a bajas concentraciones (19). Están presentes de forma natural en la corteza terrestre y pueden liberarse a

través de procesos naturales como erupciones volcánicas, actividades sísmicas o incendios forestales (19,20).

Las fuentes de origen antropogénico constituyen una de las principales vías de liberación de metales pesados al medio ambiente, las industrias químicas, petroleras, mineras, el procesamiento de minerales, prácticas agrícolas intensivas y producción de energía ha incrementado significativamente la liberación de estos contaminantes (20). Las actividades domésticas, como el uso de detergentes y pesticidas, también contribuyen a la contaminación por metales pesados (21).

Además, estudios recientes indican que fuentes urbanas como emisiones vehiculares, residuos industriales y tráfico vial también liberan metales pesados (mercurio, plomo y níquel) al suelo urbano, representando un riesgo creciente para ecosistemas y salud pública (22).

II.1.2.2 Metales pesados estudiados: Mercurio, Plomo y Níquel

En general todos los metales pesados son una amenaza para la salud de las personas, podemos mencionar algunos como el mercurio, el plomo, níquel, etc. Los cuales pueden estar presentes en alimentos de origen animal como los huevos. Su bioacumulación puede tener efectos tóxicos a largo plazo (5).

El mercurio es un metal tóxico con potencial carcinogénico que puede ingresar al organismo a través de alimentos contaminados. En gallinas de traspatio, su exposición ocurre por contacto con suelos y alimentos contaminados (5).

El plomo, por su parte, puede causar efectos tóxicos generando problemas neurológicos, con mayor incidencia en niños, este metal pesado también ha sido detectado en productos avícolas en diferentes partes del mundo (5,23). Su toxicidad afecta múltiples sistemas del

cuerpo humano, incluyendo el sistema hematológico, renal y nervioso central (23).

En cuanto al níquel, aunque es un oligoelemento esencial en pequeñas cantidades, su exposición crónica puede generar efectos adversos como dermatitis, trastornos respiratorios e incluso carcinogénesis (24). La exposición alimentaria al níquel representa un riesgo considerable para personas sensibilizadas a este metal, especialmente a través de productos como huevos y vegetales contaminados (25,26).

Existe una creciente preocupación por la presencia de contaminación por níquel en alimentos ha llevado a organismos como la Agencia Española de Seguridad Alimentaria y Nutrición (AESAN) a emitir informes sobre los riesgos asociados al consumo de alimentos contaminados, en especial para poblaciones vulnerables (27).

II.1.3 Impacto en la salud y regulación sanitaria

II.1.3.1 Riesgos toxicológicos de los metales pesados

Los metales pesados representan una amenaza para la salud humana y animal debido a su toxicidad, persistencia en el ambiente y su bioacumulación. Estos metales pueden interferir con funciones biológicas esenciales, inducir estrés oxidativo, dañar el ADN y alterar procesos enzimáticos y metabólicos fundamentales (25,28)En esta sección veremos el efecto toxicológico de tres de los metales pesados estudiados: plomo (Pb), mercurio (Hg) y níquel (Ni).

Plomo (Pb):

El plomo es un metal tóxico que puede afectar prácticamente todos los sistemas del cuerpo humano. Su toxicidad se debe en gran medida a su capacidad de inducir estreses oxidativos mediante la formación de radicales libres, alterando las membranas celulares, proteínas y ácidos

nucleicos. A niveles bajos, el plomo puede producir alteraciones cognitivas, trastornos del comportamiento y problemas de aprendizaje, especialmente en niños. A exposiciones más altas, puede provocar anemia, hipertensión, disfunción renal y daños neurológicos (27,28). La exposición al plomo puede darse a través del consumo de agua contaminada, alimentos o contacto con polvo o suelo contaminado (28).

Mercurio (Hg):

El mercurio puede encontrarse en formas inorgánicas y orgánicas, siendo el metilmercurio la forma más tóxica y bioacumulativa. El mercurio inorgánico se deposita principalmente en los riñones, mientras que el metilmercurio tiene una afinidad marcada por el sistema nervioso central, cruzando fácilmente la barrera hematoencefálica. Ambos tipos inducen estrés oxidativo, inactivación enzimática y apoptosis celular, además de tener una fuerte afinidad por los grupos sulfhidrilo, interfiriendo en rutas metabólicas esenciales (28,29). La exposición al mercurio ha sido relacionada con daño cerebral, alteraciones del desarrollo neurológico, enfermedades renales y trastornos inmunológicos.

Níquel (Ni):

El níquel es un oligoelemento esencial en pequeñas cantidades, pero en niveles elevados puede ser altamente tóxico. Su uso creciente en la industria tecnológica, particularmente en la fabricación de baterías para autos eléctricos, ha incrementado su liberación al medio ambiente (29). La exposición al níquel puede darse por ingestión de alimentos contaminados o inhalación de partículas suspendidas. La Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) ha reportado que exposiciones agudas elevadas al níquel pueden provocar reacciones dermatológicas como dermatitis y a largo plazo, podría tener efectos cancerígenos debido a su capacidad genotóxica (27). Estudios también han indicado que el níquel puede inducir estrés oxidativo, alterar el

metabolismo celular e inducir apoptosis, lo que se traduce en daño a órganos como el hígado y los pulmones (29,27).

Mecanismos toxicológicos comunes:

Muchos metales pesados comparten mecanismos de toxicidad similares. Inducen estrés oxidativo al generar especies reactivas de oxígeno (ROS), interfieren en la función mitocondrial y provocan la peroxidación lipídica. También pueden unirse a grupos funcionales de enzimas celulares, inactivándolas y alterando rutas metabólicas vitales. La exposición crónica a metales pesados ha sido asociada a enfermedades neurodegenerativas, inmunosupresión, cáncer y daño genético (27,28).

Evidencia en salud pública:

Estudios realizados en diferentes países de América Latina han evidenciado niveles de exposición peligrosos en productos de consumo humano. Por ejemplo, un estudio en Ecuador sobre leche cruda bovina mostró que el 98% de las muestras analizadas superaban los límites máximos permitidos de metales pesados, incluyendo plomo y arsénico, lo cual plantea un riesgo real para la salud pública (29).

Estas evidencias subrayan la necesidad de una vigilancia estricta y la implementación de políticas efectivas que reduzcan la exposición humana a estos contaminantes tóxicos.

II.1.3.2 Evaluación de riesgo toxicológico por exposición alimentaria

La evaluación de riesgo toxicológico por exposición alimentaria nos permite estimar los daños en la salud humana como consecuencia de la ingestión de sustancias químicas peligrosas presentes en los alimentos. Esto se logra gracias a la recopilación, análisis e interpretación de datos toxicológicos obtenidos en estudios con animales y humanos. A demás se desarrolla en condiciones de incertidumbre que se reducen

progresivamente a medida que se dispone de mayor evidencia científica (30).

Según la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) y la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR), esta evaluación consta de cuatro etapas fundamentales.

Identificación del peligro

La identificación del peligro es la primera etapa del proceso de evaluación de riesgo toxicológico, y consiste en detectar agentes químicos presentes en alimentos que pueden causar daños en la salud humana. Para ello, se registran y analizan datos provenientes de estudios toxicológicos (agudos y crónicos) y epidemiológicos (retrospectivos y prospectivos), junto con información sobre las propiedades físicas y químicas de la sustancia, su toxicidad, y las condiciones de exposición. Este análisis permite establecer si una sustancia es tóxica, bajo qué circunstancias lo es, y qué factores individuales (como edad, sexo, estilo de vida u ocupación) pueden influir en su impacto (31).

Evaluación de la dosis-respuesta

Esta etapa analiza la relación entre la cantidad de una sustancia tóxica ingerida y la intensidad del daño que produce. Se basa en estudios con animales de laboratorio y considera que las respuestas pueden variar entre especies, por lo que se aplican factores de seguridad para ajustar los resultados a la población humana. Su objetivo es determinar la dosis mínima capaz de generar efectos nocivos, como enfermedad o muerte en las personas (31).

Evaluación de la exposición

Esta etapa busca identificar a las poblaciones humanas potencialmente afectadas por una sustancia tóxica y estimar la cantidad, frecuencia, duración y vía de contacto con el contaminante. La exposición se define como el contacto entre el ser humano y una sustancia química durante un período determinado, y se expresa en unidades de concentración por tiempo. Para su análisis se consideran factores como las propiedades físicas y químicas del compuesto, sus fuentes, distribución ambiental, rutas de exposición (ingestión, inhalación, contacto dérmico), y características de la población expuesta (hábitos, ubicación, dieta y ocupación) (31).

Caracterización del riesgo

Es la etapa final de la evaluación de riesgo toxicológico, en la que se integran los datos obtenidos en las fases de identificación del peligro, evaluación de la dosis-respuesta y evaluación de la exposición. Su objetivo es estimar la probabilidad y severidad de los daños en la salud humana ante la exposición a una sustancia tóxica específica. Este análisis requiere evaluación especializada y considera factores como la toxicidad del compuesto, la cantidad y frecuencia de exposición, y las características de la población afectada (31).

Para evaluar los posibles riesgos a la salud humana derivados de la exposición a contaminantes, se emplean dos indicadores clave: el cociente de peligro (HQ), orientado a efectos no cancerígenos, y el riesgo cáncer (CR), enfocado en la estimación de riesgos cancerígenos.

El cociente de peligro (HQ) es un indicador que compara la exposición estimada de un receptor humano a un contaminante con un nivel de referencia considerado seguro (RfD para ingestión o RfC para inhalación). Se utiliza para evaluar el potencial de efectos adversos no cancerígenos. El HQ se calcula como una razón entre la dosis de

exposición y el valor de referencia, y no representa una probabilidad, sino una comparación directa. Según la EPA, un HQ ≤ 1 se considera generalmente protector para la salud (30).

Fórmulas según la vía de exposición:

- Ingestión: $HQ = \frac{ADD}{RfD}$
- Inhalación: $HQ = \frac{EC}{RfC}$

Donde:

- *ADD* es la dosis diaria promedio (mg/kg-día)
- *EC* es la concentración de exposición en aire (mg/m³)
- *RfD* y *RfC* son valores de referencia establecidos por la EPA

Para calcular ADD se utilizan parámetros como la Ingestión Diaria Estimada (IDE), el peso corporal del receptor, así como la tasa de consumo de agua, alimentos o suelo contaminado. Estos factores permiten estimar con precisión la cantidad de sustancia absorbida por el individuo.

El riesgo cáncer (CR) representa la probabilidad en la que una persona desarrolle cáncer a lo largo de su vida como resultado de la exposición a un contaminante cancerígeno. Se estima utilizando factores de riesgo específicos para cada vía de exposición: el factor de riesgo unitario (URF) para inhalación y el factor de potencia cancerígena (CSF) para ingestión. Por ejemplo, un riesgo de 1×10^{-5} indica una posibilidad de uno en cien mil de desarrollar cáncer por la exposición evaluada (32).

Fórmulas según la vía de exposición:

- Inhalación: $CR = EC \times URF$
- Ingestión: $CR = LADD \times CSF$

Donde:

- EC es la concentración de exposición en aire (µg/m³)
- LADD es la dosis diaria promedio durante toda la vida (mg/kg-día)
- URF y CSF son factores toxicológicos definidos por la EP

Para calcular LADD se consideran parámetros como la duración de la exposición, el peso corporal, la tasa de consumo, y la frecuencia de contacto con el contaminante. Estos elementos permiten estimar el riesgo acumulado a lo largo de la vida del receptor.

II.1.3.3 Normativa nacional e internacional en salud pública

En el Perú, la legislación en materia de seguridad alimentaria aún presenta vacíos respecto a los límites máximos permisibles (LMP) de metales pesados en alimentos de consumo humano, como los huevos. Ante la ausencia de lineamientos nacionales específicos, se recurre frecuentemente a normativas internacionales como referencia para la evaluación y el control de la inocuidad alimentaria.

Una de las normativas más utilizadas en América Latina como referente técnico es la Norma Oficial Mexicana NOM-159-SSA1-1996, que establece disposiciones sanitarias para el huevo, sus productos y derivados. Según esta norma, los límites máximos permisibles son de 0.1 mg/kg para plomo (Pb) y 0.03 mg/kg para mercurio (Hg) en productos derivados del huevo (33). Esta regulación, aunque data de 1996, continúa vigente y representa uno de los marcos más específicos y definidos para este tipo de alimentos en la región.

En el caso del níquel (Ni), no se cuenta con límites específicos establecidos para su concentración en huevos, ni en la normativa peruana ni en muchas regulaciones internacionales. Sin embargo, la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) estableció en 2015 una Ingesta Diaria Tolerable (IDT) de 2,8 µg/kg de peso corporal (34). Posteriormente, en una revisión de 2020, la EFSA actualizó este valor aplicando nuevas directrices metodológicas para el análisis de dosis-respuesta y propuso un nuevo límite de 13 µg/kg de peso corporal por día, el cual representa la cantidad máxima considerada segura para la exposición oral crónica al níquel en humanos adultos (74). Esta cifra

actualmente se usa como criterio de evaluación en estudios toxicológicos y de exposición alimentaria.

Además, en 2024, la Unión Europea estableció límites máximos permisibles de níquel en alimentos como cereales, legumbres y hortalizas, marcando un precedente regulatorio que podría extenderse próximamente a productos de origen animal como los huevos (35).

El Codex Alimentarius, referencia global en temas de inocuidad alimentaria, ha establecido parámetros orientativos para algunos metales pesados en alimentos, como el plomo (Pb) y el mercurio (Hg). Sin embargo, aún no define valores específicos para estos contaminantes en huevos, y tampoco ha establecido límites concretos para el níquel (Ni) en productos de origen avícola (36).

A nivel nacional, el Decreto Supremo N.º 004-2011-SA, que aprueba el Reglamento sobre Vigilancia y Control Sanitario de Alimentos y Bebidas, y la normativa técnica del Sistema HACCP e ISO 22000, exigen criterios generales para metales pesados en alimentos, pero no especifican valores límite para huevos (37,38).

En conjunto, estos elementos evidencian la necesidad urgente de fortalecer los marcos regulatorios nacionales, especialmente en países como el Perú, a fin de garantizar la protección de la salud pública frente a contaminantes químicos como los metales pesados y facilitar el control efectivo de la inocuidad alimentaria en productos como el huevo de gallina destinado al consumo humano.

Tabla N° 1: Referencias normativas sobre límites de metales pesados en huevos y alimentos relacionados

Entidad / Norma	Metal pesado	Tipo de valor	Límite / Valor de referencia	Aplicación / Observación
NOM-159-SSA1-1996 (México)[33]	Plomo (Pb)	Límite máximo permisible (LMP)	0.1 mg/kg	En productos derivados del huevo
	Mercurio (Hg)	Límite máximo permisible (LMP)	0.03 mg/kg	En productos derivados del huevo
EFSA (2020)[74]	Níquel (Ni)	Ingesta Diaria Tolerable (IDT)	13 µg/kg de peso corporal por día	Ingesta Diaria Tolerable (IDT) para exposición oral crónica
Unión Europea (2024)[35]	Níquel (Ni)	Límite Máximo Permisible (LMP)	Límites establecidos para cereales, legumbres y hortalizas	No aplica aún a productos de origen animal como huevos
Codex Alimentarius[36]	Plomo (Pb), Mercurio (Hg), Níquel (Ni)	Parámetros orientativos	No definido para huevos	Referencia global en inocuidad alimentaria
Normativa peruana (DS N.º 004-2011-SA, HACCP, ISO 22000)[37,38]	Varios	Criterios generales (Sin valores específicos)	No definido para huevos	Requiere fortalecimiento regulatorio

Fuente: Elaboración propia basada en las referencias (33,35-38,74)

II.1.4 Métodos de análisis de metales pesados en alimentos

II.4.1 Técnicas analíticas aplicadas en estudios similares

En estudios recientes donde la determinación de metales pesados como plomo (Pb), mercurio (Hg) y níquel (Ni) en alimentos de origen animal y vegetal, se han empleado diversas técnicas analíticas con alto grado de precisión, sensibilidad y reproducibilidad.

Una de las metodologías más utilizadas es la digestión ácida asistida por microondas, seguidas de análisis por ICP-OES o ICP-MS, destacan por su elevada sensibilidad y capacidad multielemental en matrices alimentarias complejas. El investigador Lee y sus colaboradores aplicaron digestión microondas con ácido nítrico y peróxido de hidrógeno, seguida de ICP-OES y ICP-MS, para determinar 16 elementos,

incluyendo Pb, Hg y Ni, en muestras de leche, logrando límites de detección menores a 1 µg/kg y recuperaciones superiores al 90 % (39).

Senila y colaboradores revisó la aplicación del equipo ICP-OES en matrices de alimentos y plantas, destacando la confiabilidad de la detección traza en contaminantes metálicos (40).

En un estudio reciente de Koch y colaboradores aplicaron el mismo equipo (ICP-OES) para analizar la presencia de metales pesados en grupos alimentarios ampliamente consumidos. Este enfoque permitió evaluar con precisión el riesgo toxicológico asociado a la ingesta de plomo (Pb), mercurio (Hg) y níquel (Ni) a través de la dieta regular (41).

Otro estudio llevado a cabo por Voica y sus colaboradores emplearon ICP-MS para evaluar el contenido de metales pesados en huevos de gallina, específicamente en la cáscara, la clara y la yema. El estudio identificó la presencia de plomo (Pb), mercurio (Hg), níquel (Ni) y otros elementos traza, permitiendo además una evaluación detallada del riesgo toxicológico asociado al consumo humano (42).

Adicionalmente las investigaciones realizadas, como la de Li y colaboradores en el año 2019 y Zhang y colaboradores en el 2020, destacan la combinación de estas técnicas con métodos de pretratamiento avanzados como la extracción asistida por ultrasonido o el uso de sorbetes para mejorar la selectividad y sensibilidad del análisis (43,44). Estas mejoras metodológicas han contribuido significativamente al monitoreo eficiente de contaminantes en alimentos.

II.4.2 Espectroscopia de emisión atómica con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-OES)

La espectroscopia de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) es una técnica analítica avanzada, versátil y altamente sensible, empleada ampliamente para la determinación

simultánea de elementos traza y mayores en matrices complejas como los alimentos de origen animal. Se caracteriza por su capacidad multielemental, alto grado de precisión, tiempos de análisis reducidos y límites de detección bajos, lo que la convierte en una herramienta poderosa para estudios de contaminación química en productos alimentarios (45). Su principio cientifico se basa en la excitación de los átomos mediante un plasma de argón, que emiten luz a longitudes de onda características; estas emisiones se capturan para cuantificar los elementos presentes en la muestra (46).

Fundamento científico

El principio de funcionamiento del ICP-OES se basa en la excitación de los átomos mediante un plasma de argón generado por inducción electromagnética. A temperaturas comprendidas entre 8000 y 10 000 K, los átomos y los iones de los elementos presentes en la muestra alcanzan estados excitados y al retornar a su estado basal, emiten fotones de longitudes de onda características. Estas emisiones ópticas son recolectadas mediante sistemas ópticos de alta resolución, como rejillas de difracción tipo Echelle, y detectadas por dispositivos de estado sólido como los CCD (Charge-Coupled Device) o CID (Charge Injection Device), que convierten la señal óptica en información cuantificable (45).

Cada elemento presenta una firma espectral única, lo que permite su identificación y cuantificación simultánea con elevada sensibilidad, incluso en niveles traza (45).

Etapas del proceso analítico

El análisis típico mediante ICP-OES implica varias etapas clave. La preparación de la muestra consiste generalmente en una digestión ácida asistida por microondas, utilizando mezclas de ácido nítrico (HNO_3) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2), con el objetivo de descomponer

completamente la matriz orgánica. Posteriormente, la muestra digerida es nebulizada mediante dispositivos concéntricos o ultrasónicos, los cuales generan aerosoles finos que son transportados al plasma de argón. Una vez en el plasma, los átomos se excitan y emiten luz característica que es separada en función de su longitud de onda mediante monocromadores o polícromadores. Los espectrómetros configurados con óptica Echelle y detectores en arreglos bidimensionales permiten la detección simultánea de hasta 70 elementos con alta precisión, mínima interferencia química y gran robustez, incluso en muestras con alto contenido de sólidos disueltos (45).

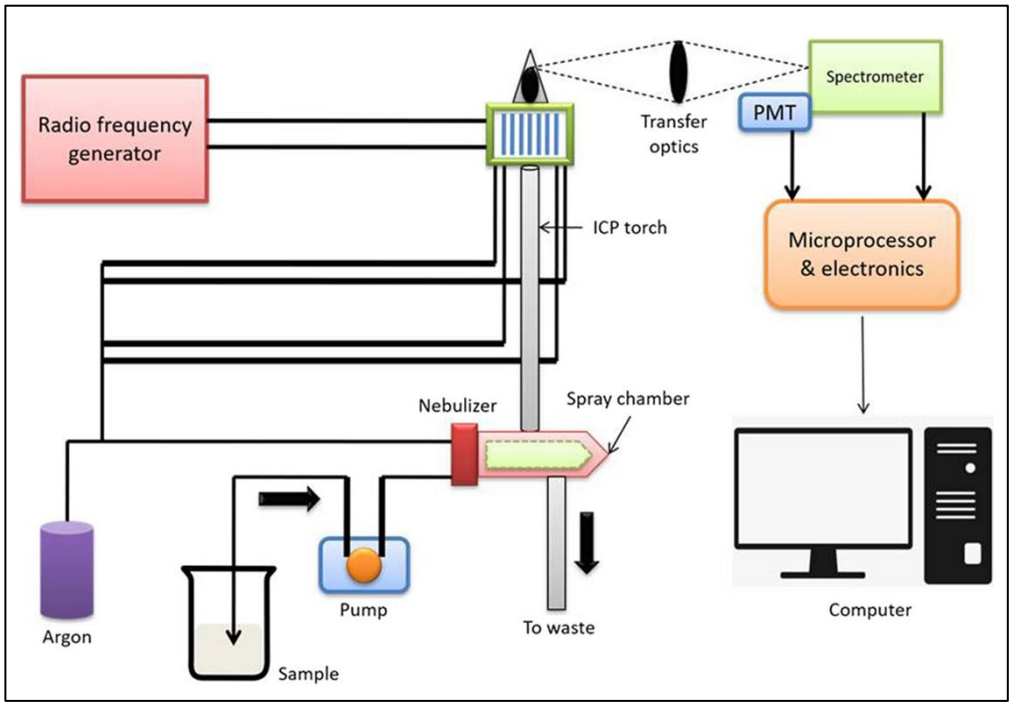


Imagen 1: Esquema general del sistema ICP-OES y flujo de análisis de muestra (45)

Aplicación específica en el análisis de metales pesados en huevos de gallina

En el estudio de Voica y colaboradores, se aplicó ICP-OES junto con ICP-MS para la determinación simultánea de 24 elementos, incluidos plomo (Pb), mercurio (Hg) y níquel (Ni), en distintas fracciones del huevo (yema, clara y cáscara). Los resultados mostraron que la cáscara presentó la mayor acumulación de metales pesados, seguida de la yema, lo que permitió una evaluación precisa del riesgo toxicológico asociado al consumo de huevos contaminados (42). Por su parte, Biswas y colaboradores emplearon ICP-OES para analizar huevos de distintas variedades comerciales, observando diferencias significativas en los niveles de metales pesados como Pb, Hg y Ni según el tipo de huevo. Este análisis fue clave para estimar la exposición dietética de la población a estos contaminantes (47). Asimismo, Kirov y colaboradores realizaron un estudio comparativo de huevos provenientes de gallinas de producción industrial, traspatio y libre pastoreo, encontrando mayores concentraciones de metales en los huevos de origen industrial. Estos resultados demostraron la utilidad del ICP-OES para evaluar diferencias de exposición según el sistema de producción (48).

II.2. Antecedentes del estudio

II.2.1 Nacionales

Santisteban Rojas, en su estudio titulado “Comparación de los niveles de arsénico, cadmio, mercurio y plomo en piensos y huevos de codorniz (Coturnix coturnix japonica)”, realizado en Lima, Perú en 2021, tuvo como objetivo comparar los niveles de dichos metales en huevos y piensos de codorniz provenientes de empresas formales e informales, frente a la normativa de la Unión Europea. Se utilizó un muestreo aleatorio y análisis mediante espectrofotometría de absorción atómica (AA) e ICP-OES. Los resultados mostraron que los piensos contienen altas concentraciones de metales,

especialmente plomo, siendo esta una fuente de contaminación de los huevos. Las yemas presentaron mayores concentraciones que las claras, y los huevos de supermercados superaron los límites permitidos en la mayoría de casos. Se concluye que el consumo habitual podría representar un riesgo para la salud, especialmente en grupos vulnerables (49).

