

Metales pesados e imposex en *Thaisella chocolata* (Gasteropoda: Muricidae) en Matarani, Arequipa, Perú

Heavy metals and imposex in *Thaisella chocolata* (Gasteropoda: Muricidae) in
Matarani, Arequipa, Peru

Nathali Luna-Pacompea¹, Fátima Juárez-Laguna¹, Camila Jaén-Rodríguez¹,
Lorena Alvariano², José Iannacone^{1,2,3*}

RESUMEN

Los ecosistemas marinos se han visto afectados por la contaminación de metales pesados y de pinturas organoestañosas antiincrustantes, donde estos últimos generan el fenómeno de imposex en gasterópodos marinos. Se evaluó la presencia de metales pesados e imposex en el caracol marino *Thaisella chocolata* en el desembarcadero pesquero artesanal «El Faro» y a 2 km aproximadamente de dicho muelle, ubicados en Matarani (Arequipa, Perú), durante invierno y primavera de 2021. Además, se evaluaron los metales pesados en el agua y en el sedimento marino. Los metales pesados en las muestras de agua, sedimento y tejido muscular de *T. chocolata* fueron comparados con normativas nacionales e internacionales para la calidad ambiental. El boro en el agua sobrepasó la norma en las dos zonas en primavera. Ningún metal pesado sobrepasó la normativa en el sedimento. Los valores de As, Cd y Cu y Se en los tejidos de *T. chocolata* sobrepasaron en alguna de las ocho normas internacionales de comparación. El riesgo en la salud humana por el consumo de moluscos marinos evidenció ausencia de riesgo no

¹ COEPERU- Coastal Ecosystems of Peru Research Group, Laboratorio de Ingeniería Ambiental, Escuela de Ingeniería Ambiental, Universidad Científica del Sur, Lima, Perú

² Laboratorio de Ecología y Biodiversidad Animal (LEBA), Museo de Historia Natural de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática, Grupo de Investigación de Sostenibilidad Ambiental (GISA), Escuela Universitaria de Posgrado (EUPG), Universidad Nacional Federico Villarreal, Lima, Perú

³ Laboratorio de Parasitología, Grupo de Investigación «One Health», Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú

*E-mail: joseiannacone@gmail.com

Recibido: 21 de marzo de 2022

Aceptado para publicación: 15 de septiembre de 2022

Publicado: 27 de octubre de 2022

©Los autores. Este artículo es publicado por la Rev Inv Vet Perú de la Facultad de Medicina Veterinaria, Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0) [<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>] que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada de su fuente original

carcinogénico en base al cociente de riesgo objetivo (THQ) y al índice de peligro (HI) por metales pesados en *T. chocolata*. El tamaño de la conchilla y la longitud del pene en los machos en *T. chocolata* estuvo correlacionado. Los porcentajes de imposex (9.6%) fueron catalogados como bajos. El RPLI (índice de la longitud relativa del pene), el RPLIest (RPLI estandarizado), y el índice de VSDI (índice de secuencia del conducto deferente) varió entre I a II en *T. chocolata* presentando baja severidad. Se sugiere continuar el monitoreo de los niveles de metales pesados y el imposex en *T. chocolata* en la zona sur del Perú, para mejorar la eficacia en la gestión y para hacer cumplir las reglamentaciones nacionales e internacionales.

Palabras clave: agua de mar