Por otro lado, González E. En su estudio titulado “Determinación cuantitativa de plomo, cadmio y mercurio en huevos de gallina de venta en mercados populares del cono norte de Lima – Perú”, elaborado en Lima en el año 2015, tuvo como objetivo determinar las concentraciones de plomo, cadmio y mercurio en huevos de gallina y compararlas con los límites establecidos por la NOM-159-SSA1-1996. Usaron 40 muestras recolectadas aleatoriamente, mineralizadas con ácidos y analizadas por espectrofotometría de absorción atómica.Los resultados mostraron que el plomo (0,6208 ppm) y el mercurio (0,4528 ppm) superaron los límites permitidos, mientras que el cadmio (0,0108 ppm) se mantuvo por debajo del máximo establecido. Se concluyó que estos huevos representan un riesgo para la salud pública y se recomienda implementar regulaciones nacionales sobre metales pesados en alimentos (50).

Por otro lado, Proleón V. y Siccha M., en su estudio titulado "Riesgos por contaminación con metales pesados en alimentos en Perú: metaanálisis", elaborado en Lima en el año 2021, nos indican que su objetivo fue establecer el riesgo por consumo de alimentos contaminados con metales pesados (plomo, mercurio, cadmio y arsénico) mediante un metaanálisis de tesis universitarias. Utilizaron una metodología crítica y sistemática basada en las directrices de la Colaboración para la Evidencia Medioambiental (CEE), evaluando calidad y sesgos en los estudios incluidos. Los resultados mostraron que, si bien solo seis estudios cumplían criterios mínimos de calidad, evidenciaron altos niveles de mercurio, arsénico y cadmio en alimentos, así como una elevada heterogeneidad metodológica. El estudio concluye que, aunque los datos permiten advertir el riesgo toxicológico al que está expuesta la población peruana por el consumo de estos alimentos, se requiere mejorar la calidad

metodológica de las investigaciones para tomar decisiones basadas en evidencia (51).

Por otro lado, Delgado A., en su estudio titulado “Determinación de la concentración de mercurio en huevos (clara y yema) de gallina (*Gallus gallus domesticus*) expendidos en supermercados del Distrito de Villa El Salvador en Lima”, elaborado en Villa El Salvador, Lima en el año 2021, nos indican que su objetivo fue determinar la concentración de mercurio en clara, yema y huevo completo, recolectando 40 huevos de diferentes supermercados (Tottus y Plaza Vea) mediante muestreo aleatorio. Usaron espectrometría de absorción atómica con generación de hidruros, analizando las muestras en un laboratorio privado y comparando los resultados con la Norma Oficial Mexicana NOM‑159‑SSA1‑1996. Los resultados que obtuvo son que la concentración promedio de Hg fue 0,02 ppm en clara, 0,0395 ppm en yema y 0,0263 ppm en huevo entero, todos por debajo del límite máximo permitido de 0,03 ppm. Se concluye que los huevos analizados eran aptos para el consumo humano, sin representar riesgo de mercurio (52).

II.2.2 Internacionales

Kabeer, Hameed y Kashif, et al., en su estudio titulado “Contaminación de metales pesados en huevos de aves de corral: un estudio que presenta la relación entre los metales pesados en el consumo de alimento y los huevos”, elaborado en Lahore, Pakistán, en el año 2020, nos indican que su objetivo fue evaluar la concentración de metales pesados (Ni, Pb, Zn, Mn, Cr, Cu y Se) en huevos de gallinas ponedoras de granjas avícolas y de traspatio, así como establecer su correlación con la contaminación en el alimento y el agua suministrados. Como material y métodos, usaron un diseño experimental basado en la recolección de 90 muestras de huevo y 12 muestras de alimento y agua (seis de cada tipo), analizadas mediante espectrofotometría de absorción atómica tras digestión por método diácido. Los resultados mostraron que las concentraciones de Pb, Cr y Se superaron los límites permisibles en

yema, clara, alimento y agua, particularmente en huevos de granjas avícolas. También se halló que la concentración de metales pesados fue mayor en huevos de granja que en huevos de traspatio, atribuido a la contaminación del alimento. Este estudio concluye que existe una relación positiva entre la contaminación del alimento y la presencia de metales pesados en huevos, destacando la necesidad de monitorear los insumos para reducir el riesgo en la cadena alimentaria (53).

Por otro lado, Hoseini et al., en su estudio titulado "Residuos de metales pesados (As, Cd, Hg y Pb) en huevos de gallina tras aplicar diferentes métodos de cocción", elaborado en Irán, en el año 2023, nos indican que su objetivo fue determinar los niveles de residuos de metales pesados (As, Cd, Hg y Pb) en huevos de gallina luego de aplicar distintos métodos de cocción. Usando una metodología experimental, seleccionaron 44 huevos de 22 marcas de supermercados, los cuales fueron clasificados en cuatro grupos: crudos, hervidos con cáscara, hervidos sin cáscara y fritos en seco. Se evaluaron mediante espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS). Los resultados obtenidos mostraron que los residuos promedio en muestras crudas fueron de 0,307 µg/kg (As), 1,654 µg/kg (Cd), 0,121 µg/kg (Hg) y 6,5 µg/kg (Pb). Se evidenció que el método de fritura en seco logró una reducción significativa de arsénico y cadmio en comparación con los métodos de hervido ($p < 0,05$), mientras que el mercurio y el plomo no presentaron diferencias significativas según el tipo de cocción. Se propusieron dos hipótesis para explicar esta reducción: la permeabilidad de la cáscara del huevo y la pérdida de agua y compuestos volátiles durante el calentamiento. Finalmente el estudio concluye que todos los niveles de metales pesados analizados se encontraron dentro de los límites aceptables establecidos, y que la fritura en seco es una técnica eficaz para reducir As y Cd en huevos de gallina (53).

Aliu H, Dizman S, Sinani A, et al., en su estudio titulado “Estudio comparativo de la concentración de metales pesados en huevos de granjas avícolas industriales y de gallinas camperas”, elaborado en Kosovo en el año 2021 ,

tenían por objetivo comparar los niveles de metales pesados entre ambos tipos de producción de huevos en la región. En cuanto a los materiales y métodos, analizaron 22 muestras de huevos (54,5 % de granjas industriales y 45,5 % de gallinas camperas) entre octubre y diciembre de 2018. Las muestras fueron analizadas mediante espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) para detectar elementos como Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Hg y Pb. Se empleó análisis estadístico con pruebas t y LSD, considerando significancia en $p < 0,005$. Respecto a los resultados, se halló que los huevos de gallinas camperas presentaron mayores niveles de elementos esenciales (Mn, Fe y Zn), mientras que los de granjas avícolas industriales mostraron concentraciones más altas de Cr, Cd, As y Pb, destacando el Pb con 57,4 µg/kg frente a 18,2 µg/kg en gallinas camperas. Sin embargo, la ingesta diaria estimada de estos metales a través del consumo de huevos no superó los límites máximos establecidos por la FAO/OMS. En conclusión, el estudio señala que, aunque el consumo de huevos en Kosovo no representa un riesgo toxicológico directo, se recomienda una vigilancia continua sobre la calidad del alimento para aves, especialmente en regiones industrializadas (55).

Samad A., Roy D., Hasan M., et al. En su estudio “Ingesta de metales tóxicos a través del consumo de huevos en la dieta y evaluación de su posible riesgo para la salud de los habitantes de la capital, Dhaka, Bangladesh”. 2023, Bangladesh. Tenían por objetivo evaluar la ingesta de metales tóxicos a través del consumo de huevos y determinar el posible riesgo para la salud de los habitantes de la ciudad de Daca. Los materiales y métodos del estudio se basó en recolectar huevos de ocho mercados mayoristas y se analizaron las concentraciones de metales pesados (Cr, Cu, Pb, Mn, Fe, Zn, Co, Cd y Ni) mediante ICP-OES. Se calcularon la ingesta diaria estimada (IDE), el cociente de riesgo objetivo (THQ), el índice de riesgo (HI) y el riesgo cancerígeno (CR), comparando los resultados con valores de referencia internacionales (JECFA y USEPA). Los resultados indicaron que los huevos de gallinas de granja presentaron mayores niveles de Cr, Cu, Pb, Mn, Fe y Zn que los de gallinas camperas, mientras que estos

últimos mostraron mayores niveles de Ni y Co. En niños, la IDE de Pb superó hasta 80 veces el límite tolerable, indicando un riesgo significativo. Sin embargo, los valores de THQ y HI fueron menores a 1, y el riesgo cancerígeno fue considerado tolerable. La conclusión del estudio indica que el consumo de huevos contaminados con metales pesados representa un riesgo potencial para la salud humana, especialmente en niños y se recomienda monitoreo continuo y regulación estricta en la producción de huevos para consumo humano (56).

Khan S, Shi X, Cai R, et al. En su estudio “Evaluación del rendimiento, calidad del huevo, análisis sérico, acumulación de metales pesados y metales traza esenciales en huevos y tejidos de gallinas ponedoras alimentadas con harina de larvas de mosca soldado negra (*Hermetia illucens*)” elaborado en china en el año 2024, tenían por objetivo: Evaluar los efectos del reemplazo parcial de harina de soya por harina de larvas de mosca soldado negra (BSF) en el rendimiento productivo, calidad del huevo, análisis sérico, y la acumulación de metales pesados y minerales esenciales en huevos, carne, hígado y excretas de gallinas ponedoras. Los materiales y métodos se basaron en usar 1008 gallinas Lohmann distribuidas en 4 grupos dietéticos (control y tres niveles de inclusión de BSF: 7%, 14% y 21%) durante 8 semanas. Se recolectaron muestras de sangre, tejidos y huevos. Los metales trazan y pesados fueron analizados mediante espectroscopia de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES). Los resultados indicaron que la inclusión de BSF mejoró la tasa de postura y la resistencia de la cáscara sin afectar parámetros séricos ni calidad interna del huevo. Se observó baja transferencia de Cd, Pb, As y Cr hacia los huevos y carne. Finalmente, este estudio concluye que la harina de larvas de BSF puede reemplazar a la soya sin comprometer la calidad del huevo o carne, aunque requiere monitoreo de metales pesados. Es un insumo seguro con potencial para producción avícola sostenible (57).

Atamaleki A, Sadanib M, Raoofi A, et al., en su estudio titulado “Concentración de elementos potencialmente tóxicos (EPT) en huevos: una revisión sistemática global, un metanálisis y una evaluación probabilística del riesgo para la salud”,

elaborado en Brasil en 2020, tuvo por objetivo evaluar la concentración de EPT en huevos de gallina mediante revisión sistemática y metaanálisis, además de estimar riesgos no carcinogénicos y carcinogénicos asociados al consumo humano. Los materiales y métodos: Se recopilaron 38 artículos publicados entre 1983 y 2019 en PubMed, Scopus, Web of Science y Embase, incluyendo estudios con datos claros de EPT en huevos. Se aplicó metaanálisis con modelo de efectos aleatorios y simulaciones de Monte Carlo para calcular la ingesta diaria estimada (EDI), el cociente de riesgo (THQ) y el riesgo carcinogénico (CR). Los resultados indican que los huevos de gallina mostraron el siguiente orden promedio de concentración (mg/kg): Fe (44.11) > Zn (25.45) > Cu (2.10) > Pb (0.797) > Ni (0.781) > Se (0.633) > Cr (0.368) > As (0.148) > Cd (0.028) > Hg (0.0027), con mayor presencia en la yema. No se hallaron diferencias entre huevos comerciales y locales. En algunos casos, Pb y Cd superaron los límites de la OMS. El estudio concluye: El estudio indica que hay riesgo potencial para la salud, especialmente en niños, por exposición crónica a Pb, Cd y As, recomendando mayor vigilancia en la cadena alimentaria (58).

Si bien este estudio se enfoca únicamente en los elementos arsénico (As) y mercurio (Hg), se considera un antecedente relevante debido a que uno de sus objetivos, el mercurio, forma parte de los metales pesados evaluados en la presente investigación. Además, presenta evidencia actualizada sobre la presencia de metales tóxicos en huevos de gallina destinados al consumo humano y refuerza la necesidad de monitorear continuamente estos contaminantes, lo cual respalda la relevancia del enfoque del presente estudio sobre otros metales como el plomo (Pb) y el níquel (Ni).

Abedi A, Hoseini H, Mohammadi-Nasrabadi F, et al. En su estudio titulado “Evaluación de los riesgos para la salud del consumidor derivados del arsénico y el mercurio en los huevos de gallina mediante simulaciones de Monte Carlo” elaborado en Irán en el año 2023, tuvo por objetivo: Evaluar la concentración de arsénico (As) y mercurio (Hg) en huevos de gallina comerciales en Teherán (Irán), así como estimar los riesgos carcinogénicos y no carcinogénicos

asociados a su consumo mediante simulaciones de Monte Carlo. Con respecto a los materiales y métodos: Se recolectaron 84 huevos frescos de 21 marcas principales durante el invierno y verano de 2022 en cinco distritos de Teherán. Se prepararon y analizaron mediante digestión ácida asistida por calor y espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS). Se aplicaron los modelos de riesgo de la EPA de EE.UU. para estimar la ingesta diaria estimada (EDI), el cociente de riesgo (THQ), la ingesta mensual estimada (EMI) y el riesgo de cáncer (ILCR), con apoyo del software Oracle Crystal Ball. Los valores de THQ para As y Hg indicaron bajo riesgo no carcinogénico. Sin embargo, el ILCR de As fue superior a lo esperado, superando el umbral de riesgo aceptable, sugiriendo un riesgo carcinogénico por exposición acumulativa. Se concluye que aunque los niveles de As y Hg han disminuido respecto a estudios previos en Irán, por lo que se recomienda monitoreo continuo en huevos y otros alimentos, evitar granjas avícolas en zonas contaminadas (59).

Chowdhury M, Abir M, Meherun N, et al. En su estudio titulado “Evaluación de metales pesados tóxicos y oligoelementos en alimentos para aves de corral, pollos de consumo y huevos en Bangladesh”, elaborado en 2021, tuvo por objetivo evaluar los niveles de Pb, Cd, Cr, Mn, Fe, Cu y Zn en alimentos para aves, tejidos de pollos, huevos y cama avícola en granjas industriales de Bangladesh, y compararlos con límites de seguridad establecidos. Los materiales y métodos: Se recolectaron muestras de alimento, tejido (cerebro, piel, hígado, carne, hueso), huevos y cama de cuatro granjas. Las muestras fueron preparadas por digestión ácida y analizadas mediante espectrofotometría de absorción atómica (AAS). Los datos se analizaron estadísticamente con SPSS v16. Los resultados indican que la mayoría de los alimentos presentó niveles aceptables; sin embargo, en dos industrias el Pb superó los límites. En tejidos, especialmente cerebrales, se hallaron concentraciones elevadas de Cd, Cr y Pb que excedieron los valores guía para consumo humano. En huevos, Mn, Fe, Cd, Cr y Pb superaron los límites

permisibles. La acumulación fue mayor en tejidos y huevos que en los alimentos, lo que sugiere fuentes externas de contaminación. El estudio concluye que se evidencia una alta bioacumulación de metales pesados tóxicos en productos avícolas, con riesgo potencial para la salud pública. Se recomienda un monitoreo continuo y control de fuentes ambientales contaminantes (60).

Kirov PM, Karadjov M, Hristov HK, et al. realizaron un estudio titulado "Comparative study of metal concentration determination in albumen of hen eggs originating from industrial poultry farms, backyard and free-range hens using ICP-OES technique", hecho en Bulgaria en 2023, con el objetivo de comparar la concentración de metales esenciales y tóxicos, incluyendo Cr, Cu, Fe, Mn, Zn, Al, Cd, Ni y Pb, en la clara de huevos de gallina según el sistema de crianza: jaulas, suelo, libre pastoreo, orgánico y traspatio. Materiales y métodos: Se recolectaron 50 huevos en cinco zonas de Rumanía, 10 por tipo de sistema de crianza. Se separó la clara y se sometió a digestión ácida, y los niveles de metales se determinaron mediante espectrometría de emisión óptica por plasma acoplado inductivamente (ICP-OES). El análisis estadístico se realizó con ANOVA y prueba de Tukey ($p<0.05$). Resultados: Los huevos de gallinas criadas en sistemas ecológicos (traspatio, orgánico y libre pastoreo) mostraron mayores concentraciones de Cr, Cu, Fe y Zn, mientras que el Cd fue más elevado en sistemas intensivos. El Ni estuvo presente en todos los grupos con concentraciones bajas y sin diferencias significativas entre sistemas. El Pb fue indetectable en la mayoría, excepto en huevos de gallinas en jaulas y orgánicas, pero en niveles muy bajos. Se concluye que los huevos ecológicos aportan mayores niveles de minerales esenciales sin exceder límites tóxicos. El estudio sugiere que la calidad mineral de los huevos está influida por el sistema de crianza, y no se identificó un riesgo sanitario asociado al contenido de Ni en los huevos analizados (48).

Vehab A, Huremović J, Žero S, et al., en su estudio titulado "Essential and toxic metals content in hen eggs at different geographic area in Bosnia and

Herzegovina", realizado en 2019 en Bosnia y Herzegovina, tuvo como objetivo determinar la concentración de metales esenciales (Ca, Mg, Zn, Fe, Mn, Cr) y tóxicos (Pb y Cd) en albúmina y yema de huevos de gallina provenientes de crianza doméstica y granjas avícolas industriales. Los materiales y métodos se basaron en recolectaron 100 huevos de cinco zonas geográficas. Las muestras se agruparon por tipo (huevos de granja vs. domésticos) y parte (albúmina/yema), y fueron preparadas mediante digestión ácida. La cuantificación se realizó mediante espectrometría de absorción atómica de llama (AAS), con validación por recuperación, RSD <10% y comparación con los ADI de FAO/WHO. Los resultados mostraron mayor concentración de metales en la yema respecto a la albúmina. El hierro presentó la mayor variación entre zonas. El cadmio estuvo por debajo del LOD en albúmina y bajo en yema; el plomo y el cromo superaron los valores recomendados en algunos casos. El estudio concluye que, aunque los huevos representan una fuente importante de elementos esenciales, el contenido de metales tóxicos no supone una amenaza significativa para la salud, aunque se recomienda monitoreo por los niveles de Pb y Zn (61).

Wang S, Li Q, Gao Y, et al., desarrollaron el estudio titulado "Influencias de la exposición al plomo en su acumulación en órganos, carne, huevos y huesos durante el periodo de puesta de las gallinas", en China en el 2021 , con el objetivo de evaluar la acumulación y efectos del plomo (Pb) en tejidos, huevos y huesos de gallinas ponedoras ISA Brown sometidas a tres niveles crecientes de Pb (1, 10 y 100 mg/kg peso corporal). Los materiales y métodos consistieron en ochenta gallinas que fueron divididas aleatoriamente en cuatro grupos (incluido un grupo control) y tratadas durante 20 días. Se recolectaron y analizaron muestras de órganos, carne, cáscara, yema, clara y huesos mediante espectrometría ICP-MS, absorciómetro DEXA y espectroscopía Raman. Los resultados del estudio encontraron que la acumulación de Pb fue significativamente mayor en riñón e hígado (2,34 y 0,51 ppm), y moderada en cáscara y yema (hasta 3,11 ppm), permaneciendo baja en la clara (<0,10 ppm)

y en carne (0,07 ppm). El Pb redujo el peso corporal, la producción y masa de huevos, además de afectar negativamente la densidad y resistencia ósea. El estudio concluye que la yema y los órganos son vías importantes de acumulación de Pb, mientras que la clara representa menor riesgo. Incluso niveles bajos de Pb afectan la fisiología de las aves y comprometen la salud ósea (62).

II.3. Bases teóricas

II.3.1 Teoría de la bioacumulación:

La bioacumulación es un proceso donde los metales pesados (MH) se incorporan progresivamente en los organismos vivos desde su entorno abiótico (agua, aire, suelo) y/o a través de diversas fuentes entre los cuales están los alimentos, en una proporción mayor a la que estos organismos pueden eliminarlos. Esta acumulación ocurre en dos etapas: la biosorción superficial de iones metálicos en las membranas celulares y el transporte activo intracelular, lo que da lugar a una retención prolongada de contaminantes en tejidos vivos (63). Además de estas fases celulares, la bioacumulación se intensifica en organismos de niveles tróficos superiores cuando los metales ingresan al sistema por vía alimentaria, facilitando su persistencia en la cadena alimentaria (64).

Estudios recientes han señalado que factores como el tipo de metal, la especie del organismo, la naturaleza del tejido y condiciones ambientales como el pH o la disponibilidad de ligandos orgánicos influyen significativamente en el grado de bioacumulación (64). Asimismo, se ha encontrado que los sedimentos en ecosistemas acuáticos funcionan como reservorios contaminantes, permitiendo la incorporación trófica de los metales en organismos acuáticos y, eventualmente, en humanos mediante el consumo de alimentos contaminados (64). Por otro lado, la bioacumulación ha sido identificada también como una herramienta útil para la remediación ambiental. Las plantas y los microorganismos tienen

la capacidad de absorber metales del suelo o del agua, acumulándolos en sus tejidos, lo que permite descontaminar sitios contaminados por metales pesados (63). Estas aplicaciones demuestran que la bioacumulación no solo representa una vía de exposición tóxica, sino también una estrategia efectiva y ecológica para reducir la presencia de metales pesados en el ambiente.

Entonces, estos hallazgos permiten comprender que la bioacumulación es un proceso clave en la distribución, persistencia y toxicidad de los metales pesados en los ecosistemas, lo cual es fundamental para evaluar su transferencia a productos de consumo humano, como los huevos de gallina.

II.3.2 Toxicocinética de los metales

II.3.2.1. Plomo (Pb)

La toxicocinética del plomo (Pb) ha sido ampliamente estudiada, dado su carácter tóxico y su capacidad de bioacumulación en el organismo humano. Los procesos de absorción, distribución, metabolismo y excreción (ADME) del Pb varían según la vía de exposición, la edad, el estado fisiológico y nutricional, así como la forma química del metal (65).

Absorción:

El plomo puede ingresar al organismo por inhalación, ingestión o contacto dérmico. La vía gastrointestinal es especialmente crítica en poblaciones vulnerables como niños, quienes pueden absorber entre el 40 % y el 50 % del plomo ingerido, en comparación con un 3–10 % en adultos. Factores como el ayuno, la deficiencia de hierro o calcio aumentan la absorción gastrointestinal del Pb (66). Por inhalación, las partículas menores a 1 µm son absorbidas casi completamente en el tracto respiratorio inferior, mientras que partículas mayores son atrapadas en las vías aéreas superiores y deglutidas posteriormente

(65,66). La absorción dérmica es baja para compuestos inorgánicos, aunque los compuestos orgánicos de Pb presentan mayor penetración cutánea (65).

Distribución:

Una vez absorbido, el Pb se transporta en sangre unido principalmente a los eritrocitos (más del 99 %), y en menor proporción en el plasma, que es la fracción que interactúa con los tejidos (65). En adultos, aproximadamente el 94 % del plomo corporal total se encuentra depositado en los huesos, mientras que en niños este valor ronda el 70-73 % (65,66). El Pb se acumula en tejidos blandos como hígado, riñones, dientes y cabello. Además, existe un intercambio dinámico entre el Pb en sangre y en el hueso, siendo este último un reservorio importante, particularmente activo durante procesos que aumentan la resorción ósea como embarazo, lactancia, menopausia o fracturas (65,67) Durante el embarazo, el plomo puede atravesar la placenta, y los niveles fetales suelen reflejar los niveles maternos (66).

Metabolismo:

El plomo inorgánico no se metaboliza en el sentido clásico, pero forma complejos reversibles con proteínas, aminoácidos y compuestos que contienen grupos sulfhidrilo (66). En cambio, los compuestos orgánicos de Pb, como el tetraetilo y tetrametilo, se metabolizan en el hígado por medio de reacciones de desalquilación oxidativa, generando metabolitos neurotóxicos (65,66).

Excreción:

El Pb se elimina principalmente por vía urinaria y fecal, aunque también puede excretarse en cantidades menores a través del sudor, la saliva, el cabello, las uñas y la leche materna (65,66). En sangre y tejidos blandos, la eliminación del Pb es relativamente rápida: del 50 % al 60 % puede

eliminarse en un período de 30 a 40 días. En cambio, en el hueso, la vida media del Pb varía desde algunos meses en niños hasta más de 20 años en adultos, dependiendo de la intensidad y duración de la exposición (66).

Modelos toxicoquinéticos son un enfoque donde se evalúa como la toxicocinética del plomo puede tener ciertas variaciones significativas en el embarazo y los impactos tanto en la madre y el feto, por tanto hay varios análisis que han desarrollado modelos fisiológicamente basados (PBPK) para simular la distribución del Pb en el cuerpo humano. Modelos como los de Leggett, O'Flaherty y AALM han sido utilizados para caracterizar la cinética del Pb en distintas etapas de la vida. En particular, el modelo desarrollado por O'Flaherty ha sido adaptado por Ali Daoud y sus colaboradores para representar la exposición materno-fetal durante el embarazo, incorporando la remodelación ósea materna y la osificación fetal como variables clave. Este modelo permitió predecir concentraciones de Pb en sangre fetal y niveles en el tejido cerebral, destacando la relevancia del hueso como fuente interna de exposición fetal (67). Estos estudios ayudan a entender de mejor manera la toxicocinética del plomo en casos especiales.

Imagen N° 2: Toxicocinética del plomo.



Fuente: Elaboración propia, basada en información de las referencias (65,66).

II.3.2.2. Mercurio (Hg)

El mercurio está presente en formas elementales, inorgánicas u orgánicas. El mercurio elemental (Hg^0) puede ser tóxico por inhalación, pero su absorción por vía oral es prácticamente nula (~0.04 %) y así que no representa un riesgo relevante en alimentos (68). Pero las formas inorgánicas (Hg^{2+}) y orgánicas (especialmente metilmercurio, MeHg), son las formas más peligrosas en términos de exposición alimentaria y riesgo toxicológico.

Absorción

Las sales inorgánicas de mercurio tienen baja biodisponibilidad oral, con tasas de absorción que oscilan entre 7 % y 15 %, aunque esta puede

aumentar con exposiciones prolongadas debido a su efecto corrosivo sobre el epitelio gastrointestinal (72). Por otro lado, el metilmercurio (MeHg), presente en peces y mariscos, se absorbe casi por completo en el tracto gastrointestinal humano (>90 %), lo que lo convierte en la principal fuente de exposición para la población general (68,69).

Distribución

Tras su absorción, el MeHg se une a grupos sulfhidrilos de aminoácidos como la cisteína, formando complejos que simulan nutrientes y son transportados activamente a través de membranas celulares, incluidas la placenta y la barrera hematoencefálica (68,70) Esto permite su amplia distribución en órganos como el cerebro, hígado, riñones, sistema nervioso central y tejidos fetales. Por otro lado, el mercurio inorgánico, se concentra principalmente en los riñones y en menor medida, en el hígado, testículos y glándulas exocrinas (70).

Metabolismo

El MeHg es transformado gradualmente en mercurio inorgánico (Hg^{2+}) por procesos de desmetilación que ocurren principalmente en el intestino gracias a la acción del microbiota intestinal. Esta conversión metabólica facilita su posterior eliminación (70). Estudios en humanos han demostrado que la administración de antibióticos puede reducir significativamente esta desmetilación, lo que confirma el papel crucial del microbioma en el metabolismo del MeHg (69).

Excreción

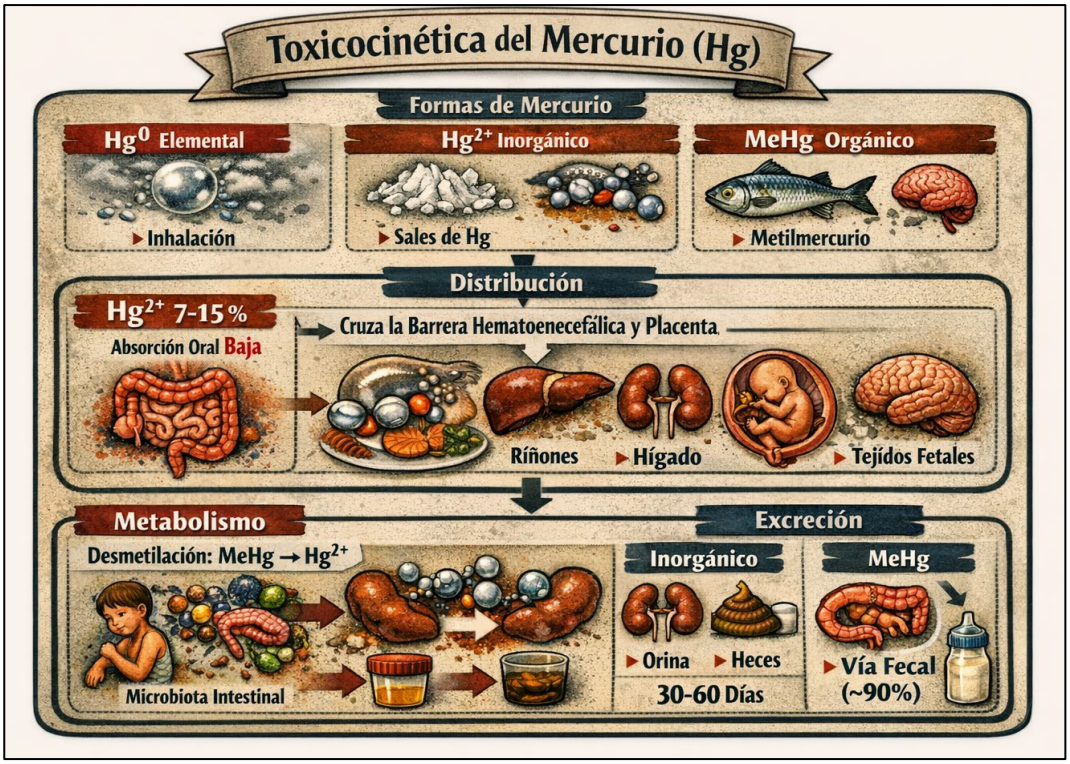
La eliminación del mercurio varía según su forma química. Las especies inorgánicas se excretan principalmente por vía renal y en menor grado, por vía fecal, con una vida media biológica estimada entre 30 y 60 días (70). El MeHg, en cambio, se elimina sobre todo por vía fecal (alrededor del 90 %), influenciado por la recirculación enterohepática, lo que

prolonga su vida media, la cual se sitúa entre 44 y 70 días en promedio, aunque se han registrado valores entre 28 y 128 días según el individuo (69,70).

Variabilidad individual

Se ha observado una amplia variabilidad interindividual en la eliminación del MeHg, influenciada por factores fisiológicos y microbiológicos. Modelos farmacocinéticos fisiológicamente basados (PBPK) han demostrado que variables como el sexo, la masa corporal, el flujo sanguíneo y el microbiota intestinal afectan directamente la vida media del MeHg y, por tanto, su toxicidad acumulativa en humanos (70).

Imagen N° 3: Toxicocinética del mercurio.



Fuente: Elaboración propia, basada en información de las referencias (68-70).

II.3.2.3. Níquel (Ni)

El níquel (Ni) puede encontrarse en formas metálicas, sales solubles (como cloruro, sulfato y nitrato) y formas insolubles (como óxidos o sulfuros). Las formas solubles de níquel son las más relevantes en términos de exposición oral e inhalatoria debido a su alta biodisponibilidad, mientras que la absorción dérmica es mínima en condiciones normales (71,72,73)

Absorción

Las sales solubles de níquel presentan una absorción gastrointestinal baja entre 1 a 6 % cuando se ingiere con alimentos, pero puede aumentar de 12 a 40 % en condiciones de ayuno (71,72). En estudios *in situ* con perfusión intestinal en ratas, se observó que concentraciones ≤10 mg Ni/L se absorben mediante transporte activo y difusión facilitada, mientras que concentraciones mayores saturan los transportadores y pasan por difusión pasiva (71). En el tracto respiratorio, según estimaciones entre 20 % y 35 % del níquel inhalado en forma de partículas finas (<2.5 µm) se absorbe, dependiendo del tamaño y la solubilidad (71). En cuanto a la vía dérmica, la absorción es extremadamente baja (<1 %), incluso tras exposiciones prolongadas de hasta 96 horas, aunque puede incrementarse en piel dañada (71,72,73).

Distribución

Una vez absorbido, el níquel circula unido principalmente a albúmina, L-histidina y α2-macroglobulina. La fracción unida a albúmina forma complejos lábiles que permiten el transporte a través de membranas biológicas (71,72). El níquel se distribuye ampliamente en tejidos, con altas concentraciones reportadas en pulmones, tiroides, riñones, hígado, corazón y cerebro (71,72). También atraviesa la placenta y se ha detectado en sangre fetal, líquido amniótico y leche materna (71,72,73).

En modelos animales, la forma química y la solubilidad determinan la retención tisular: las formas menos solubles se acumulan principalmente en pulmones y se eliminan más lentamente (71,72).

Metabolismo

El níquel no se metaboliza en el cuerpo. Su comportamiento en el organismo se limita a interacciones con proteínas plasmáticas mediante intercambio de ligandos. En humanos, el sitio principal de unión es un residuo de histidina en la albúmina sérica, al cual se une de manera reversible favoreciendo su transporte y distribución sistémica (71).

Excreción

El níquel absorbido se elimina principalmente por orina. Las formas solubles muestran una rápida eliminación urinaria, con una vida media biológica de 20–28 horas, aunque se han reportado valores más altos con formas insolubles (71,72). El níquel que no se llega a absorber se excreta por vía fecal y también puede eliminarse por sudor y leche materna (71,72). En humanos, la eliminación urinaria se relaciona con la solubilidad del compuesto, los niveles urinarios son significativamente mayores en trabajadores expuestos a sales solubles que aquellos expuestos a formas insolubles (72,73). En animales, entre 70 % y 96 % del níquel soluble se excreta por orina en pocos días; en contraste, las formas insolubles son eliminadas más lentamente y se detectan principalmente en heces (71,73).

Variabilidad individual

La absorción y eliminación del níquel muestran variabilidad interindividual relacionada con factores como la forma química, vía de exposición, estado nutricional y alteraciones en barreras epiteliales [1–3]. La presencia de alimentos disminuye la absorción intestinal; la oclusión o daño dérmico incrementa la absorción cutánea; y el tamaño

de partícula y solubilidad determinan la retención pulmonar y la velocidad de depuración (71,72).

Imagen N°4: Toxicocinética del níquel.



Fuente: Elaboración propia, basada en información de las referencias (71-73).

II.3.3 Ingesta diaria toreable (IDT)

En toxicología regulatoria, uno de los conceptos fundamentales para evaluar la seguridad de sustancias químicas presentes en alimentos es la ingesta diaria tolerable (IDT).

La IDT es una referencia toxicológica que representa la cantidad de una sustancia química que puede ingerirse diariamente durante toda la vida sin que represente un riesgo para la salud humana. En el caso del níquel (Ni), la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) actualizó en 2020 su evaluación del riesgo derivado de su presencia en alimentos y agua potable, estableciendo una nueva IDT basada en la evidencia científica más reciente (74).

En el caso del níquel (Ni), la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) revisó en 2020 la evidencia científica más reciente y estableció una nueva IDT oral. El efecto crítico identificado fue la toxicidad reproductiva, observada en estudios con animales, en los que se reportó un incremento en la pérdida de embriones post-implantación. Con base en este hallazgo, se determinó un umbral de referencia a partir del nivel más bajo con efectos adversos observados (LOAEL), de este modo, la EFSA fijó una IDT de 13 µg/kg de peso corporal por día (74).

En el caso de la exposición aguda al níquel, el efecto crítico observado fue la aparición de dermatitis de contacto sistémica (SCD), una reacción inflamatoria de la piel que puede ocurrir en personas previamente sensibilizadas a este metal. Para evaluar este riesgo, se utilizó como punto de referencia una dosis mínima con efectos adversos observados (LOAEL, por sus siglas en inglés), que fue de 4.3 µg por kilogramo de peso corporal. Este enfoque se eligió porque no se pudo establecer una dosis segura sin efectos observables, conocida como BMDL (Benchmark Dose Lower Confidence Limit), que representa el límite inferior de la dosis con un efecto definido (por ejemplo, en el 10 % de los casos). Para valorar el nivel de riesgo, se aplicó el enfoque del margen de exposición (MOE), el cual compara la dosis de referencia con la exposición real estimada; un MOE mayor o igual a 30 indica que no hay una preocupación relevante para la salud humana (74).

Finalmente, la EFSA concluyó que, si bien la exposición alimentaria media se encuentra generalmente por debajo del nivel de la IDT en adolescentes y adultos, podría superar dicho umbral en niños pequeños e infantes, lo cual representa un motivo de preocupación en estos grupos vulnerables. Este planteamiento resalta la importancia del control y monitoreo del contenido de níquel en los alimentos, especialmente en poblaciones sensibles (74).

II.3.4 Toxicodinámica de los metales pesados

La toxicodinámica es la rama de la toxicología que estudia cómo las sustancias tóxicas actúan a nivel celular y molecular en los organismos. A diferencia de la toxicocinética, que describe el recorrido de la sustancia en el cuerpo, la toxicodinámica se enfoca en los mecanismos del daño, como la alteración de señales celulares, la generación de radicales libres, la inflamación, el daño al ADN y la modificación de proteínas esenciales (75). Estos procesos pueden conducir a efectos como apoptosis, mutaciones o enfermedades crónicas. Comprenderlos es clave para predecir riesgos y elaborar estrategias terapéuticas, como el uso de antioxidantes o quelantes frente a ciertos metales tóxicos.

Los mecanismos generales en metales pesados: Los metales pesados (MP) comparten mecanismos de toxicidad que explican su efecto perjudicial sobre la salud humana. Uno de los principales es el estrés oxidativo, resultado del aumento de especies reactivas de oxígeno (ROS) y nitrógeno (RNS). Metales como el hierro y el cobre generan ROS directamente, mientras que metales como plomo, cadmio y mercurio lo hacen indirectamente al reducir los niveles de antioxidantes celulares como glutatión, SOD y catalasa (76,78).

Otro mecanismo común es la inhibición enzimática, causada por la unión de los metales a grupos sulfhidrilo de proteínas esenciales, afectando procesos como la síntesis proteica, la reparación del ADN y la fosforilación oxidativa. Esto se asocia a daño mitocondrial, que conlleva sobreproducción de ROS, pérdida del potencial de membrana y disminución de ATP (76,77).

Los MP también activan rutas inflamatorias como NF-κB y MAPK, generando inflamación crónica, y pueden inducir daño genético por interacción directa con el ADN o mediante ROS, aumentando el riesgo de mutaciones y cáncer. Además, producen alteraciones epigenéticas,

como cambios en la metilación del ADN y expresión de microARNs, que afectan procesos celulares clave (77,78).

II.3.4.1. Plomo (Pb)

El plomo (Pb) ejerce su toxicidad a través de múltiples mecanismos que afectan de manera sistémica al organismo humano, siendo el estrés oxidativo uno de los procesos centrales. Este metal promueve un desequilibrio redox al incrementar la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) y reducir las defensas antioxidantes celulares, como el glutatión reducido (GSH) y enzimas clave como el superóxido dismutasa (SOD), la catalasa (CAT) y el glutatión peroxidasa (GPx), entre otra (83-85). En particular, la inhibición de la enzima δ-aminolevulínico deshidratasa (δ-ALAD) contribuye a la acumulación de ácido δ-aminolevulínico (δ-ALA), cuya oxidación genera radicales libres altamente reactivos (81).

Estos procesos conducen a daño estructural de lípidos, proteínas y ADN, favoreciendo la peroxidación lipídica, la disfunción celular y la activación de vías inflamatorias crónicas (83, 85). En el sistema inmunitario, el plomo interfiere con la expresión de citocinas clave como IL-1, IL-2, IL-6, TNF-α e IFN-γ, altera el perfil de respuesta Th1, y afecta el funcionamiento de macrófagos, linfocitos y células presentadoras de antígenos. Estas alteraciones inmunológicas pueden reducir la resistencia frente a patógenos, inducir inflamación crónica e incluso contribuir a procesos autoinmunes (81).

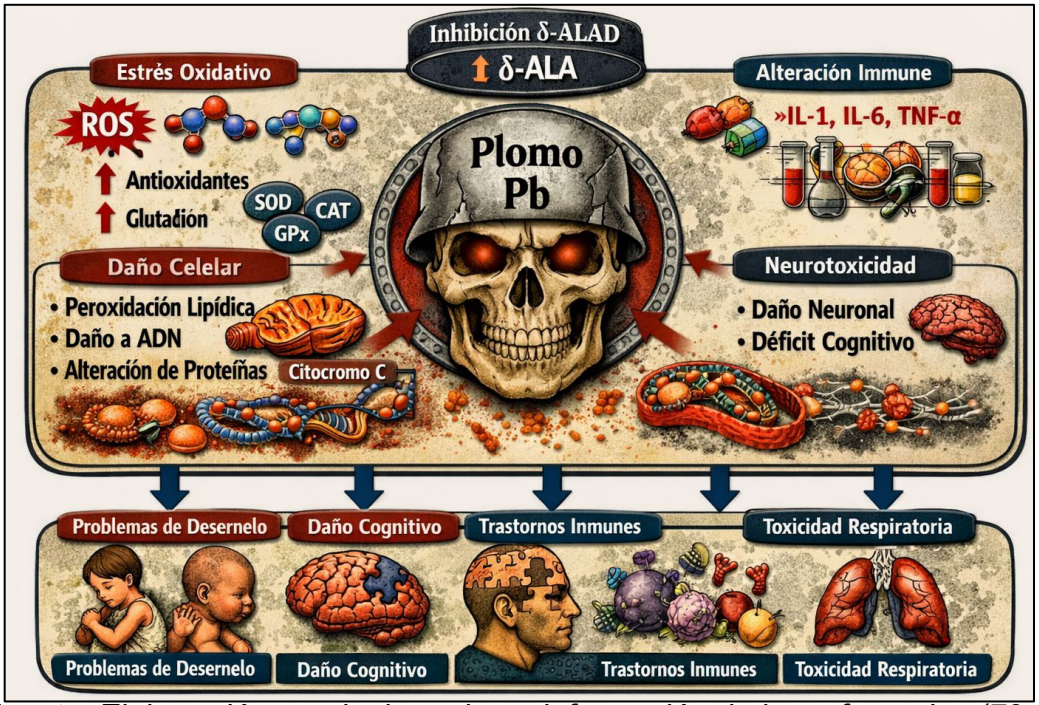
A nivel del sistema nervioso central, el plomo presenta una alta afinidad por los tejidos neuronales, a los que accede por su similitud con el ion calcio (Ca^{2+}), permitiéndole atravesar la barrera hematoencefálica. Una vez en el encéfalo, se acumula principalmente en la corteza cerebral, el cerebelo y el hipocampo, generando daño mitocondrial, alteraciones en

la señalización sináptica, depleción energética y apoptosis neuronal. Estas alteraciones se manifiestan clínicamente como deterioro cognitivo, alteraciones conductuales, déficits motores y riesgo de enfermedades neurodegenerativas (80).

Estudios genéticos también han evidenciado que variantes específicas, como el polimorfismo NQO1 rs2917670, pueden modular la susceptibilidad individual al daño inducido por plomo, al disminuir la expresión de enzimas antioxidantes protectoras como la NAD(P)H quinona deshidrogenasa 1 (NQO1), incrementando así el riesgo de disfunción respiratoria y otros daños tisulares asociados al estrés oxidativo (79).

En conjunto, estos mecanismos confirman que la toxicidad del plomo es multifactorial, afectando sistemas nervioso, inmunológico y respiratorio mediante procesos convergentes de oxidación, inflamación y disrupción funcional mitocondrial y genética (79,81).

Imagen N° 5: Mecanismo de toxicidad de mercurio.



Fuente: Elaboración propia, basada en información de las referencias (79-81).

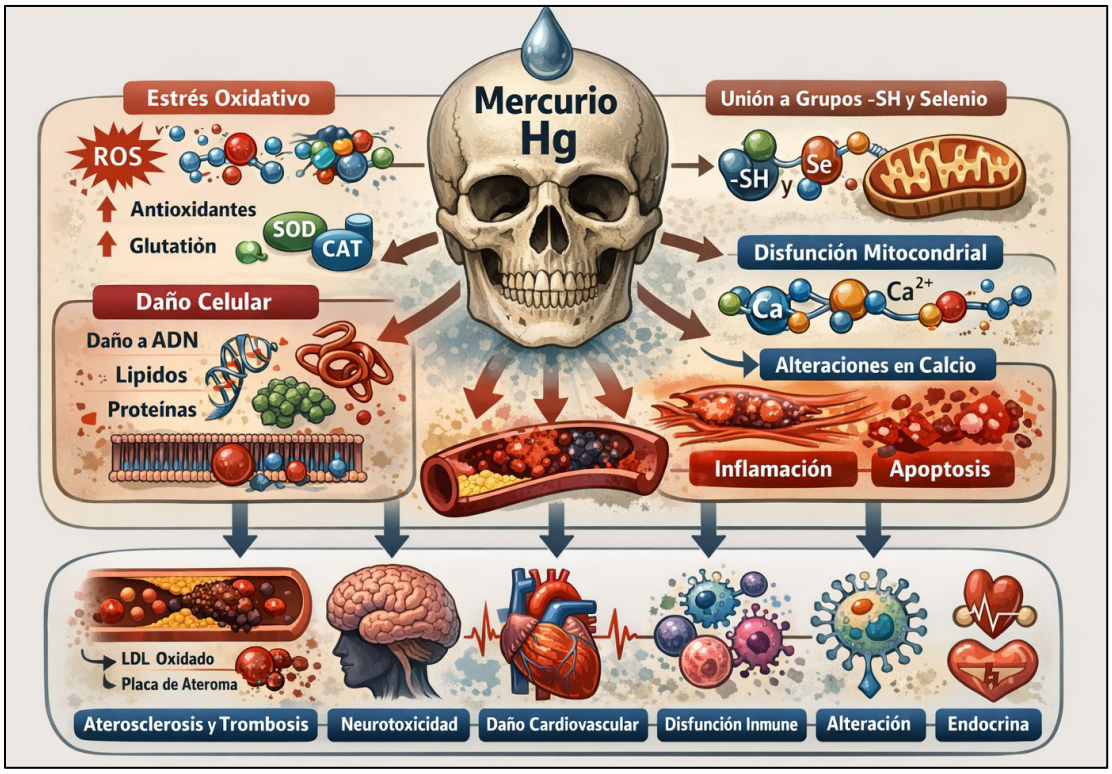
II.3.4.2. Mercurio (Hg)

El mercurio (Hg) es un metal pesado altamente tóxico que existe en formas elemental (Hg^0), inorgánica (Hg^+, Hg^{2+}) y orgánica, como el metilmercurio (MeHg), cuyas propiedades determinan su comportamiento en el organismo. Uno de los principales mecanismos es el estrés oxidativo, inducido por la generación excesiva de especies reactivas de oxígeno (ROS) y la inhibición de los sistemas antioxidantes endógenos, incluyendo enzimas como el superóxido dismutasa (SOD) y la catalasa (CAT), así como moléculas como el glutatión. Esta condición favorece el daño oxidativo a lípidos, proteínas y ADN dañando la integridad de las membranas celulares (82,83).

La toxicidad del mercurio también evidencia a través de su alta afinidad por grupos sulfhidrilo (-SH) y selenol, presentes en proteínas estructurales y funcionales. Esta interacción interfiere con la actividad de múltiples enzimas y transportadores, afectando procesos como la señalización intracelular, la homeostasis redox y la función mitocondrial. A nivel cardiovascular, este desequilibrio redox y la formación de complejos Hg-selenio reducen la actividad de enzimas protectoras, promoviendo la oxidación del colesterol LDL y la disfunción de una familia de enzimas paraoxonasa que evitan el estrés oxidativo, lo que facilita el desarrollo de aterosclerosis y trombosis (83).

Por otro lado el mercurio altera la regulación del calcio intracelular y la dinámica de los microtúbulos, contribuyendo a la disfunción mitocondrial, inflamación endotelial y apoptosis. También activa rutas moleculares como Nrf2, MAPK y NF-κB, vinculadas con inflamación crónica, muerte celular y procesos degenerativos. Estos efectos explican su impacto en sistemas sensibles como el nervioso, cardiovascular, inmunológico y endocrino, y su relación con enfermedades neurodegenerativas, alteraciones fetales y eventos cardiovasculares graves (82,83).

Imagen N° 6: mecanismo de toxicidad de mercurio



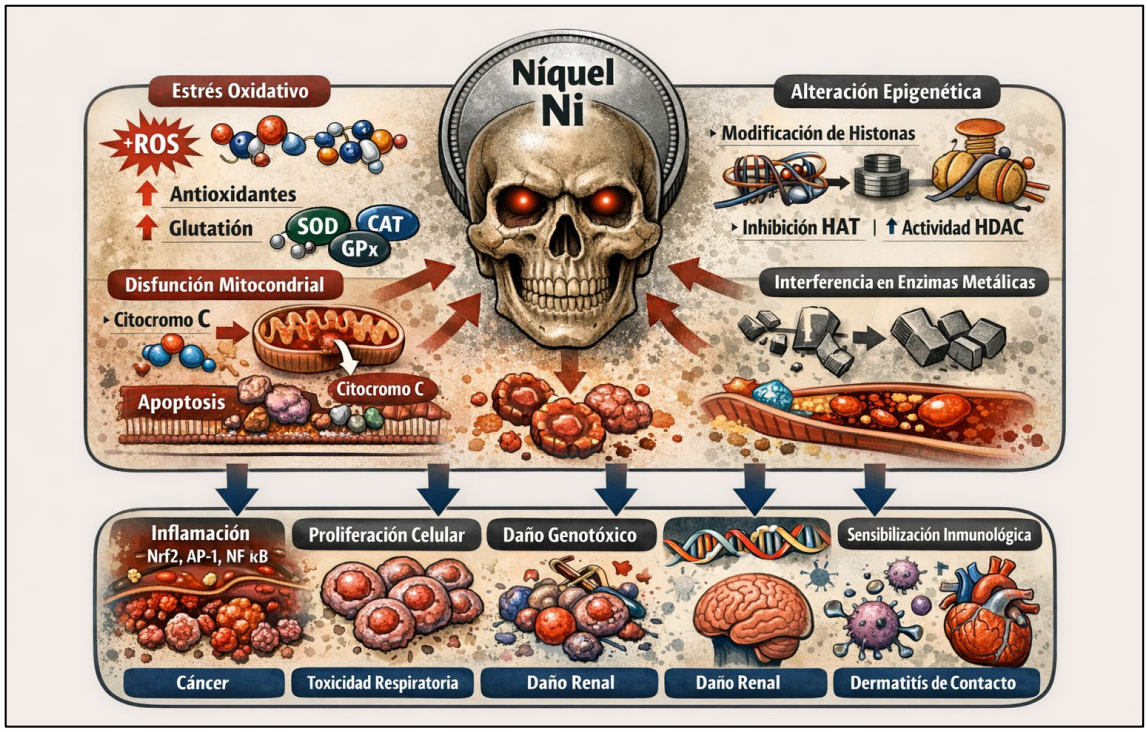
Fuente: Elaboración propia, basada en información de las referencias (82,83).

II.3.4.3. Níquel (Ni)

El níquel (Ni) representa un riesgo toxicológico significativo debido a su capacidad para inducir múltiples alteraciones celulares y moleculares tras su ingreso al organismo. Tanto las formas solubles como insolubles del níquel son diferentes en su biodisponibilidad y destino intracelular, pero ambas generan efectos citotóxicos, principalmente por el estrés oxidativo, la disfunción mitocondrial y la alteración epigenética (84). El ion Ni^{2+} promueve la acumulación de especies reactivas de oxígeno (ROS), inhibe enzimas antioxidantes clave (SOD, CAT, GPx) y deteriora la integridad de organelos como las mitocondrias, induciendo apoptosis a través de vías como la liberación de citocromo C. (85). A nivel transcripcional, el níquel altera la expresión génica mediante modificaciones en la acetilación de histonas, inhibición de histona acetiltransferasas (HAT), activación de histona des-acetilasas (HDAC) y

represión de la reparación del ADN, lo que contribuye a su capacidad carcinogénica (84). Además, interfiere con enzimas metálicas críticas como dioxigenasas dependientes de hierro y metalopeptidasas, al sustituir cationes metálicos esenciales en sus sitios activos (85). Estas alteraciones convergen en la activación de vías de señalización como Nrf2, AP-1, NF- κ B y MAPK, que están implicadas en procesos de inflamación, proliferación y muerte celular programada (84). La exposición dérmica e inhalatoria también facilita la sensibilización inmunológica, especialmente en presencia de compuestos solubles, actuando como haptenos que desencadenan dermatitis de contacto o reacciones sistémicas (85). En conjunto, la toxicodinámica del níquel implica un entramado de procesos redox, epigenéticos, inmunológicos y metabólicos, que explican su perfil tóxico multiorgánico y carcinogénico (84,85).

Imagen N° 7: Mecanismo de toxicidad del níquel



Fuente: Elaboración propia, basada en información de las referencias (84,85).

II.3.5. Biodisponibilidad

La biodisponibilidad es un parámetro multifactorial que expresa cómo una sustancia administrada logra ingresar a la circulación sistémica en forma activa y sin alteración estructural. Este proceso depende de varias interacciones entre tres dimensiones fundamentales. En primer lugar, las propiedades fisicoquímicas del compuesto, como la solubilidad acuosa, la tasa de disolución y la permeabilidad intestinal, determinan si un fármaco o nutriente puede atravesar la barrera gastrointestinal. Aproximadamente el 70 % de los nuevos fármacos presentan baja solubilidad, lo que limita su absorción, especialmente aquellos clasificados como clase II y IV del sistema de clasificación biofarmacéutica (BCS) (86). Para mejorar esta situación, se han desarrollado estrategias farmacotécnicas como micronización, nanopartículas, dispersiones sólidas, formación de sales, co-cristales y complejación con ciclodextrinas, todas diseñadas para incrementar la fracción soluble y disponible en el sitio de absorción (86).

En segundo lugar, intervienen factores fisiológicos del huésped, como el metabolismo pre-sistémico, el efecto de primer paso hepático y la actividad de enzimas digestivas, los cuales pueden reducir la fracción activa del compuesto después de su absorción intestinal (87). Estos procesos influyen directamente en la cantidad de sustancia que alcanza la circulación sistémica en condiciones funcionales.

En tercer lugar y como información reciente, se reconoce el papel del microbioma intestinal, el cual actúa como un biorreactor metabólico capaz de transformar estructuralmente los compuestos ingeridos, incrementando o reduciendo su biodisponibilidad (87). Esta modulación ocurre mediante cuatro rutas principales: la biotransformación directa de compuestos a través de enzimas bacterianas específicas; la estimulación indirecta de especies microbianas productoras de metabolitos bioactivos;

la inhibición de la generación de metabolitos perjudiciales y la supresión de bacterias que convierten compuestos útiles en formas inactivas (87). Este modelo explica por qué ciertas sustancias con baja concentración plasmática pueden tener efectos terapéuticos significativos, lo que resalta que la biodisponibilidad no es una propiedad inherente del compuesto, sino un fenómeno emergente de su interacción con el entorno fisiológico y microbiano del huésped (86,87)

II.3.6. Evaluación de riesgo toxicológico

La evaluación de riesgo toxicológico es un proceso que permite estimar si una sustancia química puede causar daño a la salud humana y en qué medida. Para esto, se analiza información proveniente de estudios en laboratorio, investigaciones en personas expuestas y datos ambientales que ayuden a entender qué tan peligrosa puede ser una sustancia, y en qué condiciones (88,89). Este tipo de evaluación es fundamental para tomar decisiones que protejan la salud pública, especialmente frente a compuestos tóxicos como los metales pesados o productos industriales contaminantes (89).

Actualmente, este proceso se basa en metodologías más rigurosas y transparentes. Se utilizan esquemas como el método PECO (que define la Población, la Exposición, el Comparador y el Resultado a evaluar) y herramientas como el Navigation Guide, que sirven para organizar y analizar estudios de forma sistemática, tanto en humanos como en modelos animales (88,89). Además, se han incorporado nuevas tecnologías que permiten evaluar toxicidad sin necesidad de usar animales. Estas se agrupan bajo el término “Nuevas metodologías de aproximación” (NAMs, por sus siglas en inglés) e incluyen estudios con células humanas en laboratorio (*in vitro*), modelos por computadora (*in silico*) y técnicas genéticas avanzadas (*ómicas*) (88).

Los marcos regulatorios más reconocidos internacionalmente, como TSCA en Estados Unidos, AICIS en Australia y REACH en la Unión Europea, siguen esquemas comunes que incluyen cuatro etapas clave: identificar el peligro, determinar la relación entre dosis-efecto, evaluar el nivel de exposición y finalmente caracterizar el riesgo (89). Estos marcos también utilizan estrategias por niveles (es decir, empezar con análisis simples y avanzar según sea necesario), aplican métodos como el análisis multicriterio (Multi-Criteria Decision Analysis, MCDA), que permite tomar decisiones considerando no solo los aspectos técnicos, sino también factores sociales, económicos y regulatorios (89).

Se destaca además el uso de modelos como el Adverse Outcome Pathway (AOP), que describen paso a paso cómo una sustancia puede generar un daño: desde que interactúa con una molécula en el cuerpo hasta que se manifiesta un efecto negativo (88). Estos modelos ayudan a comprender mejor los mecanismos de toxicidad y a fortalecer la base científica para decisiones regulatorias.

A pesar de los avances metodológicos y regulatorios descritos, persisten desafíos importantes, como la limitada implementación de estos enfoques en países en desarrollo y la escasez de datos toxicológicos actualizados sobre sustancias emergentes. En respuesta a estas limitaciones, diversos investigadores subrayan la necesidad de reforzar la vigilancia ambiental, ampliar el acceso a la información científica y adaptar los métodos de evaluación a contextos locales y realidades específicas (89).

II.4. Glosario de términos

Cociente de peligro (HQ): Es un indicador que compara la exposición estimada de un receptor humano a un contaminante.

Riesgo combinado (HI): Es un indicador que representa el riesgo no cancerígeno combinado por la exposición simultánea a múltiples contaminantes.

Riesgo cancerígeno (CR): Es la probabilidad en que una persona desarrolle cáncer a lo largo de su vida debido a la exposición a un agente tóxico.

Ingesta Diaria Estimada (IDE): Es la cantidad promedio diaria de un contaminante químico que una persona ingiere a través del consumo de un alimento específico, que va en función de la concentración encontrada y el consumo habitual del alimento.

Ingesta Diaria Tolerable (IDT): Es la cantidad máxima de un contaminante químico que una persona puede ingerir diariamente durante toda su vida sin que se esperen efectos adversos significativos para la salud.

Dosis de Referencia (RfD): Es una estimación de la exposición diaria a un contaminante químico que se considera segura para la población humana durante toda la vida, sin riesgo apreciable de efectos adversos.

Cociente de Riesgo Objetivo (THQ): Indicador de riesgo no cancerígeno que estima la probabilidad de efectos adversos a la salud debido a la exposición crónica a un contaminante químico a través del consumo de alimentos.

Margen de exposición (MOE): Es un indicador toxicológico que compara la dosis que causa un efecto adverso en estudios toxicológicos con la exposición estimada en humanos (IDE).

Límite Inferior de la Dosis Benchmark (BMDL): Es un valor toxicológico que representa el límite inferior del intervalo de confianza (generalmente al 95%) de la dosis asociada a un nivel crítico de respuesta adversa en estudios experimentales

Riesgo Incremental de Cáncer a lo Largo de la Vida (ILCR): Es un indicador toxicológico que estima la probabilidad incremental de desarrollar cáncer durante toda la vida debido a la exposición crónica a un contaminante carcinogénico

LIMITE DE DETECCIÓN (LDM): La concentración mínima de un analito que puede ser detectada por el método analítico, pero no necesariamente cuantificada con exactitud.

LIMITE DE CUANTIFICACIÓN (LCM): La concentración mínima de un analito que puede ser cuantificada con precisión y exactitud aceptables por el método analítico.

III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

III.1. Hipótesis general

Las concentraciones de plomo (Pb), níquel (Ni) y mercurio total (Hg) presentes en huevos de gallina provenientes de tres empresas avícolas de Lima Metropolitana durante el año 2025 superan los límites máximos permisibles establecidos por la normativa vigente y generan un riesgo significativo para la salud humana por efectos cancerígenos y no cancerígenos.

III.2. Hipótesis específicas

1. Las concentraciones de plomo (Pb), níquel (Ni) y mercurio total (HgT) difieren significativamente entre las tres empresas avícolas evaluadas.

2. Al menos uno de los metales analizados presenta concentraciones superiores a los límites máximos permisibles establecidos por normativa vigente.

3. El Cociente de Peligro (HQ) y el Índice de Peligro (HI) para la exposición a níquel y mercurio total superan el valor de 1, indicando riesgo no cancerígeno.

4. El Riesgo Cancerígeno Incremental (ILCR) estimado para la exposición a níquel supera el nivel de riesgo aceptable (1×10^{-6} – 1×10^{-4}).

5. El Margen de Exposición (MOE) es >10 para plomo (Pb), indicando preocupación por efectos no cancerígenos.

III.3. Variables

III.3.1. Variable independiente

Concentración de metales pesados en huevos de gallina (Plomo (Pb) (mg/kg) ; Níquel (Ni) (mg/kg) ; Mercurio total (HgT) (mg/kg).

III.3.2. Variables dependientes

Nivel de riesgo para la salud humana asociado al consumo de huevos contaminados

III.4. Operacionalización de variables

Tabla 2. Matriz de operacionalización de variables.

Variable	Tipo de variable	Conceptualización	Indicadores	Escala	Unidad de medida	Observaciones (aplicación por metal / fórmula breve)
Variable Independiente Concentración de metales pesados en huevos de gallina plomo (Pb), mercurio total (HgT) y Níquel (Ni)	Cuantitativa continua	Esta variable representa la medida de la cantidad de cada uno de estos metales presentes en las muestras de huevo de gallina analizadas, expresada en términos de masa de cada metal por kilogramo de muestra y es fundamental para evaluar el riesgo potencial para la salud de los consumidores. la salud de los consumidores.	Concentración	Razón	mg/kg	Método analítico: ICP-OES; digestión ácida; registrar LDM/LCM
Variable Dependiente Nivel de riesgo para la salud humana asociado al consumo de huevos contaminados	Cuantitativa continua	Una evaluación de riesgos para la salud humana es el proceso sistemático mediante el cual se estima la naturaleza y probabilidad de efectos adversos para la salud en humanos que podrían resultar de la exposición a sustancias químicas presentes en alimentos o medios ambientales contaminados, ya sea en el presente o en el futuro(X;y). **Riesgo No Cancerígeno:** Se debe estimar la ingesta diaria estimada (IDE), el Índice de Peligro (HI) , el cociente de riesgo objetivo (HQ) y el margen de	IDE	Razón	µg/kg/día	IDE = (C × IR) / BW
			HQ	Razón HI > 1 indica riesgo	Adimensional	HQ = IDE / RfD. Aplica a Ni y HgT.

		exposición (MOE) para el plomo para la exposición a largo plazo. **Riesgo Cancerígeno:** Se debe estimar el riesgo cancerígeno Incremental (ILCR) para evaluar el riesgo asociado con la exposición a agentes carcinógenos como el níquel durante toda la vida	HI	Razón HI > 1 indica riesgo	Adimensional	HI = ΣHQ (Ni + HgT).
			MOE	Razón MOE ≥ 10 bajo riesgo y < 1 preocupación	Adimensional	MOE = BMDL01 / IDE(Pb). Usar BMDL01 ≈ 0.5 µg/kg·día (EFSA).
			ILCR	Razón aceptable ~10^{-6}–10^{-4}	Adimensional	ILCR = IDE (mg/kg·día) × SF(Ni).

Fuente: Elaboración propia

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

IV.1. Área de estudio

El estudio se llevará a cabo en el laboratorio S-Lab Perú, ubicado en el distrito de San Martín de Porres, provincia y departamento de Lima. S-Lab Perú es un laboratorio especializado en análisis químico, ambiental y de metales pesados, reconocido por su alta precisión y cumplimiento de normativas internacionales en análisis de seguridad alimentaria y ambiental. El laboratorio cuenta con equipos avanzados como el ICP-OES (Espectrometría de Plasma Acoplado Inductivamente) para la determinación de concentraciones de metales pesados, brindando resultados confiables y detallados. Las coordenadas del área de estudio son: Mercado mayorista de santa anita: 12° 02′ 19.44″ S, 76° 56′ 50.66″ W, mercado caqueta en el centro de lima: 12° 02′ 02.07″ S, 77° 02′ 38.34″ W, mercado unicahi de Pro en comas: 11° 56′ 18.07″ S, 77° 04′ 14.16″ W.Diseño de investigación

La presente investigación corresponde a un diseño no experimental de tipo descriptivo, prospectivo y transversal, porque se determinarán las concentraciones de plomo (Pb), níquel (Ni) y mercurio total (HgT), entendido como la suma de todas las especies químicas presentes en la muestra, incluyendo mercurio inorgánico (Hg^{2+}) y metilmercurio (MeHg) presentes en huevos de gallina, con el fin de identificar el grado de contaminación en estos alimentos. La recolección de muestras será en un periodo determinado y se realizará en setiembre del 2025.

IV.3. Población y muestra

La población de estudio corresponde a Huevos de gallina que se expenden en tres avícolas de la ciudad de Lima. La muestra consiste en 1 kg de huevo por cada avícola (Ver anexo 1). Se empleo un muestreo no probabilístico por conveniencia, dado que el objetivo del estudio es descriptivo y se priorizó la accesibilidad y representatividad de las avícolas seleccionadas en el mercado local. Este tipo de muestreo es adecuado cuando no se busca inferencia estadística, existen

limitaciones logísticas y se seleccionan unidades representativas del fenómeno (90).

IV.4. Procedimientos, técnicas e instrumentos de recolección de información

IV.4.1. Recolección de muestras

Se recolectaron 3 kg de huevos de gallina (aproximadamente 18 huevos), cada kilogramo de huevo tendrá un origen específico: 1 kg será recolectado de 3 avícolas diferentes en el mercado Caquetá en el centro de Lima, el gran mercado mayorista de Santa Anita y el Mercado unicachi de Pro en comas (Ver anexo 1).

De cada grupo de 1 kg, se formarán 3 subgrupos de 6 huevos. Cada subgrupo será fraccionado en yema y clara por separado, realizándose una medición independiente por fracción. En total, este procedimiento generará 18 análisis (9 de yema y 9 de clara) correspondientes a los 3 kg de muestra.

Tabla 3. Muestras recolectadas

Mercados	Avicola 1	Avicola 2	Avicola 3
Mercado de Santa Anita (A)	6 und	6 und.	6 und
Mercado de Caquetá (B)	6 und	6 und	6 und
Mercado de Pro (C)	6 und	6 und	6 und
Muestras totales	1 kg (18 und)	1kg (18 und)	1kg (18 und)

IV.4.2. Preparación y digestión de muestras

IV.4.2.1. Limpieza de materiales

El material de vidrio o plástico se lava con detergente neutro y enjuagar con agua desionizada o filtrada. Dichos materiales se sumergen durante 24 horas en una solución de ácido nítrico al 30%, seguido de 5 a 6 enjuagues con agua desionizada se deja escurrir y secar completamente antes de su uso. Esto ayuda a

evitar contaminación cruzada en la determinación de metales traza y asegurar la calidad analítica (91).

IV.4.2.2. Digestión ácida

La digestión de las muestras se realizó conforme al método de digestión por vía húmeda descrito en la NOM-117-SSA1-1994. Se pesa 10 g de muestra de yema y 2 g de muestra de clara para la digestión ácida (Ver anexo 2).

A cada muestra (9 de yema y 9 de clara) se le añadieron 10 mL de ácido nítrico concentrado lo que da comienzo a la digestión. Calentar la muestra suavemente y mantener en digestión durante 3 horas o el tiempo necesario, se agrega peróxido de hidrógeno gota a gota, para evitar una reacción exotérmica violenta, si la solución permanece de color ámbar, hasta lograr un digestado traslúcido (91).

Todo este procedimiento de digestión se realiza en equipo DIGIBLOCK, la temperatura asignada al digestor fue a 95 °C, manteniendo calentamiento continuo durante aproximadamente 3 horas. El bloque digestor posee 36 cavidades para tubos de digestión, permitiendo una distribución térmica homogénea para las 18 muestras. Todo el procedimiento se ejecutó dentro de una campana extractora para garantizar la adecuada disipación de vapores ácidos.

IV.4.2.3. Enfriamiento y filtración

Después de completar la digestión, la solución se dejó enfriar completamente. Posteriormente, las muestras se filtran y se llevan a 25 mL en un matraz volumétrico, para reducir la presencia de partículas o materia insoluble se procede filtrar usando papel filtro Whatman N° 2 con tamaño de poro de 8µm. Finalmente, la solución filtrada llevar a 25 mL en un matraz volumétrico utilizando agua destilada o desionizada. La muestra queda lista para la lectura en el equipo ICP-OES (91).

IV.4.2.4. Preparación de estándares y blancos

El blanco de reactivos se prepara con los mismos reactivos, volúmenes y concentraciones empleados en el procesamiento de la muestra (p. ej., HNO_3) pero, sin muestra, y se somete a los mismos pasos de digestión, enfriamiento, filtración y aforo a la que fue sometido la muestra (91) (Ver anexo 4).

El blanco de reactivos fortificado se obtiene a partir de una alícuota del blanco a la que se añade una alícuota de la solución estándar concentrada ("solución madre") esto permite alcanzar una concentración final que produzca una absorbancia aceptable; debe seguir el mismo esquema de digestión y preparación que la muestra (91).

En lo que respecta la calibración, se parte de soluciones estándar y se preparan 3 a 4 niveles de concentración dentro del intervalo dinámico del analito, utilizando el ácido diluyente apropiado como blanco de calibración; el instrumento se ajusta a 0 con el blanco y se registra la respuesta de menor a mayor concentración para trazar la curva de calibración (91).

IV.5. Análisis instrumental por ICP-OES

La Espectroscopia de Emisión Atómica con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-OES) es un método ampliamente reconocido por su alta sensibilidad y capacidad para detectar metales y algunos no metales en muestras líquidas, incluso en concentraciones extremadamente bajas (partes por mil millones o ppb, equivalentes a µg/L). (48,92)

En consecuencia, la solución digerida se nebuliza posteriormente y es introducida en el núcleo del plasma de argón acoplado inductivamente, el cual alcanza temperaturas aproximadas de 7000–8000 K. Gracias a estas temperaturas extremadamente altas, los analitos se atomizan, ionizan y excitan térmicamente. Al regresar a su estado esencial, los átomos e iones excitados

emiten luz a longitudes de onda características de cada elemento. Esta radiación es separada y registrada por un espectrómetro de emisión óptica (OES), generando señales cuya intensidad es proporcional a la concentración del analito (94).

Finalmente, la concentración de cada metal se determina comparando la intensidad de emisión obtenida con la curva de calibración elaborada con estándares certificados. Este principio permite la cuantificación sensible, rápida y simultánea de elementos como plomo (Pb), níquel (Ni) y mercurio total (HgT), entendido como la suma de todas sus especies químicas presentes en la muestra, incluyendo mercurio inorgánico y mercurio orgánico, principalmente metilmercurio (MeHg), en matrices alimentarias (94)

IV.5.1. Control de calidad analítico:

Se analizaron muestras en blanco para verificar la ausencia de contaminación en reactivos y materiales de laboratorio. Asimismo, se emplearon materiales de referencia certificados y controles de calidad con concentraciones conocidas para asegurar la exactitud, precisión y trazabilidad del análisis (Ver anexo 4 y 5).

IV.5.2. Criterios de comparación normativa

Las concentraciones obtenidas de plomo (Pb) y mercurio total (HgT) fueron comparadas con los valores de referencia establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-159-SSA1-1996.

En el caso del níquel (Ni), debido a la ausencia de límites máximos permisibles específicos para huevos, se empleó como valor de referencia la Ingesta Diaria Tolerable (IDT) de 13 µg/kg p.c./día establecido por la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA)

IV.6. Evaluación del riesgo toxicológico

Para estimar el riesgo toxicológico asociado a la exposición alimentaria a plomo (Pb), níquel (Ni) y mercurio total (HgT) por consumo de huevos, se calcularon la Ingesta Diaria Estimada (IDE). Para el cociente de riesgo no cancerígeno (HQ), el índice de peligro (HI) y el riesgo cancerígeno (CR) se calcularon solo de Mercurio total (HgT) y Niquel (Ni) siguiendo las metodologías propuestas por la United States Environmental Protection Agency (USEPA). Para el caso del Plomo (Pb) se evaluó mediante un enfoque de margen de exposición (MOE) usando como punto de referencia el BMDL derivado por EFSA para neurotoxicidad del desarrollo (BMDL01, equivalente a una ingesta dietaria de 0.50 µg/kg·día); este BMDL procede de relaciones dosis-respuestas basadas en plomo en sangre

a) Ingesta Diaria Tolerable (IDE)

La exposición alimentaria a cada metal se estimó mediante la fórmula de Ingesta Diaria Estimada (IDE):

$$\text{IDE (ug/kg p.c./día)} = [C]\left(\frac{ug}{kg}\right) \times \frac{consumo\ de\ huevo\ (kg/día)}{peso\ corporal\ (kg)}$$

Donde:

- [C]: Concentración del metal en el huevo
- El consumo de huevo promedio: 0.051 kg/día de consumidor habitual (95)
- Peso corporal considerado fue de 70 kg

b) El riesgo no cancerígeno: el cociente de riesgo (HQ)
El cociente de riesgo (HQ) se calculó como:

$$HQ = \frac{IDT}{RfD}$$

Donde:

- RfD (reference Dose) es la dosis diaria oral considerada segura para exposición crónica.

Las RfD a emplear son:

Tabla N°4: Valores de RfD para níquel y mercurio.

Metal	RfD (ug/kg/día)	Fuente
Níquel (Ni)	20	USEPA-IRIS (96)
Mercurio (MeHg)	0.1	USEPA-IRIS (97)

Se utilizaron las RfD de la USEPA por ser los valores internacionalmente aceptados para estimar riesgos crónicos por exposición oral porque permiten realizar comparaciones estandarizadas entre estudios. Además, en ausencia de límites peruanos oficiales, estos valores constituyen un referente metodológico válido para evaluación de riesgo alimentario

b) Índice de Peligro Total (HI)

El riesgo combinado por exposición simultánea a Ni y HgT se evaluó mediante:

$$HI = \sum HQ_i$$

Interpretación:

- HI < 1 $\rightarrow$ riesgo no cancerígeno no apreciable.
- HI ≥ 1 $\rightarrow$ posible riesgo para la salud.

c) Riesgo cancerígeno (CR)

Para los metales clasificados como carcinógenos por vía oral, se hizo el siguiente calculo.

$$CR = IDT \times SF$$

Donde:

- SF (Slope factor): Factor de potencia cancerígena de la OEHHA (98)

Tabla N°5: Valores para Factor de potencia cancerígena por metal.

Metal	SF $(mg/kg/día)^{-1}$	Motivo
Níquel	0.91	Clasificado como carcinógeno en exposiciones orales crónicas (98)
Mercurio	No aplica	No posee factor carcinogénico oral establecido
Plomo	No aplica	No posee factor carcinógeno oral establecido

Los factores de potencia (SF) usados provienen de la base de datos de la oficina de Evaluación de Riesgos para la Salud Ambiental de California-EEUU (OEHHA), que constituye la principal referencia internacional para evaluar riesgos cancerígenos por exposición crónica. Se emplean en estudios de inocuidad alimentaria cuando las sustancias evaluadas tienen evidencia toxicológica suficiente para caracterizar carcinogenicidad.

d) Margen de exposición (MOE) para Plomo (Pb):

Para el caso del plomo se hizo el siguiente calculo, considerando que la que la USEPA no ha establecido RfD para plomo inorgánico ni organismos internacionales. Por tanto, el margen de exposición MOE, nos brinda información del nivel de toxicidad presente, Además se considera que un MOE <10 es indicador para carcinógenos genotóxicos (99)

$$MOE_{Pb} = \frac{BMDL_{EFSA}}{IDT_{Pb}}$$

Donde:

- BMDL(EFSA)=0.50µg/kgxdía (neurodesarrollo infantil)
- BMDL(EFSA)=1.50 µg/kg·día (Presión arterial adultos)

V. RESULTADOS

V.1. Presentación y análisis de los resultados

A continuación, se presentan los resultados de la determinación de níquel (Ni), plomo (Pb) y mercurio total (Hg) obtenidos para las tres avícolas evaluadas (A, B y C). Cada avícola cuenta con tres subgrupos correspondientes a los mercados Santa Anita, Caquetá y Pro. Para cada subgrupo, se analizaron por separado las matrices yema y clara de huevo (ver anexo 3).

Los resultados se presentan de manera secuencial por matriz: en primer lugar, se muestran los correspondientes a la yema de huevo y, posteriormente, los de la clara. En cada tabla se incluyen los valores del límite de detección del método (LDM) y del límite de cuantificación del método (LCM) para cada metal evaluado.

Todos los resultados se expresan en mg/kg y corresponden a los valores reportados por el laboratorio para cada determinación analítica.

Tabla N° 6: Resultados del análisis de la yema de huevo.

Ubicación	Empresa	Parámetro	Unidad	LDM	LCM	Resultados
Santa Anita	AVÍCOLA "A"	Níquel (Ni)	mg/kg	0.0033	0.01	<0.01
		Plomo (Pb)	mg/kg	0.017	0.05	<0.05
		Mercurio (Hg)	mg/kg	0.0033	0.01	<0.01
Caquetá	AVÍCOLA "A"	Níquel (Ni)	mg/kg	0.0033	0.01	<0.01
		Plomo (Pb)	mg/kg	0.017	0.05	<0.05
		Mercurio (Hg)	mg/kg	0.0033	0.01	<0.01
Pro	AVÍCOLA "A"	Níquel (Ni)	mg/kg	0.0033	0.01	<0.01
		Plomo (Pb)	mg/kg	0.017	0.05	<0.05
		Mercurio (Hg)	mg/kg	0.0033	0.01	<0.01
Santa Anita	AVÍCOLA "B"	Níquel (Ni)	mg/kg	0.0033	0.01	<0.01
		Plomo (Pb)	mg/kg	0.017	0.05	<0.05
		Mercurio (Hg)	mg/kg	0.0033	0.01	<0.01
Caquetá	AVÍCOLA "B"	Níquel (Ni)	mg/kg	0.0033	0.01	<0.01
		Plomo (Pb)	mg/kg	0.017	0.05	<0.05
		Mercurio (Hg)	mg/kg	0.0033	0.01	<0.01
Pro	AVÍCOLA "B"	Níquel (Ni)	mg/kg	0.0033	0.01	<0.01
		Plomo (Pb)	mg/kg	0.017	0.05	<0.05
		Mercurio (Hg)	mg/kg	0.0033	0.01	<0.01
Santa Anita	AVÍCOLA "C"	Níquel (Ni)	mg/kg	0.0033	0.01	<0.01
		Plomo (Pb)	mg/kg	0.017	0.05	<0.05
		Mercurio (Hg)	mg/kg	0.0033	0.01	<0.01
Caquetá	AVÍCOLA "C"	Níquel (Ni)	mg/kg	0.0033	0.01	<0.01
		Plomo (Pb)	mg/kg	0.017	0.05	<0.05
		Mercurio (Hg)	mg/kg	0.0033	0.01	<0.01
Pro	AVÍCOLA "C"	Níquel (Ni)	mg/kg	0.0033	0.01	<0.01
		Plomo (Pb)	mg/kg	0.017	0.05	<0.05
		Mercurio (Hg)	mg/kg	0.0033	0.01	<0.01

Tabla N° 7: Resultados del análisis de la clara de huevo.

Ubicación	Empresa	Parámetro	Unidad	LDM	LCM	Resultado
Santa Anita	AVÍCOLA "A"	Níquel (Ni)	mg/kg	0.0033	0.01	<0.01
		Plomo (Pb)	mg/kg	0.017	0.05	<0.05
		Mercurio (Hg)	mg/kg	0.0033	0.01	<0.01
Caquetá	AVÍCOLA "A"	Níquel (Ni)	mg/kg	0.0033	0.01	<0.01
		Plomo (Pb)	mg/kg	0.017	0.05	<0.05
		Mercurio (Hg)	mg/kg	0.0033	0.01	<0.01
Pro	AVÍCOLA "A"	Níquel (Ni)	mg/kg	0.0033	0.01	<0.01
		Plomo (Pb)	mg/kg	0.017	0.05	<0.05
		Mercurio (Hg)	mg/kg	0.0033	0.01	<0.01
Santa Anita	AVÍCOLA "B"	Níquel (Ni)	mg/kg	0.0033	0.01	<0.01
		Plomo (Pb)	mg/kg	0.017	0.05	<0.05
		Mercurio (Hg)	mg/kg	0.0033	0.01	<0.01
Caquetá	AVÍCOLA "B"	Níquel (Ni)	mg/kg	0.0033	0.01	<0.01
		Plomo (Pb)	mg/kg	0.017	0.05	<0.05
		Mercurio (Hg)	mg/kg	0.0033	0.01	<0.01
Pro	AVÍCOLA "B"	Níquel (Ni)	mg/kg	0.0033	0.01	<0.01
		Plomo (Pb)	mg/kg	0.017	0.05	<0.05
		Mercurio (Hg)	mg/kg	0.0033	0.01	<0.01
Santa Anita	AVÍCOLA "C"	Níquel (Ni)	mg/kg	0.0033	0.01	<0.01
		Plomo (Pb)	mg/kg	0.017	0.05	<0.05
		Mercurio (Hg)	mg/kg	0.0033	0.01	<0.01
Caquetá	AVÍCOLA "C"	Níquel (Ni)	mg/kg	0.0033	0.01	<0.01
		Plomo (Pb)	mg/kg	0.017	0.05	<0.05
		Mercurio (Hg)	mg/kg	0.0033	0.01	<0.01
Pro	AVÍCOLA "C"	Niquel (Ni)	mg/kg	0.0033	0.01	<0.01
		Plomo (Pb)	mg/kg	0.017	0.05	<0.05
		Mercurio (Hg)	mg/kg	0.0033	0.01	<0.01

Los resultados obtenidos para las matrices de yema y clara de las tres avícolas evaluadas muestran una tendencia homogénea: todas las determinaciones de níquel (Ni), plomo (Pb) y mercurio total (Hg) se reportaron por debajo del límite de

cuantificación del método (LCM). Lo que significa que las concentraciones reales de los metales se encuentran por debajo de la capacidad de medición confiable del equipo analítico (ICP-OES), por lo que no es posible obtener un valor numérico exacto.

Asimismo, los valores de LCM reportados (Ni: 0.01 mg/kg; Pb: 0.05 mg/kg; Hg: 0.01 mg/kg) son inferiores a los límites máximos permisibles establecidos por la normativa alimentaria para plomo y mercurio, por lo que ninguna muestra presenta indicios de incumplimiento regulatorio. A continuación, se observa una tabla comparativa.

Tabla N° 8: Tabla comparativa entre limite normativos y resultados de lecturas de Pb y Hg

Avícola	Resultados Pb(mg/Kg)	Valor normativo para plomo (Pb)	Resultados Hg(mg/Kg)	Valor normativo para Mercurio (mg/Kg)
A	<0.05	0.10	<0.01	0.03
B	<0.05	0.10	<0.01	0.03
C	<0.05	0.10	<0.01	0.03

Dado que todas las determinaciones se encuentran por debajo del LCM, no es posible realizar comparaciones estadísticas entre avícolas, mercados o matrices, ya que no existen diferencias cuantificables entre los grupos. Esta uniformidad sugiere que los huevos evaluados no presentan una exposición significativa a metales pesados y que el riesgo asociado a su consumo es muy bajo.

Con respecto al Níquel (Ni), debido a que nos existe una normativa de límite máximo permisible, la EFSA nos permite medir la ingesta diaria tolerable para poder evaluar el nivel de exposición al níquel para determinar en qué concentraciones de consumo el níquel puede causar daño en las personas. Dicho esto, usaremos la siguiente fórmula para calcular la IDE y poder compararlo con la normativa de la EFSA.

$$IDE\left(\frac{ug}{Kg}x\frac{p.c}{día}\right) = \frac{C\left(\frac{ug}{kg}\right) \times Consumo\ de\ huevo(\frac{kg}{día})}{peso\ corporal\ (kg)}$$

Donde:

- C: Concentración de níquel en huevo (µg/kg) = 10 µg/kg
- Consumo promedio = 0.051 kg/día
- Peso corporal = 70 kg.

Para determinar el consumo promedio, usamos el boletín Estadístico Mensual de MIDAGRI 2025, donde nos indica que el consumo mensual de huevos por persona en Perú es de 26 huevos/mes.

Para determinar el consumo diario consideramos 30 días.

$$\frac{26}{30} = 0.867\ huevos/día$$

Para determinar el peso del huevo, usamos la Norma Técnica Peruana (NTP) emitida por INDECOPI, el peso de un huevo mediano va de 55.55g – 62.50g, para fines de cálculo usaremos el promedio de dicho rango, por tanto, el peso promedio de un huevo mediado sería 0.059 kg (100).

El consumo promedio kg/día se calcula multiplicando el consumo promedio de huevos mensual y el peso promedio de huevo consumido.

$$Consumo\ promedio = 0.867 \frac{huevos}{día} \times 0.059 \frac{kg}{huevo}$$

$$Consumo\ promedio = 0.051\ kg/día$$

Con respecto al peso corporal, la EFSA usa como peso promedio corporal 70 kg para realizar sus estimaciones, por este motivo también consideraremos dicho valor para estar alineados.

Finalmente, al reemplazar los valores y calculamos.

$$IDE = 0.0073 \frac{ug}{Kg} p.c/día$$

Tabla N° 9: Tabla comparativa entre el límite normativo de ide del Níquel (Ni)

Avícola	Resultado Ni (µg/kg de peso corporal por día)	Valor normativo para Níquel (Ni) EFSA
A	0.0073 µg/kg de peso corporal por día	13 µg/kg de peso corporal por día
B	0.0073 µg/kg de peso corporal por día	13 µg/kg de peso corporal por día
C	0.0073 µg/kg de peso corporal por día	13 µg/kg de peso corporal por día

En consecuencia, los resultados determinados para la Ingesta diaria estimada (IDE) del níquel, no supera el valor normativo estipulado por la EFSA.

A continuación, se evalúa el riesgo toxicológico asociado a la exposición alimentaria a plomo (Pb), níquel (Ni) y mercurio total (Hg) a través del consumo de huevos de gallina provenientes de las tres empresas avícolas estudiadas en Lima Metropolitana en yema y clara. Para esto, se calculó la Ingesta Diaria Estimada (IDE), el cociente de riesgo no cancerígeno (HQ), el índice de peligro (HI), así como el riesgo cancerígeno (CR) en aquellos metales para los cuales existe un factor de potencia cancerígena establecido. Los resultados obtenidos se presentan a continuación.

Ingesta diaria estimada (IDE)

La IDE se calculó a partir de las concentraciones promedio de Pb, Ni y Hg encontradas en las muestras analizadas, considerando el peso unitario del huevo y el consumo diario estimado para la población adulta.

Plomo (Pb)

$$IDE_{Pb}\ \text{(ug/kg p.c./día)} = 10\left(\frac{ug}{kg}\right) \times \frac{0.051(kg/día)}{70\ (kg)}$$

$$IDE = 0.042857 \approx 0.043\ \mu g/kg\ p.c./día$$

Níquel (Ni)

$$IDE_{Ni}\ \text{(ug/kg p.c./día)} = 10\left(\frac{ug}{kg}\right) \times \frac{0.051\ (kg/día)}{70\ (kg)}$$

$$IDE = 0.008571 \approx 0.0086\, \mu g/kg\ p.c./día$$

Mercurio (Hg)

$$IDE_{Hg}\ \text{(ug/kg p.c./día)} = 10\left(\frac{ug}{kg}\right) \times \frac{0.051\ (kg/día)}{70\ (kg)}$$

$$IDE = 0.008571 \approx 0.0086\, \mu g/kg\ p.c./día$$

Todas las concentraciones de Pb, Ni y HgT se encontraron por debajo del límite de cuantificación del método analítico tanto para yema y clara. Por tanto, se asume como concentración de exposición el valor del LCM de cada metal, siguiendo un enfoque conservador recomendado por la USEPA y EFSA.

Las IDE obtenidas fueron de 0.043 µg/kg p.c./día para Pb, 0.0086 µg/kg p.c./día para Ni y 0.0086 µg/kg p.c./día para HgT.

Cálculo del HQ (Riesgo no cancerígeno)

Usamos los siguientes datos:

$$HQ = \frac{IDT}{RfD}$$

RfD: Ni = 20; HgT = 0.1

HQ Ni

$$HQ_{Ni} = \frac{0.0086}{20} = 0.00043 \approx 0.0004$$

HQ HgT

$$HQ_{HgT} = \frac{0.0086}{0.1} = 0.086$$

El cociente de riesgo no cancerígeno (HQ) fue de 0.0004 para Ni y 0.086 para HgT, indica que no existe riesgo no cancerígeno asociado al consumo habitual de huevos en las condiciones evaluadas. En caso del Pb la USEPA no establece un RfD oficial, es por este motivo que no se calcula HQ para Pb.

Cálculo del HI (riesgo combinado)

$$HI = + HQ_{Ni} + HQ_{HgT}$$

$$HI = 0.0004 + 0.086 = 0.0864 \approx 0.09$$

HI < 1 → No hay riesgo no cancerígeno.

El índice de peligro total (HI) fue 0.098, valor inferior a 1, lo que indica que no existe riesgo no cancerígeno asociado al consumo habitual de huevos en las condiciones evaluadas.

Cálculo del CR (Riego cancerígeno)

Primero convertimos IDE a mg/kg/día:

- $Ni = \frac{0.0086}{1000} = \ 0.0000086 \ \text{mg/kg/día}$

SF: Ni = 0.91

CR Ni:

$$CR_{Ni} = 0.0000086 \times 0.91 = 7.826 \times 10^{-6} \approx \ 7.8 \ \times \ 10^{-6}$$

Este valor está en el rango aceptable de la USEPA (10^{-6} a 10^{-4}).

El riesgo cancerígeno (CR) estimado fue de 7.8 × 10^{-6} para Ni. Estos valores se encuentran dentro del rango aceptable establecido por la USEPA (10^{-6}–10^{-4}), por lo que no se evidencia un riesgo cancerígeno significativo asociado al consumo de huevos procedentes de las tres avícolas evaluadas. Para el caso del Pb y HgT no se evalúa el riesgo cancerígeno (CR), ya que no poseen una SF oral oficial por las entidades reguladoras internacionales.

Cálculo para el margen de exposición (MOE) para Plomo (Pb)

Usamos la siguiente fórmula:

$$MOE_{Pb} = \frac{BMDL_{EFSA}}{IDT_{Pb}}$$

Donde:

- BMDL(EFSA)=0.50µg/kgxdía (neurodesarrollo infantil)
- BMDL (EFSA)= 1.50 µg/kg·día (Presión arterial adultos)
- IDT_{Pb}= $0.043\ \mu g/kg\ p.c./día$

Para niños:

$$MOE_{Pb} = \frac{0.50\mu g/kgxdía}{0.043\ \mu g/kg\ p.c./día}$$

$$MOE_{Pb} = 11.6279 \cong 11.6$$

Se tiene un MOE de 11.6 lo que sugiere que no puede descartarse un riesgo potencial para el neurodesarrollo en niños bajo las condiciones evaluada.

Para Adultos:

$$MOE_{Pb} = \frac{1.50\ \mu g/kg \cdot día}{0.043\ \mu g/kg\ p.c./día}$$

$$MOE_{Pb} = 34.88 \cong 34.8$$

Se tiene un MOE de 34.8 lo que sugiere que la exposición estimada a plomo presenta un margen de seguridad reducido frente al punto de partida tóxico asociado a efectos cardiovasculares en adultos. Aunque el riesgo es menor que en población infantil, el valor obtenido sigue siendo bajo, por lo que no se descarta preocupación sanitaria en adultos.

V. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en el presente estudio muestran que todas las determinaciones de plomo (Pb), mercurio total (HgT) y níquel (Ni), tanto en yema como en clara, provenientes de las tres avícolas evaluadas en Lima Metropolitana, se encontraron por debajo del límite de cuantificación del método (LCM). Esto nos indica que, aun teniendo un enfoque conservador, es decir, asumiendo como concentración de exposición el valor del Límite de Cuantificación del Método (LCM), los valores estimados de Pb, Ni y Hg resultan muy bajos y no generan riesgo. En consecuencia, las concentraciones de Pb y HgT se posicionan debajo de los límites máximos permisibles establecidos internacionalmente,

En el caso del plomo, el valor asumido (<0.05 mg/kg) se encuentra por debajo del límite máximo permitido de 0.10 mg/kg, establecido por la normativa alimentaria internacional NOM-159-SSA1-1996 (México). Este hallazgo coincide con estudios realizados en regiones donde la presencia de Pb en huevos también mostró valores menores a los límites regulatorios, como lo reportado en Bosnia y Herzegovina por estudio previos (61) quienes encontraron concentraciones de Pb generalmente bajas en huevos de distintas zonas geográficas no urbanas relacionadas a la forma en la que estaban expuestos los huevos al medioambiente. Por otro lado, Yazdanparast et al. reportaron que la presencia de plomo en huevos de gallinas criadas en entornos urbanos está fuertemente asociada a la contaminación del suelo, demostrando que concentraciones elevadas de Pb en superficies de cultivo se reflejan directamente en los niveles detectados tanto en sangre de las aves como en sus huevos, del mismo modo también alerta que las gallinas más jóvenes (<12 meses) mostraron concentraciones más altas de Pb, probablemente por una mayor tasa de absorción durante las primeras etapas de desarrollo (101). En la misma línea Voica et al. evaluaron 70 huevos (210 matrices entre clara, yema y cáscara) de producción doméstica y comercial mediante ICP-MS, y observaron que, aunque existen diferencias medibles en el perfil elemental atribuibles al sistema de crianza y a factores ambientales/nutricionales, las concentraciones de metales tóxicos en la mayoría de las muestras se mantuvieron por debajo de los

máximos permitidos por la normativa rumana y europea, estos resultados respaldan nuestra interpretación de baja presión ambiental y bajo riesgo (42).

Con respecto al mercurio total, la concentración estimada (<0.01 mg/kg) se sitúa por debajo del límite internacional de 0.03 mg/kg, indicador de que no se evidencia una exposición significativa por esta vía alimentaria. Resultados similares han sido descritos en Bangladesh en la evaluación de metales tóxicos en huevos de gallina donde los niveles de Hg fueron considerablemente bajos (102). El comportamiento del HgT se alinea también con estudios globales que muestran que la deposición de mercurio en huevos suele ser baja, a menos que exista contaminación importante en el ambiente o en los insumos de alimentación (64). Por tanto, los resultados del presente estudio refuerzan la evidencia previa que posiciona al HgT en huevos como un contaminante de baja incidencia y concentración en sistemas avícolas convencionales.

En relación con el níquel (Ni), si bien no existe un límite máximo permisible en huevos, la evaluación toxicológica se basa en la comparación entre la ingesta diaria tolerable (TDI) propuesta por la EFSA (13 µg/kg p.c./día) y la ingesta diaria estimada a partir del consumo habitual de huevos en la población peruana. Bajo un enfoque conservador, que toma como concentración de exposición el LCM del método (0.01 mg/kg), la IDE calculada (0.0086 µg/kg p.c./día) representó una fracción mínima del umbral toxicológico y estuvo ampliamente por debajo del valor de referencia internacional. Este comportamiento es consistente con lo señalado por Hashemi et al. (92), donde la exposición al Ni a partir del consumo de huevos también mostró valores muy reducidos, sin representar riesgo significativo para la salud humana.

La uniformidad de las concentraciones por debajo del LCM en todas las avícolas, matrices y mercados evaluados sugiere que no existen diferencias atribuibles al origen de los huevos dentro del área de estudio. Esta homogeneidad puede estar relacionada con la similitud de prácticas alimentarias y ambientales entre las empresas evaluadas, esto también se ha evidenciado en otras investigaciones donde la variabilidad entre lotes o granjas fue baja en ausencia de fuentes específicas de contaminación.

En consecuencia, estos resultados no solo evidencian la ausencia de contaminación detectable por Pb, HgT y Ni en los huevos analizados, sino que también permiten ponernos en un mejor contexto ya que, nos permiten comparar estos hallazgos frente a la evidencia internacional, particularmente en países donde las condiciones ambientales, el sistema de crianza y la exposición a suelos, agua o alimentos contaminados generan concentraciones significativamente mayores. Esta comparativa resulta fundamental para comprender cómo los factores ambientales y productivos influyen en la calidad química del huevo lo cual sirve como base para la discusión integrada de varios aspectos estudiados en el presente estudio, donde se analizan tanto la comparación con normativas internacionales como la implicancia toxicológica derivada de la baja exposición observada en Lima Metropolitana.

Esto se evidencia en varios estudios. Por un lado, se reportó niveles significativamente elevados de Pb en huevos de Pakistán, alcanzando valores de 0.830 µg/g (≈0.83 mg/kg) en huevos domésticos, atribuibles a la exposición de descargas industriales, aguas residuales no tratadas y sistemas de crianza rurales donde el contacto con suelo, agua y materiales contaminados es frecuente (103). Resultados similares se documentaron en granjas comerciales, donde se obtuvo concentraciones similares de Pb, con valores entre 0.78 y 0.92 mg/kg, además de niveles elevados en otros metales pesados en huevos como en alimento y agua (59). Ambos estudios concluyen que el consumo de alimento y agua contaminados es la principal fuente de entrada de metales pesados en la cadena alimentaria. Lo cual contrasta directamente con nuestros resultados encontrados, ya que sugieren que los piensos utilizados por las avícolas peruanas están libres de contaminación metálica significativa, esta ausencia de metales cuantificables, indica que las granjas peruanas operan bajo condiciones ambientales y prácticas de manejo que limitan eficazmente la exposición a fuentes externas de contaminación, favoreciendo así la producción de huevos con adecuada inocuidad alimentaria.

Asimismo, estudios realizados en Rumania evaluaron huevos provenientes de granjas convencionales, orgánicas y de traspatio en Rumanía mediante ICP-OES, reportando concentraciones detectables pero bajas de Ni (0.094–0.235 mg/kg), Cd y Pb (48). Aunque estos valores no exceden normativas europeas, siguen siendo superiores a los obtenidos en el presente estudio. Los autores atribuyen estas variaciones en las concentraciones de metales pesados detectados a diferencias en el acceso al suelo, al tipo de alimentación y al sistema de crianza, destacando que huevos generados en sistemas orgánicos y de traspatio pueden acumular más minerales debido al forrajeo y al contacto con suelos mineralizados, condiciones que no se presentan en las avícolas peruanas evaluadas, donde las aves permanecen en ambientes controlados y sin acceso directo al exterior.

El contraste más evidente surge al analizar el estudio realizado en una zona minera de Tailandia que reportó valores significativamente elevados de Hg, Pb, Cd y Mn en huevos de patos en libre pastoreo y patos de sistemas semi-intensivos ubicados a <25 km de un área de extracción de oro (104) . En este escenario, el Hg se encontró notablemente elevado en albúmina, mientras que Pb y Mn se concentraron principalmente en la yema, evidenciando bioacumulación desde suelos agrícolas contaminados, cuerpos de agua superficiales y sedimentos urbanos (104). A diferencia de nuestras condiciones locales, el estudio tailandés muestra cómo la exposición crónica a fuentes metálicas presentes en suelos y agua influye directamente en la calidad química de los huevos (104).Esta comparación permite inferir que la ausencia de minería de oro o actividades industriales de gran escala en los alrededores de las avícolas limeñas es un factor determinante para la ausencia de metales pesados detectables, además que se conoce que la zona de minera intensiva se encuentra ubicadas en las zonas del sur del país.

Los cuatro estudios presentan una tendencia clara, las concentraciones de metales pesados en huevos reflejan directamente el sistema de crianza, las condiciones ambientales circundantes, la calidad del alimento y la exposición a fuentes de contaminación. Estudios donde las aves tienen acceso a suelos abiertos, cuerpos de agua no tratados, fertilizantes agrícolas o ambientes

industriales reportan niveles detectables e incluso elevados de Pb, Hg y Ni; mientras que sistemas confinados, con agua potable tratada y piensos regulados, como en las avícolas de Lima, muestran valores inferiores al LCM.

Esta interpretación se complementa si comparamos los resultados obtenidos con la NOM-159-SSA1-1996, esta nos muestra que las concentraciones <LCM de Pb y Hg se encuentran muy por debajo del límite máximo permisible (Pb = 0.10 mg/kg; Hg = 0.03 mg/kg). Del mismo modo, la estimación de la ingesta diaria estimada (IDE) de Ni utilizando un enfoque conservador indica que la exposición obtenida en nuestra población (0.0086 µg/kg p.c./día) representa menos del 0.066% del valor de referencia establecido por EFSA (13 µg/kg p.c./día), reforzando la baja probabilidad de riesgo significativo.

Los indicadores toxicológicos obtenidos muestran una exposición muy baja a metales pesados, tiene relación con las concentraciones <LCM observadas en todas las muestras. La ausencia de riesgo no cancerígeno para Ni y HgT, así como el riesgo combinado insignificante, esto se replica en estudios recientes que describen baja contribución de los huevos a la exposición dietaria total cuando la producción se realiza en sistemas controlados (5). En un estudio comparativo entre huevos de crianza ética y orgánicos de supermercado en Italia, las concentraciones de Pb en yema y clara fueron mayores en los huevos comerciales, el Hg estuvo ≤LOQ en yema y bajo en clara de huevos rurales, concluyéndose que las concentraciones no representan un riesgo para la salud del consumidor (5). Esto refuerza la idea que la contribución de los huevos al total de exposición dietaría es mínima. El níquel fue el único metal con evaluación cancerígena válida, cuyos valores se mantuvieron dentro de rangos aceptables internacionalmente, este resultado es coherente con escenarios de producción controlada descritos en la literatura y difiere de lo reportado en Bangladesh, donde el CR para Ni superó 10^{-4} debido a mayores concentraciones y patrones de consumo diferentes (105). Ninguno de los metales estudiados superara límites regulatorios o generara riesgo significativo, esto sugiere que las prácticas productivas de las avícolas evaluadas limitan de forma eficiente la contaminación

por metales pesados. Estos hallazgos coinciden con la literatura que describe bajos niveles de metales en sistemas avícolas controlados.

VI. CONCLUSIONES

1. Se cuantificaron las concentraciones de plomo (Pb), níquel (Ni) y mercurio total (Hg) en muestras de huevos de gallina procedentes de tres empresas avícolas de Lima Metropolitana, encontrándose que todos los valores analizados estuvieron por debajo de los límites de cuantificación del método (<0,05 mg/kg para Pb y <0,01 mg/kg para Ni y Hg).

2. Se compararon las concentraciones obtenidas de plomo (Pb) y mercurio total (Hg) con los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-159-SSA1-1996 (México), encontrándose que los valores reportados (<0.05 mg/kg para Pb y <0.01 mg/kg para Hg) se encuentran por debajo de los valores máximos permitidos (0.10 mg/kg para Pb y 0.03 mg/kg para Hg). A nivel nacional, no se dispone de límites máximos permisibles específicos para estos metales en huevos en la normativa peruana vigente. En el caso del níquel (Ni), no se dispone de un límite máximo permisible específico para huevos en normativas nacionales e internacionales, por lo que no se realizó comparación con dichos valores.

3. Se estimó la ingesta diaria estimada (IDE) de plomo, níquel y mercurio total utilizando como concentración de exposición el valor del límite de cuantificación del método y considerando el consumo promedio de huevos, obteniéndose valores de 0.043 µg/kg p.c./día para Pb, 0.0086 µg/kg p.c./día para Ni y 0.0086 µg/kg p.c./día para HgT.

4. Se evaluó el riesgo no cancerígeno mediante el cálculo del cociente de peligro (HQ) y del índice de peligro (HI) para níquel (Ni) y mercurio total (HgT),

obteniéndose valores de HQ de 0.0004 para Ni y 0.086 para HgT, y un valor de HI de 0.09. En el caso del plomo (Pb), se determinó un margen de exposición (MOE) de 11.6 para población infantil y 34.8 para población adulta.

5. Se evaluó el riesgo cancerígeno asociado al níquel (Ni) mediante la estimación del Riesgo Cancerígeno Incremental (ILCR), obteniéndose un valor de 7.8×10^{-6}, el cual se encuentra dentro del rango de referencia establecido por la USEPA ($10^{-6} – 10^{-4}$).

6. Se compararon los niveles de riesgo entre las tres empresas avícolas evaluadas, no se identificaron diferencias en los valores de HQ, HI, ILCR y MOE, presentándose valores similares entre las empresas analizadas.

Se determinaron las concentraciones de plomo (Pb), níquel (Ni) y mercurio total (Hg) en huevos de gallina comercializados por tres empresas avícolas de Lima Metropolitana, encontrándose valores por debajo del límite de cuantificación del método analítico. Asimismo, se evaluó el riesgo para la salud humana mediante los indicadores HQ, HI, ILCR y MOE, obteniéndose valores de HQ de 0.0004 para Ni y 0.086 para HgT, un HI de 0.09, un ILCR de 7.8×10^{-6} para Ni y valores de MOE de 11.6 para población infantil y 34.8 para población adulta.

VIII. RECOMENDACIONES

- Realizar un muestro mucho más grande y por tanto un mayor número de análisis de muestras en provincias con alta actividad minera, agrícola, metalúrgica entre otras.
- Incluir más empresas avícolas de Lima Metropolitana y de otras regiones del Perú para obtener un panorama nacional más representativo.
- Si el financiamiento no es un problema, se recomienda usar el equipo ICP-MS el cual es un equipo mucho más sensible, para la determinación de dichos metales pesados analizados en el presente estudio y a su vez realizar análisis complementarios como la especiación química del mercurio para diferenciar entre Hg total y metilmercurio, aportando un mejor entendimiento del riesgo toxicológico.
- Considerar realizar una evaluación por separado de huevos de gallina producidos en granjas industriales y otros producidos de manera cotidiana con gallinas de traspatio, que se encuentren en entornos donde las actividades industriales sean diversas, con el fin de comparar los niveles de contaminación y evaluar diferencias en el riesgo asociado en ambos grupos.
- Incorporar la evaluación directa de posibles fuentes de contaminación (agua de bebida, alimento balanceado, suelo de los galpones), con el fin de identificar el origen específico del Pb, Ni y Hg detectados.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abdelmonem BH, Kamal LT, Elbaz RM, et al. From contamination to detection: The growing threat of heavy metals. Heliyon [Internet]. 2025 Jan 15; 11(1). [citado 16 junio 2025]. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e41713
2. Gu YG, Li QS, Fang JH, et al. Identificación de fuentes de metales pesados en los suelos agrícolas recuperados del estuario del río Perla en China mediante un enfoque geoestadístico multivariado. Ecotoxicol Environ Saf [Internet]. 2014 Jul; 105:7–12. [citado 16 junio 2025]. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.04.003
3. Metales pesados en la producción ganadera lechera y riesgos a la salud humana. Ciencia Latina [Internet]. 2022;6(1) [citado 31 octubre 2024], 3629–45. Disponible en: http://dx.doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i1.1758
4. Saad El Din WF. Residuos de algunos metales pesados tóxicos y oligoelementos en huevos de gallina [Internet]. 48.ª ed. Egipto: Researchgate; 2018 [citado 24 octubre 2024]. Disponible en: https://doi.org/10.3390/agronomy13061521
5. Guerrini A, Roncada P, Al-Qudah KM, Isani G, Pacicco F, Peloso M, et al. Content of toxic elements (arsenic, cadmium, mercury, lead) in eggs from an ethically managed laying hen farm. Animals (Basel) [Internet]. 2024;14(7):1133. Disponible en: http://dx.doi.org/10.3390/ani14071133
6. Adnan M, Xiao B, Xiao P, Zhao P, Li R, Bibi S. Research progress on heavy metals pollution in the soil of smelting sites in China. Toxics [Internet]. 2022;10(5). [citado 30 octubre 2024] Disponible en: http://dx.doi.org/10.3390/toxics10050231
7. Hubeny J, Harnisz M, Korzeniewska E, Buta M, Zieliński W, Rolbiecki D, et al. Industrialization as a source of heavy metals and antibiotics which can enhance the antibiotic resistance in wastewater, sewage sludge and river water. [Internet]. 2021;16(6). [citado 27 octubre 2024] Disponible en: http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0252691

8. Asociación Peruana de Avicultura. Consumo per cápita nacional de huevo – Boletín noviembre 2023 [Internet]. Lima: APA; 2023 [citado el 17 de junio de 2025]. Disponible en: https://apa.org.pe/boletin-noviembre-2023.pdf
9. Cortez SM. Composición nutricional del huevo y sus beneficios en la dieta humana [Internet]. Huancavelica: Universidad Nacional de Huancavelica; 2020 [citado el 17 de junio de 2025]. Disponible en: https://core.ac.uk/download/pdf/323348774.pdf
10. Muñoz Chávez E. Composición, estructura y valor nutritivo del huevo de gallina [Internet]. Huánuco: Universidad Nacional Hermilio Valdizán; 2022 [citado el 17 de junio de 2025]. Disponible en: https://repositorio.unheval.edu.pe/backend/api/core/bitstreams/95100143-aa01-449f-87e0-96465fc669d9/content
11. Rivera Chota R. Evaluación físico-química del huevo de gallina y sus componentes [Internet]. Lima: Universidad Privada Norbert Wiener; 2023 [citado el 17 de junio de 2025]. Disponible en: https://repositorio.uwiener.edu.pe/server/api/core/bitstreams/af64adc1-b715-48d9-9a17-06af7ce45c26/content
12. MIDAGRI. Producción de huevo de gallina en Perú en 2022–2023 [Internet]. Lima: Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego; 2024 [citado el 17 de junio de 2025]. Disponible en: https://agraria.pe/produccion-huevo-2023
13. Avinews.com. Perú: recuperación de producción de huevos en 2024 [Internet]. Santiago de Chile: Grupo de Comunicación Agrinews; 2025 [citado el 17 de junio de 2025]. Disponible en: https://avinews.com/crecimiento-del-sector-avicola-2024
14. Walac.pe. El Perú produce 503.1 mil toneladas de huevo al año y el consumo alcanza 14.9 kg por persona [Internet]. Piura: Walac Noticias; 2024 [citado el 17 de junio de 2025]. Disponible en: https://walac.pe/el-peru-produce-503-1-mil-toneladas-de-huevo
15. Agraria.pe. Producción de huevo por parte de Perú alcanzó las 503 080 toneladas en 2023 (datos de Lima) [Internet]. Lima: Agraria.pe; 2024 [citado el

17 de junio de 2025]. Disponible en: https://agraria.pe/noticias/produccion-de-huevo-por-parte-de-peru-alcanzo-las-503-080-to-37287

16. Gestión / Actualidad Avipecuaria. Población de gallinas ponedoras en Perú [Internet]. Lima: PymeTV; 2024 [citado el 17 de junio de 2025]. Disponible en: https://pymetv.pe/apa-produccion-de-huevos-en-peru-registra-crecimiento-anual-de-38
17. Agraria.pe. Producción de huevos en Perú alcanzó las 442 500 toneladas en 2025. [citado el 22 de febrero del 2026].Disponible en: https://agraria.pe/noticias/produccion-de-huevos-en-peru-alcanzo-las-442-500-toneladas-e-41669
18. MIDAGRI. Informe técnico: insumos maíz y soya en avicultura [Internet]. Lima: Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego; 2023 [citado el 17 de junio de 2025]. Disponible en: https://repositorio.midagri.gob.pe/bitstream/20.500.13036/1450/1/Producci%C3%B3n%20y%20Comercializaci%C3%B3n%20de%20los%20Productos%20Av%C3%ADcolas%20abril%202023.pdf
19. Köprü S, Çadır M, Soylak M. Investigación de oligoelementos en alimentos veganos mediante ICP‐MS después de la digestión por microondas. Biol Trace Elem Res [Internet]. 2022;200(5):2258–67. [citado el 17 de junio de 2025]. Disponible en: https://doi.org/10.1007/s12011-022-03106-9
20. Aljohani ASM. Toxicidad por metales pesados en aves de corral: una revisión exhaustiva. Front Vet Sci [Internet]. 2023;10:10340091. [citado el 17 de junio de 2025] Disponible en: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10340091/
21. Rashid A, Schutte BJ, Ulery A, Deyholos MK, Sanogo S, Lehnhoff EA, et al. Heavy metal contamination in agricultural soil: Environmental pollutants affecting crop health. Agronomy (Basel) [Internet]. 2023;13(6):1521. [citado el 17 de junio de 2025] Disponible en: https://doi.org/10.3390/agronomy13061521
22. Jianfei C, Li C, Wu Q, et al. Source apportionment of potentially toxic elements in soils using APCS/MLR, PMF and geostatistics in a typical industrial and

mining city in Eastern China. Ecotoxicol Environ Saf [Internet]. 2020. [citado el 17 de junio de 2025]. Disponible en: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0238513

23. Raj K, Prasad D. Contaminación por plomo: impacto en el medio ambiente y la salud humana y enfoque para una solución sostenible. Environmental Chemistry and Ecotoxicology [Internet]. 2023;5(1):79-85. [citado el 17 de junio de 2025] Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.enceco.2023.02.001
24. Singh Rana SV. Metales y apoptosis: desarrollos recientes. J Trace Elem Med Biol [Internet]. 2018;45:1–10. [citado el 17 de junio de 2025] Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2008.08.002
25. Briffa J, Sinagra E, Blundell R. Contaminación por metales pesados en el medio ambiente y sus efectos toxicológicos en los seres humanos. Heliyon [Internet]. 2020;6(9):e04691. [citado el 17 de junio de 2025] Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04691
26. Mohammadi F, Saif M. A comprehensive overview of the electric vehicle batteries market. e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy [Internet]. 2023;3(100127):100127. . [citado el 17 de junio de 2025] Disponible en: http://dx.doi.org/10.1016/j.prime.2023.100127
27. Calleja CA, Franco Abuín CM, Rafecas Martínez M, et al. Informe del Comité Científico de la Agencia Española de Seguridad Alimentaria y Nutrición (AESAN) sobre el riesgo asociado a la presencia de níquel en alimentos para población sensibilizada a este metal [Internet]. España: AESAN; 2021. [citado el 17 de junio de 2025] Disponible en: https://www.aesan.gob.es/AECOSAN/docs/documentos/seguridad_alimentaria/evaluacion_riesgos/informes_comite/NIQUEL_ALIMENTOS.PDF
28. Roshed M, Asaduzzaman M. Los metales pesados en las aves de corral y su amenaza para la salud humana: una mini revisión [Internet]. Bangladesh: ResearchGate; 2023 [citado 3 noviembre 2024]. Disponible en: http://dx.doi.org/10.36348/merjhss.2023.v03i04.006
29. De la Cueva F, Naranjo A, Puga Torres B. Presencia de metales pesados en leche cruda bovina de Machachi, Ecuador [Internet]. Ecuador: SciELO; 2021

[citado 2 noviembre 2024]. Disponible en: https://doi.org/10.17163/lgr.n33.2021.02

30. Executive Director, Operativa G. evaluación del riesgo [Internet]. Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria. [citado el 09 de setiembre del 2025]. Disponible en: https://www.efsa.europa.eu/es/glossary/risk-assessment
31. Módulo III - Introducción a la evaluación de riesgo [Internet]. Cdc.gov. 2019 [citado el 09 de setiembre del 2025]. Disponible en: https://archive.cdc.gov/www_atsdr_cdc_gov/es/training/toxicology_curriculum/modules/3/es_lecturenotes.html
32. United States Environmental Protection Agency (EPA). Human Health Risk Assessment Protocol for Hazardous Waste Combustion Facilities [Internet]. setiembre del 2005. Disponible en: https://archive.epa.gov/epawaste/hazard/tsd/td/web/pdf/05hhrapcover.pdf
33. Gobierno de México. Norma Oficial Mexicana NOM-159-SSA1-1996, Bienes y servicios. Huevo, sus productos y derivados. Disposiciones y especificaciones sanitarias [Internet]. México: Secretaría de Salud; 1996 [citado 11 nov 2024]. Disponible en: https://salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/159ssa16.html
34. EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM). Scientific Opinion on the risks to public health related to the presence of nickel in food and drinking water [Internet]. EFSA Journal. 2015;13(2):4002. [citado 11 nov 2024]. Disponible en: https://efsa.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.2903/j.efsa.2015.4002
35. Unión Europea. Reglamento (UE) 2024/1987 de la Comisión de 15 de marzo de 2024 por el que se establecen los límites máximos de níquel en determinados productos alimenticios [Internet]. Diario Oficial de la Unión Europea; 2024 [citado 11 nov 2024]. Disponible en: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/ALL/?uri=OJ%3AL_202401987
36. Codex Alimentarius. General standard for contaminants and toxins in food and feed: Codex Stan 193-1995 (Actualizado 2018) [Internet]. Roma: FAO/OMS; 2018 [citado 12 nov 2024]. Disponible en:

https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/livestockgov/documents/CXS_193s.pdf

37. Ministerio de Salud del Perú. Decreto Supremo N.° 004-2011-SA que aprueba el Reglamento sobre Vigilancia y Control Sanitario de Alimentos y Bebidas [Internet]. Lima: MINSA; 2011 [citado 11 nov 2024]. Disponible en: https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1182663/004-2011-AG20200802-1197146-3tartz.pdf?v=1596385070
38. Organización Internacional de Normalización (ISO). ISO 22000:2018. Sistemas de gestión de la inocuidad de los alimentos – Requisitos para cualquier organización en la cadena alimentaria. [Internet]. Ginebra: ISO; 2018 [citado 12 nov 2024]. Disponible en: https://www.iso.org/standard/65464.html
39. Lee J, Park YS, Lee HJ, Koo YE. Microwave-assisted digestion method using diluted nitric acid and hydrogen peroxide for the determination of major and minor elements in milk samples by ICP-OES and ICP-MS. *Food Chem* [Internet]. 2022;373:131483. [citado 18 jun 2025]. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131483
40. Senila M. Recent Advances in the Determination of Major and Trace Elements in Plants Using Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES). *Molecules* [Internet]. 2024 Jul 3;29(13):3169. [citado 18 jun 2025]. Disponible en: https://doi.org/10.3390/molecules29133169
41. Koch W, Czop M, Iłowiecka K, Nawrocka A, Wiącek D. Dietary intake of toxic heavy metals with major groups of food products: results of analytical determinations. Food Chem Toxicol [Internet]. 2022;159:112739. [citado 18 jun 2025]. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.fct.2022.112739
42. Voica C, Cristea G, Iordache A, Roba C, Geamănă M, Iordache M, et al. Elemental profile in chicken egg components and associated human health risk assessment. Toxics [Internet]. 2023 Nov 3;11(11):900. [citado 18 jun 2025]. Disponible en: https://doi.org/10.3390/toxics11110900
43. Farajzadeh MA, Afshar Mogaddam MR, Bahram M, et al. Ultrasound-assisted extraction combined with ICP-MS for trace metal determination in eggs. Hazard

Adv [Internet]. 2024;5:100509. [citado 18 jun 2025]. Disponible en: http://dx.doi.org/10.1016/j.hazadv.2024.100509

44. Fan W, Zhao H, Song X, Liu Y, Liu X, Wang Y, et al. Ultrasound-assisted dispersive liquid–liquid microextraction combined with ICP-MS for the determination of heavy metals in food samples. Food Chem [Internet]. 2020;321:126939. [citado 18 jun 2025]. Disponible en: http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126939
45. Khan SR, Sharma B, Chawla PA, Bhatia R. Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES): a powerful analytical technique for elemental analysis. Food Anal Methods [Internet]. 2022;15:666–88. [citado 18 jun 2025]. Disponible en: https://doi.org/10.1007/s12161-021-02148-4
46. Douvris C, Vaughan T, Bussan D, et al. How ICP-OES changed the face of trace element analysis: Review of the global application landscape. Sci Total Environ [Internet]. 2023;905:167242. [citado 18 jun 2025]. Disponible en: https://www.unine.ch/npac/wp-content/uploads/sites/140/Review-global-application-landscape_ICPOES.pdf
47. Biswas M, Annana RP, Kundu GK, et al. Estimation of heavy metals in egg varieties: A potential risk assessment for human health. Food Control [Internet]. 2025 May;171:111107. [citado 18 jun 2025]. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.111107
48. Kirov PM, Karadjov M, Hristov HK, Alexandrova R, et al. Comparative study of metal concentration determination in albumen of hen eggs originating from industrial poultry farms, backyard and free-range hens using ICP-OES technique. Biol Risk [Internet]. 2023. [citado 18 jun 2025]. Disponible en: https://doi.org/10.3897/biorisk.20.97322
49. Santisteban O. Comparación de los niveles de arsénico, cadmio, mercurio y plomo en piensos y huevos de codorniz (*Coturnix coturnix japonica*), producidos en empresas formales e informales y comercializados en mercados, supermercados y ambulatoriamente en la región Lima, mediante espectrofotometría de absorción atómica y espectrometría de plasma acoplado inductivamente [Internet]. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos;

2021 [citado 19 jun 2025]. Disponible en: https://hdl.handle.net/20.500.12672/17195

50. González S. Determinación cuantitativa de plomo, cadmio y mercurio en huevos de gallina de venta en mercados populares del cono norte de Lima – Perú [Tesis de licenciatura en Internet]. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos; 2015 [citado 2025 jun 19]. Disponible en: https://core.ac.uk/download/pdf/323348774.pdf
51. Proleón Valladares JN, Siccha Méndez CA. Riesgos por contaminación con metales pesados en alimentos en Perú: metaanálisis [Internet]. Lima: Universidad privada Norbert Wiener; 2021 [citado 18 jun 2025]. Disponible en: https://repositorio.uwiener.edu.pe/server/api/core/bitstreams/49770725-32c2-4cea-b19b-f0ada055aeb3/content
52. Delgado Machado AA. Determinación de la concentración de mercurio en huevos (clara y yema) de gallina (Gallus gallus domesticus) expendidos en supermercados del distrito de Villa El Salvador en Lima [Tesis de licenciatura en Internet]. Lima: Universidad Nacional Hermilio Valdizán; 2021 [citado 23 jun 2025]. Disponible en: https://repositorio.unheval.edu.pe/backend/api/core/bitstreams/95100143-aa01-449f-87e0-96465fc669d9/content
53. Kabeer MS, Hameed I, Kashif S-U-R, Khan M, Tahir A, Anum F, et al. Contamination of heavy metals in poultry eggs: a study presenting relation between heavy metals in feed intake and eggs. Arch Environ Occup Health [Internet]. 2021;76(4):220–32. Disponible en: http://dx.doi.org/10.1080/19338244.2020.1799182
54. Hoseini H, Mohammadi-Nasrabadi F, Abedi A, et. Al. “Residuos de metales pesados (As, Cd, Hg y Pb) en huevos de gallina tras aplicar diferentes métodos de cocción” J Environ Public Health [Internet]. 2023 [citado 23 jun 2025];2023:5542051. Disponible en: https://doi.org/10.1155/2023/5542051
55. Aliu H, Dizman S, Sinani A, et al., “Estudio comparativo de la concentración de metales pesados en huevos de granjas avícolas industriales y de gallinas

camperas en Kosovo" Kosovo [Internet]. 2021 [citado 23 jun 2025]. Disponible en: https://doi.org/10.1155/2021/6615289

56. Samad A, Roy D, Hasan MM, et al. "Ingesta de metales tóxicos a través del consumo de huevos en la dieta y evaluación de su posible riesgo para la salud de los habitantes de la capital, Dhaka". Bangladesh [Internet]. 2023 [citado 25 jun 2025]. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.105104
57. Khan S, Shi X, Cai R, et al. "Evaluación del rendimiento, calidad del huevo, análisis sérico, acumulación de metales pesados y metales traza esenciales en huevos y tejidos de gallinas ponedoras alimentadas con harina de larvas de mosca soldado negra (Hermetia illucens)". China [Internet]. 2024 [citado 25 jun 2025]. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.psj.2024.104315
58. Atamaleki A, Sadanib M, Raoofi A, et al. "Concentración de elementos potencialmente tóxicos (EPT) en huevos: una revisión sistemática global, un metanálisis y una evaluación probabilística del riesgo para la salud". Brasil [Internet]. 2020 [citado 25 jun 2025]. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.11.003
59. Abedi A, Hoseini H, Mohammadi-Nasrabadi F, et al. Evaluación de los riesgos para la salud del consumidor derivados del arsénico y el mercurio en los huevos de gallina mediante simulaciones de Monte Carlo. Irán [Internet]. 2023 [citado 25 jun 2025]. Disponible en: https://doi.org/10.1186/s12889-023-16223-4
60. Chowdhury Z, Abir M, Meherun N, et al. Evaluación de metales pesados tóxicos y oligoelementos en alimentos para aves de corral, pollos de consumo y huevos en Bangladesh. Bangladesh [Internet]. 2021 [citado 25 jun 2025]. Disponible en: https://doi.org/10.3329/aajbb.v6i3.57715
61. Vehab A, Huremović J, Žero S, et al. "Contenido de metales esenciales y tóxicos en huevos de gallina en diferentes áreas geográficas de Bosnia y Herzegovina" Bosnia y Herzegovina [Internet]. 2019 [citado 26 jun 2025]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/332876070_ESSENTIAL_AND_TOXIC_METALS_CONTENT_IN_HEN_EGGS_AT_DIFFERENT_GEOGRAPHIC_AREA_IN_BOSNIA_AND_HERZEGOVINA

62. Wang S, Li Q, Gao Y, et al. "Influencias de la exposición al plomo en su acumulación en órganos, carne, huevos y huesos durante el periodo de puesta de las gallinas" China [Internet]. 2021 [citado 26 jun 2025]. Disponible en: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814621020536
63. Suryapratap R, Vashishth R,. From water to plate: Reviewing the bioaccumulation of heavy metals in fish and unraveling human health risks in the food chain. Environ Chall [Internet]. 2024; 16:100358. [citado 26 junio 2025]. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.emcon.2024.100358
64. Nnaji D, Onyeaka H, Miri T, et al. Bioaccumulation for heavy metal removal: a review. SN Appl Sci [Internet]. 2023; 5:351. [citado 26 junio 2025]. Disponible en: https://doi.org/10.1007/s42452-023-05351-6
65. Breysse PN. Toxicological profile for lead [Internet]. Atlanta (GA): U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service; 2020 [citado 27 jun 2025]. Disponible en: https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp13.pdf
66. World Health Organization (WHO). WHO guideline for clinical management of exposure to lead [Internet]. Geneva (CH): World Health Organization; 2021 [citado 27 jun 2025]. Disponible en: https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/347360/9789240037045-eng.pdf?sequence=1
67. Ali Daoud Y, Tebby C, Beaudouin R, Brochot C. Desarrollo de un modelo toxicocinético de base fisiológica para el plomo en mujeres embarazadas: el papel del tejido óseo en la exposición interna materna y fetal. Toxicol Appl Pharmacol [Internet]. 2023;476:116651. [citado 27 jun 2025]. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.taap.2023.116651
68. Reh CM. "Toxicological Profile for Mercury" Estados Unidos [Internet]. 2024 [citado 27 jun 2025]. Disponible en: https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp46.pdf
69. Wu YS, Osman AI, Hosny M, et al. "The Toxicity of Mercury and Its Chemical Compounds: Molecular Mechanisms and Environmental and Human Health Implications: A Comprehensive Review" China [Internet]. 2024;9:5100–5126 [citado 27 jun 2025]. Disponible en:

https://doi.org/10.1021/acsomega.3c07047?urlappend=%3Fref%3DPDF&jav=VoR&rel=cite-as

70. Pope Q, Rand MD. "Variación del metabolismo y la eliminación del metilmercurio en humanos: el modelado farmacocinético fisiológico destaca el papel de la biotransformación intestinal, el músculo esquelético y el cabello" Estados Unidos [Internet]. 2021;180(1):26–37 [citado 27 jun 2025]. Disponible en: https://doi.org/10.1093/toxsci/kfaa192
71. Buxton S, Garman E, Heim KE, et al. Concise review of nickel human health toxicology and ecotoxicology. Inorganics [Internet]. 2019; 7(89). [citado 30 junio 2025]. Disponible en: https://doi.org/10.3390/inorganics7070089
72. Dorman DC, Buxton S, Orisakwe OE. Toxicological profile for nickel (ATSDR). Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), United States [Internet]. 2023 ago. [citado 30 junio 2025]. Disponible en: https://downloads.regulations.gov/ATSDR-2023-0004-0004/content.pdf
73. Deeb AK, Bialy BE, Borai NB, et al. Nickel: A review on environmental distribution, toxicokinetics, and potential health impacts. Journal of Current Veterinary Research [Internet]. 2025; [citado 30 junio 2025]. Disponible en: https://dx.doi.org/10.21608/jcvr.2025.421725
74. EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM). Update of the risk assessment of nickel in food and drinking water. EFSA Journal [Internet]. 2020;18(11):6268. [citado 1 julio 2025]. Disponible en: https://doi.org/10.2903/j.efsa.2020.6268
75. Larras J. Toxicodynamics: Mechanistic Insights into Cellular and Molecular Responses to Toxicants. J Cell Mol Pharmacol [Internet]. 2024; vol. 8(4). [citado 2 julio 2025]. Disponible en: https://www.omicsonline.org/open-access/toxicodynamics-mechanistic-insights-into-cellular-and-molecularresponses-to-toxicants.pdf
76. Elnabi M, Elkaliny N, Elyazied M, et al. Toxicidad de los metales pesados y avances recientes en su eliminación: una revisión. Toxics [Internet]. 2023 [citado 2 jul 2025];11(7):580. Disponible en: https://doi.org/10.3390/toxics11070580

77. Azab S, Mahmoud G, Elgendy M, et al. Metal-induced oxidative stress: Mechanisms, biomarkers, and health effects. In: Nabavi SM, editor. Metal Toxicology From Exposure to Molecular Effects [Internet]. IntechOpen; 2024 [citado 2 jul 2025]. Disponible en: https://www.intechopen.com/chapters/1190949
78. Ghizal F, Fedacko J, Dhole P, et al. Heavy Metal Exposure and Its Health Implications: A Comprehensive Examination. [Internet]. 2025 [citado 2 jul 2025];5(1):1–13. Disponible en: https://doi.org/10.20944/preprints202412.0606.v1
79. Wei W, Wu X, Bai Y, Li G. Lead exposure and its interactions with oxidative stress polymorphisms on lung function impairment: Results from a longitudinal population-based study [Internet]. 2020 [citado 3 jul 2025];189:109645. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109645
80. Tobalu FO, Enogieru AB. Lead neurotoxicity in experimental models: A systematic review on effects on the cerebrum, cerebellum, and hippocampus [Internet]. 2025 [citado 3 jul 2025];14:102044. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2025.102044
81. Harshitha P, Bose K, Dsouza HS. Influence of lead-induced toxicity on the inflammatory cytokines [Internet]. 2024 [citado 3 jul 2025];503:153771. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.tox.2024.153771
82. Kang B, Wang J, Guo S, Yang L, et al. Mercury-induced toxicity: Mechanisms, molecular pathways, and gene regulation [Internet]. 2024 [citado 4 julio 2025];943:173577. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173577
83. Neisi A, Koshki Nasab F, Sepahvand A, et al. Exposure to Mercury in the Air and Its Effect on Cardiovascular Diseases (CVD): A Systematic Review [Internet]. 2024 [citado 4 julio 2025];53(5):1033–1046. Disponible en: https://doi.org/10.18502/ijph.v53i5.15583
84. Vidal L,Pérez P, Ávila J, et al. Nuclear factor erythroid 2 – related factor 2 and its relationship with cellular response in nickel exposure: a systems biology

analysis [Internet]. 2019 [citado 4 jul 2025]; 20(1):48. Disponible en: https://doi.org/10.1186/s40360-019-0360-4

85. Genchi G, Carocci A, Lauria G, et al. Nickel: Human Health and Environmental Toxicology [Internet]. 2020 [citado 4 jul 2025];17(3):679. Disponible en: https://doi.org/10.3390/ijerph17030679
86. Zhang F, He F, Li L. et al. Bioavailability based on the gut microbiota: a new perspective [Internet]. 2020 [citado 9 julio 2025];84(2):e00072-19. Disponible en: https://doi.org/10.1128/MMBR.00072-19
87. Bhalani V, Nutan B, Avinash K, et al. Bioavailability enhancement techniques for poorly aqueous soluble drugs and therapeutics [Internet]. 2022 [citado 9 julio 2025];10(9):2055. Disponible en: https://doi.org/10.3390/biomedicines10092055
88. Donzelli G, Gehring R, Murugadoss S, et al. A critical review on the toxicological and epidemiological evidence integration for assessing human health risks to environmental chemical exposures [Internet]. Rev Environ Health. 2025 [citado 9 julio 2025];40(2):427–436. Disponible en: https://doi.org/10.1515/reveh-2024-0072
89. Ngwenya J, Hattingh A, Muzenda E et al. Current approaches and challenges in toxicological risk assessment and regulation [Internet]. Int J Environ Res Public Health. 2023 [citado 9 julio 2025];20(23):7050. Disponible en: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10655695
90. Sampieri RH, Collado CF, Lucio MP. Metodología de la investigación. 6ª ed. México: McGraw-Hill; 2014
91. Secretaría de Salud. 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. Ciudad de México: Secretaría de Salud; 1995 [citado el 03 de marzo de 2026]. Disponible en: 117-SSA1.DOC
92. Hashemi M, Sadeghi A, Saghi M, Aminzare M, Raeisi M, Rezayi M, et al. Health risk assessment for human exposure to trace metals and arsenic via

consumption of hen egg collected from largest poultry industry in Iran. Biol Trace Elem Res [Internet]. 2019 [citado el 15 de noviembre de 2024];188(2):485–93. Disponible en: https://link.springer.com/article/10.1007/s12011-018-1437-4

93. Farahani S, Eshghi N, Abbasi A, Karimi F, Shiri Malekabad E, Rezaei M. Determination of heavy metals in albumen of hen eggs from the Markazi Province (Iran) using ICP-OES technique. Toxin Rev [Internet]. 2015;34(2):96–100. Disponible en: http://dx.doi.org/10.3109/15569543.2015.1040166
94. Food Safety and Standards Authority of India. Manual of Methods of Analysis of Foods: Metals. New Delhi: Ministry of Health and Family Welfare, Government of India; 2016 [citado el 03 de marzo de 2026]. Disponible en: Manual_Metals_25_05_2016(1).pdf
95. Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. Dirección General de Estadística, Seguimiento y Evaluación de Políticas. Boletín Estadístico Mensual de la "Producción y Comercialización de Productos Avícolas" [Internet]. N.º 10. Año: 2025. Lima: Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego; 2025 [citado el 03 de marzo de 2026]. Disponible en: https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/9239796/6617104-boletin-sobre-produccion-y-comercializacion-avicola-octubre-2025.pdf?v=1767630506
96. U.S. Environmental Protection Agency. Integrated Risk Information System (IRIS): Nickel, soluble salts (CASRN Various). Washington (DC): U.S. EPA; 1994. Disponible en: https://iris.epa.gov/static/pdfs/0271_summary.pdf
97. U.S. Environmental Protection Agency. Integrated Risk Information System (IRIS): Methylmercury (MeHg) (CASRN 22967-92-6). Washington (DC): U.S. EPA; 2001. Disponible en: https://iris.epa.gov/static/pdfs/0073_summary.pdf
98. Office of Environmental Health Hazard Assessment (OEHHA). Nickel Hydroxide [Internet]. Sacramento (CA): State of California; c2026 [citado el 24 de marzo de 2026]. Disponible en: https://oehha.ca.gov/chemicals/nickel-hydroxide

99. Aitsaam U. EFSA guidance on lead, arsenic, mercury, cadmium, and nickel: European limits and scientific basis [Internet]. Heavy Metal Tested; 2025 [citado el 03 de marzo de 2026]. Disponible en: EU Heavy Metal Limits in Food (2025): EFSA Risk & MLs
100. INDECOPI. NTP 011.219:2015. Huevos. Huevos de gallina. Requisitos y clasificación. 2.ª edición [Internet]. Lima: Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual; 2015 [citado el 12 de marzo de 2026]. Disponible en: https://prod4.seace.gob.pe/documentos/documentos/FichaSubInv/20082024113938.pdf
101. Yazdanparast T, Strezov V, Wieland P, Lai Y-J, Jacob DE, Taylor MP. Lead poisoning of backyard chickens: Implications for urban gardening and food production. Environ Pollut [Internet]. 2022;310(119798):119798. Disponible en: http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119798
102. Ullah AKMA, Afrin S, Hosen MM, Musarrat M, Ferdoushy T, Nahar Q, et al. Concentration, source identification, and potential human health risk assessment of heavy metals in chicken meat and egg in Bangladesh. Environ Sci Pollut Res Int [Internet]. 2022;29(15):22031–42. Disponible en: http://dx.doi.org/10.1007/s11356-021-17342-4
103. Aslam MU, Zeeshan HM, Mehdi W, Tariq D, Husnain G, Aslam E, et al. Assessment of heavy metals in table eggs: Sources of contamination, associated health risks, and potential outcomes. Insights-Journal of Health and Rehabilitation [Internet]. 2025;3(`4 (Health and Allied)):368–75. Disponible en: http://dx.doi.org/10.71000/8qh1v806
104. Aendo P, Mingkhwan R, Senachai K, Pinniam N, Sonthong K, Tulayakul P. Heavy metal contamination in eggs on poultry farms and ecological risk assessment around a gold mine area in northern Thailand. Environ Geochem Health [Internet]. 2024;46(11):457. Disponible en: http://dx.doi.org/10.1007/s10653-024-02215-9
105. Shahriar SMS, Rabby MF, Akhtar MM, Dipti S, Kulsum U, Hossain MS, et al. Assessment of heavy metal content in chicken eggs and evaluating associated

health risks. J Sci Res [Internet]. 2025;17(1):273–86. Disponible en: http://dx.doi.org/10.3329/jsr.v17i1.72741

X. ANEXOS

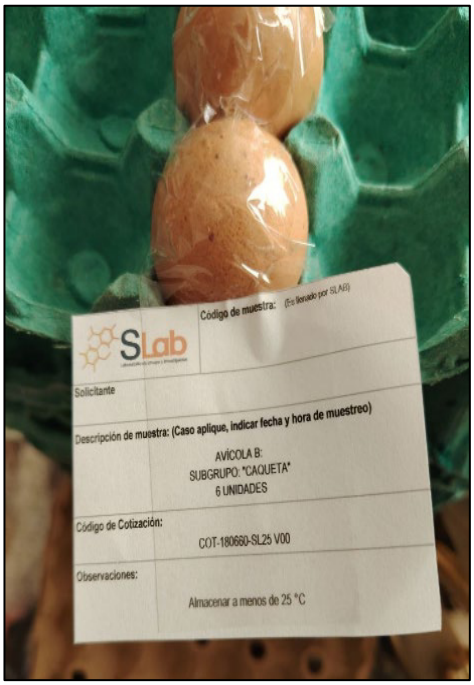
Anexo 1: Muestreo e identificación de muestras













Anexo 2: Preparación y lectura de muestras.

SLab
Laboratorio de ensayo e investigación

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

ANEXO N° 0657 - 2025

EL PRESENTE ANEXO ES EMITIDO POR **SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS QUÍMICOS SAC** QUIEN ASEGURA HABER ANALIZADO LA MUESTRA PROPORCIONADA POR NUESTRO CLIENTE A QUIEN SE IDENTIFICA POSTERIORMENTE.

Informe de Ensayo IE-2025-5856

1. DATOS DEL CLIENTE

1.1	Cliente	:	EDWAR ARIZABAL CASA
1.2	RUC o DNI	:	72468871
1.3	Dirección	:	PRO. VIV. LA FLORIDA II ETAPA MZ. D LT. 3 CHUQUITANTA SMP

2. DATOS DE LA MUESTRA

2.1	Producto	:	ALIMENTOS
2.2	Muestreado por	:	CLIENTE (c)
2.3	Número de Muestras	:	03
2.4	Fecha de Recepción	:	2025-12-30
2.5	Periodo de Ensayo	:	2025-12-30 al 2026-01-08
2.6	Fecha de Emisión	:	2026-01-14
2.7	Fecha y Hora de Muestreo	:	No Precisa
2.8	N° de Cotización	:	COT-180660-SL25

SLab
Laboratorio de ensayo e investigación

Preparación y lectura de muestras.

SLab
Laboratorio de ensayo e investigación

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

3. INFORMACIÓN ADICIONAL

3.1. DESCRIPCIÓN DE MUESTRA

Código de Muestra	Descripción de Muestras
S-7751	Muestras: Huevos de gallina de avícola A: Consta de 1 kg de huevo en total, se compone por 3 subgrupos de 6 huevos. -1er subgrupo "STA ANITA": 6und -2do subgrupo "CAQUETA": 6und -3er subgrupo "PRO": 6und (c)
S-7752	Muestras: Huevos de gallina de avícola B: Consta de 1 kg de huevo en total, se compone por 3 subgrupos de 6 huevos. -1er subgrupo "STA ANITA": 6und -2do subgrupo "CAQUETA": 6und -3er subgrupo "PRO": 6und (c)
S-7753	Muestras: Huevos de gallina de avícola C: Consta de 1 kg de huevo en total, se compone por 3 subgrupos de 6 huevos. -1er subgrupo "STA ANITA": 6und -2do subgrupo "CAQUETA": 6und -3er subgrupo "PRO": 6und (c)

3.2. REPORTE FOTOGRÁFICO

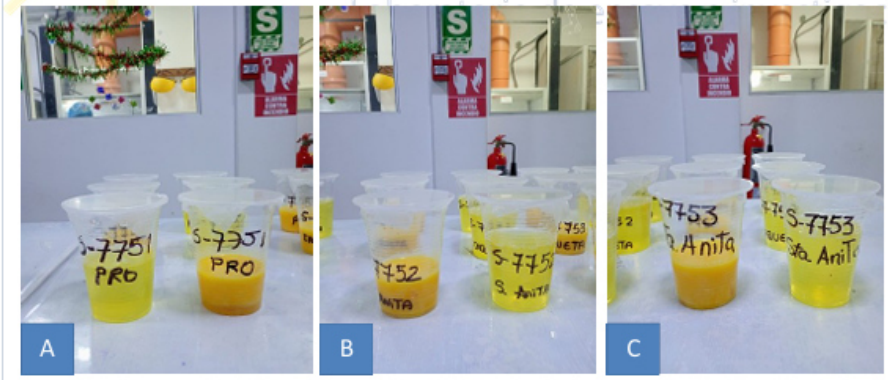


Imagen N°01: SEPARACION DE CLARA-YEMA
A: AVÍCOLA A (S-7751) / B: AVÍCOLA B (S-7752) / C: AVÍCOLA C (S-7753)

Preparación y lectura de muestras

SLab
Laboratorio de ensayo e investigación

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

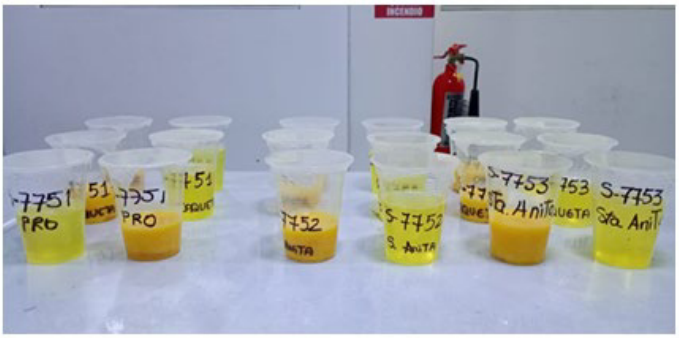


Imagen N°02: TOTAL DE MUESTRAS



Imagen N°03: PESADO DE MUESTRAS
(MUESTRA DE YEMA / MUESTRA DE CLARA)

Preparación y lectura de muestras.

SLab
Laboratorio de ensayo e investigación

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

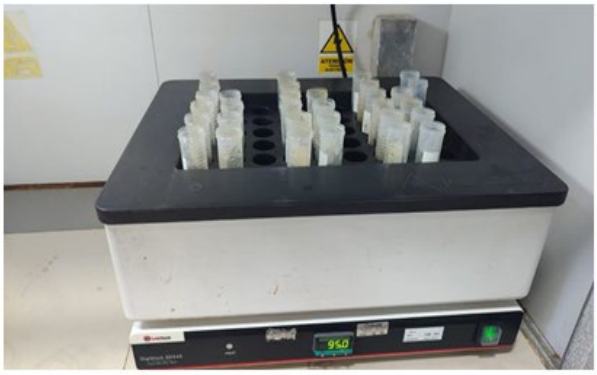


Imagen N°04: DIGESTIÓN - DIGIBLOCK



Imagen N°05: FILTRADO DE MUESTRA DIGESTADA POR GRUPO

Preparación y lectura de muestras.

SLab
Laboratorio de ensayo e investigación

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

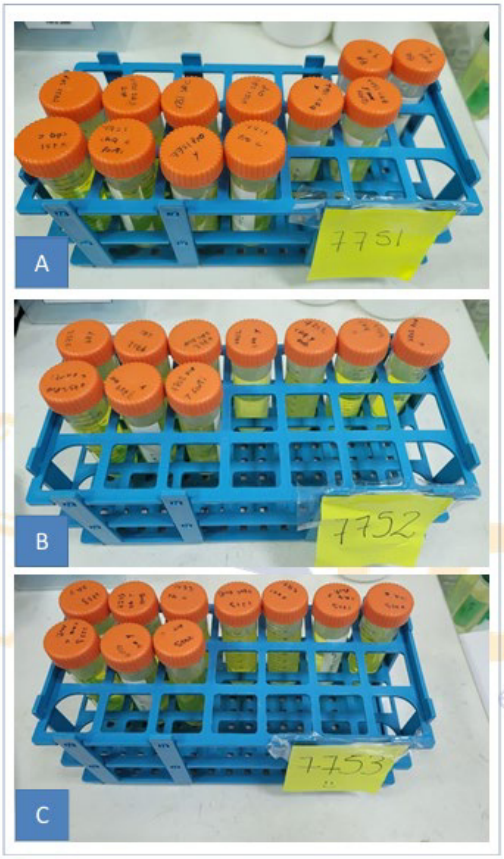


Imagen N°06: MUESTRAS PARA LECTURA EN EQUIPO
A: AVÍCOLA A (S-7751) / B: AVÍCOLA B (S-7752) / C: AVÍCOLA C (S-7753)

Preparación y lectura de muestras.

SLab
Laboratorio de ensayo e investigación

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



Imagen N°07: LECTURA EN EQUIPO

FIN DE DOCUMENTO

SLab
Laboratorio de ensayo e investigación

Anexo 3: Informes de resultados emitidos por SLab Perú

SLab
Laboratorio de ensayo e investigación

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

INFORME DE ENSAYO
IE-2025-5856

1. DATOS DEL CLIENTE

1.1	Cliente	:	EDWAR ARIZABAL CASA
1.2	RUC o DNI	:	72468871
1.3	Dirección	:	PRO. VIV. LA FLORIDA II ETAPA MZ. D LT. 3 CHUQUITANTA SMP

2. DATOS DE LA MUESTRA

2.1	Producto	:	ALIMENTOS
2.2	Muestreado por	:	CLIENTE [c]
2.3	Número de Muestras	:	03
2.4	Fecha de Recepción	:	2025-12-30
2.5	Periodo de Ensayo	:	2025-12-30 al 2026-01-08
2.6	Fecha de Emisión	:	2026-01-14
2.7	Fecha y Hora de Muestreo	:	No Precisa
2.8	N° de cotización	:	COT-180660-SL25

3. ENSAYO SOLICITADO - METODOLOGÍA UTILIZADA

ENSAYO	MÉTODO
Determinación de metales: Níquel, Plomo, Mercurio	NOM-117-SSA1-1994. Bienes y Servicios. Método de Prueba para la determinación de Cadmio, arsénico, plomo, estaño, cobre, hierro, zinc y mercurio en alimentos, agua potable y agua purificada por espectrometría de absorción atómica. Lectura por Espectroscopia de Emisión Atómica con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-OES)

SLab
Laboratorio de ensayo e investigación

VERGARAY D'ARRIGO
DIEGO ROMANO
DNI:45841126
QUIMICO CQP 1337

Informes de resultados emitidos por SLab Perú

SLab
Laboratorio de ensayo e investigación

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

INFORME DE ENSAYO IE-2025-5856

4. RESULTADOS

4.1. DESCRIPCIÓN DE MUESTRA:

Código de Muestra	Descripción de Muestras
S-7751	Muestras: Huevos de gallina de avícola A: Consta de 1 kg de huevo en total, se compone por 3 subgrupos de 6 huevos. -1er subgrupo "STA ANITA": 6und -2do subgrupo "CAQUETA": 6und -3er subgrupo "PRO": 6und (c)
S-7752	Muestras: Huevos de gallina de avícola B: Consta de 1 kg de huevo en total, se compone por 3 subgrupos de 6 huevos. -1er subgrupo "STA ANITA": 6und -2do subgrupo "CAQUETA": 6und -3er subgrupo "PRO": 6und (c)
S-7753	Muestras: Huevos de gallina de avícola C: Consta de 1 kg de huevo en total, se compone por 3 subgrupos de 6 huevos. -1er subgrupo "STA ANITA": 6und -2do subgrupo "CAQUETA": 6und -3er subgrupo "PRO": 6und (c)

4.2. RESULTADOS OBTENIDOS DE DETERMINACIÓN DE METALES (S-7751)

Tabla N°1: RESULTADOS OBTENIDOS PARA SANTA ANITA (YEMA)

Código de Muestra	Parámetro	Unidad	LDM	LCM	Resultados
S-7751	Níquel, Ni	mg/Kg	0.0033	0.01	<0.01
	Plomo, Pb	mg/Kg	0.017	0.05	<0.05
	Mercurio, Hg	mg/Kg	0.0033	0.01	<0.01

Tabla N°2: RESULTADOS OBTENIDOS PARA SANTA ANITA (CLARA)

Código de Muestra	Parámetro	Unidad	LDM	LCM	Resultados
S-7751	Níquel, Ni	mg/Kg	0.0033	0.01	<0.01
	Plomo, Pb	mg/Kg	0.017	0.05	<0.05
	Mercurio, Hg	mg/Kg	0.0033	0.01	<0.01

Tabla N°3: RESULTADOS OBTENIDOS PARA CAQUETA (YEMA)

Código de Muestra	Parámetro	Unidad	LDM	LCM	Resultados
S-7751	Níquel, Ni	mg/Kg	0.0033	0.01	<0.01
	Plomo, Pb	mg/Kg	0.017	0.05	<0.05
	Mercurio, Hg	mg/Kg	0.0033	0.01	<0.01

Laboratorio de ensayo e investigación

Informe de resultados emitido por SLab Perú

SLab
Laboratorio de ensayo e investigación

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

INFORME DE ENSAYO IE-2025-5856

Tabla N°4: RESULTADOS OBTENIDOS PARA CAQUETA (CLARA)

Código de Muestra	Parámetro	Unidad	LDM	LCM	Resultados
S-7751	Níquel, Ni	mg/Kg	0.0033	0.01	<0.01
	Plomo, Pb	mg/Kg	0.017	0.05	<0.05
	Mercurio, Hg	mg/Kg	0.0033	0.01	<0.01

Tabla N°5: RESULTADOS OBTENIDOS PARA PRO (YEMA)

Código de Muestra	Parámetro	Unidad	LDM	LCM	Resultados
S-7751	Níquel, Ni	mg/Kg	0.0033	0.01	<0.01
	Plomo, Pb	mg/Kg	0.017	0.05	<0.05
	Mercurio, Hg	mg/Kg	0.0033	0.01	<0.01

Tabla N°6: RESULTADOS OBTENIDOS PARA PRO (CLARA)

Código de Muestra	Parámetro	Unidad	LDM	LCM	Resultados
S-7751	Níquel, Ni	mg/Kg	0.0033	0.01	<0.01
	Plomo, Pb	mg/Kg	0.017	0.05	<0.05
	Mercurio, Hg	mg/Kg	0.0033	0.01	<0.01

4.3. RESULTADOS OBTENIDOS DE DETERMINACIÓN DE METALES (S-7752)

Tabla N°7: RESULTADOS OBTENIDOS PARA SANTA ANITA (YEMA)

Código de Muestra	Parámetro	Unidad	LDM	LCM	Resultados
S-7752	Níquel, Ni	mg/Kg	0.0033	0.01	<0.01
	Plomo, Pb	mg/Kg	0.017	0.05	<0.05
	Mercurio, Hg	mg/Kg	0.0033	0.01	<0.01

Tabla N°8: RESULTADOS OBTENIDOS PARA SANTA ANITA (CLARA)

Código de Muestra	Parámetro	Unidad	LDM	LCM	Resultados
S-7752	Níquel, Ni	mg/Kg	0.0033	0.01	<0.01
	Plomo, Pb	mg/Kg	0.017	0.05	<0.05
	Mercurio, Hg	mg/Kg	0.0033	0.01	<0.01

Tabla N°9: RESULTADOS OBTENIDOS PARA CAQUETA (YEMA)

Código de Muestra	Parámetro	Unidad	LDM	LCM	Resultados
S-7752	Níquel, Ni	mg/Kg	0.0033	0.01	<0.01
	Plomo, Pb	mg/Kg	0.017	0.05	<0.05
	Mercurio, Hg	mg/Kg	0.0033	0.01	<0.01

Informe de resultados emitido por SLab Perú.

Tabla N°10: RESULTADOS OBTENIDOS PARA CAQUETA (CLARA)

Código de Muestra	Parámetro	Unidad	LDM	LCM	Resultados
S-7752	Níquel, Ni	mg/Kg	0.0033	0.01	<0.01
	Plomo, Pb	mg/Kg	0.017	0.05	<0.05
	Mercurio, Hg	mg/Kg	0.0033	0.01	<0.01

Tabla N°11: RESULTADOS OBTENIDOS PARA PRO (YEMA)

Código de Muestra	Parámetro	Unidad	LDM	LCM	Resultados
S-7752	Níquel, Ni	mg/Kg	0.0033	0.01	<0.01
	Plomo, Pb	mg/Kg	0.017	0.05	<0.05
	Mercurio, Hg	mg/Kg	0.0033	0.01	<0.01

Tabla N°12: RESULTADOS OBTENIDOS PARA PRO (CLARA)

Código de Muestra	Parámetro	Unidad	LDM	LCM	Resultados
S-7752	Níquel, Ni	mg/Kg	0.0033	0.01	<0.01
	Plomo, Pb	mg/Kg	0.017	0.05	<0.05
	Mercurio, Hg	mg/Kg	0.0033	0.01	<0.01

4.4. RESULTADOS OBTENIDOS DE DETERMINACIÓN DE METALES (S-7753)

Tabla N°13: RESULTADOS OBTENIDOS PARA SANTA ANITA (YEMA)

Código de Muestra	Parámetro	Unidad	LDM	LCM	Resultados
S-7753	Níquel, Ni	mg/Kg	0.0033	0.01	<0.01
	Plomo, Pb	mg/Kg	0.017	0.05	<0.05
	Mercurio, Hg	mg/Kg	0.0033	0.01	<0.01

Tabla N°14: RESULTADOS OBTENIDOS PARA SANTA ANITA (CLARA)

Código de Muestra	Parámetro	Unidad	LDM	LCM	Resultados
S-7753	Níquel, Ni	mg/Kg	0.0033	0.01	<0.01
	Plomo, Pb	mg/Kg	0.017	0.05	<0.05
	Mercurio, Hg	mg/Kg	0.0033	0.01	<0.01

Tabla N°15: RESULTADOS OBTENIDOS PARA CAQUETA (YEMA)

Código de Muestra	Parámetro	Unidad	LDM	LCM	Resultados
S-7753	Níquel, Ni	mg/Kg	0.0033	0.01	<0.01
	Plomo, Pb	mg/Kg	0.017	0.05	<0.05
	Mercurio, Hg	mg/Kg	0.0033	0.01	<0.01

Informe de resultados emitido por SLab Perú.

SLab
Laboratorio de ensayo e investigación

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

INFORME DE ENSAYO IE-2025-5856

Tabla N°16: RESULTADOS OBTENIDOS PARA CAQUETA (CLARA)

Código de Muestra	Parámetro	Unidad	LDM	LCM	Resultados
S-7753	Níquel, Ni	mg/Kg	0.0033	0.01	<0.01
	Plomo, Pb	mg/Kg	0.017	0.05	<0.05
	Mercurio, Hg	mg/Kg	0.0033	0.01	<0.01

Tabla N°17: RESULTADOS OBTENIDOS PARA PRO (YEMA)

Código de Muestra	Parámetro	Unidad	LDM	LCM	Resultados
S-7753	Níquel, Ni	mg/Kg	0.0033	0.01	<0.01
	Plomo, Pb	mg/Kg	0.017	0.05	<0.05
	Mercurio, Hg	mg/Kg	0.0033	0.01	<0.01

Tabla N°18: RESULTADOS OBTENIDOS PARA PRO (CLARA)

Código de Muestra	Parámetro	Unidad	LDM	LCM	Resultados
S-7753	Níquel, Ni	mg/Kg	0.0033	0.01	<0.01
	Plomo, Pb	mg/Kg	0.017	0.05	<0.05
	Mercurio, Hg	mg/Kg	0.0033	0.01	<0.01

Leyenda
LCM: Límite de Cuantificación de Método.
(c) Información suministrada por el cliente.

SLab
Laboratorio de ensayo e investigación

- Sin la aprobación del laboratorio Sistema de Servicios y Análisis Químicos S.A.C. no se debe reproducir el informe de ensayo parcial, excepto cuando se reproduce en su totalidad.
- Los resultados de los ensayos se aplican a la muestra cómo se recibió y no se deben usar como una declaración de conformidad con una especificación o normas de productos de la entidad que lo produce.
- El laboratorio no es responsable de la información que ha sido identificada como suministrada por el cliente.
- Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo.
- Este laboratorio está acreditado de acuerdo con la norma internacional reconocida ISO / IEC 17025. Esta acreditación demuestra la competencia técnica para un alcance definido y el funcionamiento de un sistema de gestión de calidad de laboratorio.

FIN DE DOCUMENTO

ANEXO 4: Verificación operacional del espectrómetro ICP-OES.

HUROLAB S.A.C	VERIFICACIÓN OPERACIONAL ESPECTRÓMETRO ICP-OES AVIO 550 Max	Código: VOICP550MAX/REP-01 Edición: 01/Revisión: 01 Fecha de Revisión: 12/10/24 Elaborado: RD

ESPECTROFOTÓMETRO DE EMISIÓN

PERKIN ELMER ICP-OES AVIO 550 Max

Compañía:	**SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS QUÍMICO S.A.C.**
Dirección:	Calle 22 Mz E Lote 7 Urb Vipol de Naranjal SMP
Área:	Sala Instrumental - Metales
Responsable:	Anthony Vargas
Teléfono:	921 979 021

Fecha de Evaluación:	18 de octubre del 2025
Fecha Sugerida Re Evaluación:	6 meses
No. de Certificado:	RD251018
Fecha de ultimo certificado	Mayo 2025
Teléfono de Consultas:	941363976

Verificación operacional del espectrómetro ICP-OES.

HUROLAB S.A.C	VERIFICACIÓN OPERACIONAL ESPECTRÓMETRO ICP-OES AVIO 550 Max	Código: VOICP550MAX/REP-01 Edición: 01/Revisión: 01 Fecha de Revisión: 12/10/24 Elaborado: RD

CONFIGURACIÓN EVALUADA:

ACCESORIOS / COMPONENTES, NO INCLUIDOS en la descripción del modelo pero utilizado en la prueba.

Modelo	No. Serie	Código de Equipo
AVIO 550 Max	M81S2302174	LAB-126
----------	----------	----------

Equipo de Prueba	Número de Serie
Medidor de presión de gas	N069T114

Estándares Utilizados	Número de Lote	Fecha de Expiración
N069 1579 Multi element Standar	62-162CRX1	30-11-2025
N930 0221 Dilucion 1/100	61-190CRY1	30-09-2025
N058 2152 Calmix 3	62-163CRX1	30-06-2025
N930 2946 Vis Wavecal Mix	61-167CRT1	30-07-2025

Suministrado por Cliente	Observaciones	Iniciales de Cliente
Agua	----------	A. V.

Verificación operacional del espectrómetro ICP-OES

HUROLAB S.A.C	VERIFICACIÓN OPERACIONAL ESPECTRÓMETRO ICP-OES AVIO 550 Max	Código: VOICP550MAX/REP-01 Edición: 01/Revisión: 01 Fecha de Revisión: 12/10/24 Elaborado: RD

No. DE CERTIFICADO: RD251018 **FECHA DE EVALUACIÓN:** 18 de octubre del 2025

1. Relación de las intensidades de las vistas axial y radial (Mn 257.610nm)
(con 1ppm en ambas vistas)

Especificación de relación Axial/Radial	Intensidad de la vista Axial	Intensidad de la vista Radial	Relación axial / radial	PRUEBA
≥ 2.5	347880.0	57859.53	6.01	Pasó

2. Radial BEC (Mn 257.610nm): BEC-RL
Con Mn, BEC= (IBxEstandar Conc.)/(IS-IB)

Especificación BEC (ug / L)	Intensidad de IB = (2%HNO3)	Intensidad de IS = RL (N0691579)	Mn BEC (IBx10000 / IS-IB)	PRUEBA
≤ 45	963.3	578595.3	16.68	Pasó

3. Axial Detection Limit: DL-2-XL
para la muestra IDL (2%HNO3), guardar valor de desviación la estándar (SD) de la muestra

ELEMENTO	Std Dev Sample Units (ug/L)	ESPECIFICACIÓN (ug/L)	PRUEBA
Ti 190.801	4.87	≤ 10	Pasó
As 193.696	4.57	≤ 10	Pasó
Se 196.026	1.43	≤ 5	Pasó
Pb 220.353	0.67	≤ 3	Pasó

4. RADIAL DETECTION LIMIT: DL-2-RL
para la muestra IDL (2%HNO3), guardar valor de desviación la estándar (SD) de la muestra

ELEMENTO	Std Dev Sample Units (ug/L)	ESPECIFICACIÓN (ug/L)	PRUEBA
As 193.696	33.6	≤ 60	Pasó
Zn 213.856	1.32	≤ 2	Pasó
Mn 257.610	0.37	≤ 0.75	Pasó
La 379.478	2.37	≤ 3	Pasó
Ba 455.403	0.17	≤ 0.3	Pasó
Ba 493.408	0.36	≤ 0.6	Pasó

Verificación operacional del espectrómetro ICP-OES

HUROLAB S.A.C	VERIFICACIÓN OPERACIONAL ESPECTRÓMETRO ICP-OES AVIO 550 Max	Código: VOICP550MAX/REP-01 Edición: 01/Revisión: 01 Fecha de Revisión: 12/10/24 Elaborado: RD

No. DE CERTIFICADO: RD251018 **FECHA DE EVALUACIÓN:** 18 de octubre del 2025

5. PRECISIÓN: Precision-XL

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

ELEMENTO	% RSD	ESPECIFICACIÓN (%)	PRUEBA
As 193.696	0.79	≤ 1	Pasó
Zn 213.856	0.88	≤ 1	Pasó
Mn 257.610	0.93	≤ 1	Pasó
La 379.478	0.91	≤ 1	Pasó
Ba 455.403	0.93	≤ 1	Pasó
Ba 493.408	0.91	≤ 1	Pasó

6. Stability: Stability-XL

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

ELEMENTO	Valor Obtenido	ESPECIFICACIÓN	PRUEBA
Zn 213.856	100.1	95 mg/L ≤ x ≤ 105mg/L	Pasó
Mg 280.271	99.8	95 mg/L ≤ x ≤ 105mg/L	Pasó
Mg 257.610	100.1	95 mg/L ≤ x ≤ 105mg/L	Pasó
Mn 257.610	100.3	95 mg/L ≤ x ≤ 105mg/L	Pasó
Ba 455.403	99.9	95 mg/L ≤ x ≤ 105mg/L	Pasó

7. Resolución: RES-ONLY-XL

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

ELEMENTO	ESPECIFICACIÓN	ESPECIFICACIÓN (nm)	PRUEBA
As 193.696	0.00456	≤ 0.007	Pasó
Ni 231.604	0.00579	≤ 0.008	Pasó
Ni 341.476	0.00795	≤ 0.012	Pasó
La 408.672	0.01638	≤ 0.020	Pasó
Ba 455.403	0.01763	≤ 0.025	Pasó

Verificación operacional del espectrómetro ICP-OES

HUROLAB S.A.C	VERIFICACIÓN OPERACIONAL ESPECTRÓMETRO ICP-OES AVIO 550 Max	Código: VOICP550MAX/REP-01 Edición: 01/Revisión: 01 Fecha de Revisión: 12/10/24 Elaborado: RD

No. DE CERTIFICADO: RD251018 **FECHA DE EVALUACIÓN:** 18 de octubre del 2025

8. CALIBRACIÓN DE LA LONGITUD DE ONDA

COEFICIENTES UV			COEFICIENTES VIS		
| 0.14540 |	≤	1.50	| 0.12244 |	≤	2.00
| -0.37859 |	≤	1.50	| 0.22301 |	≤	2.00
| 1.31146 |	≤	6.00	| -0.37189 |	≤	8.00
RSD =		7.34	RSD =		1.67

Intensidad de la lámpara de mercurio: 10574732.2

Valor de Slit: 1747

Conclusión: Todas las pruebas pasaron satisfactoriamente.

Este documento deja CONSTANCIA que el Instrumento ICP AVIO 550 Max con número de serie: M81S2302174

[√] **Cumple**

Las especificaciones del fabricante indicadas en este documento.

HUROLAB S.A.C

ROLANDO DIAZ
Especialista Técnico

REPRESENTANTE EMPRESA **HUROLAB**

Anexo 5: Certificado de acreditación INACAL del laboratorio sistema de servicios y análisis químicos S.A.C. (SLab Perú)



Certificado

INACAL
Instituto Nacional de Calidad
Acreditación

La Dirección de Acreditación del Instituto Nacional de Calidad – INACAL, en el marco de la Ley N° 30224, **OTORGA** el presente certificado de Acreditación a:

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

Laboratorio de Ensayo

En su sede ubicada en: Calle 22 Mz E Lt 7 Urbanización Vipol de Naranjal, distrito de San Martín de Porres, provincia y departamento de Lima

Con base en la norma

NTP-ISO/IEC 17025:2017 Requisitos Generales para la Competencia de los Laboratorios de Ensayo y Calibración

Facultándolo a emitir Informes de Ensayo con Símbolo de Acreditación. En el alcance de la acreditación otorgada que se detalla en el DA-acr-06P-21F que forma parte integral del presente certificado llevando el mismo número de registro indicado líneas abajo.

Fecha de Acreditación: 21 de julio de 2023
Fecha de Vencimiento: 20 de julio de 2026

Firmado digitalmente por AGUILAR RODRIGUEZ Lidia Patricia FAU 20600283015 soft
Fecha: 2023-08-18 08:52:23
Motivo: Soy el Autor del Documento

PATRICIA AGUILAR RODRÍGUEZ
Directora (d.t.), Dirección de Acreditación - INACAL

Cedula: N°: 228-2023-INACAL/DA
Contrato N°: 039-2023/INACAL-DA
Registro N°: LE - 211

Fecha de emisión: 15 de agosto de 2023

El presente certificado tiene validez con su correspondiente Alcance de Acreditación y cédula de notificación dado que el alcance puede estar sujeto a ampliaciones, reducciones, actualizaciones y suspensiones temporales. El alcance y vigencia debe confirmarse en la página web www.inacal.gob.pe/acreditacion/categoria/acreditados y/o a través del código QR al momento de hacer uso del presente certificado.

La Dirección de Acreditación del INACAL es firmante del Acuerdo de Reconocimiento Multilateral (MLA) de Inter American Accreditation Cooperation (IAAC) e International Accreditation Forum (IAF) y del Acuerdo de Reconocimiento Mutuo con la International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC).

DA-acr-01P-02M Ver. 03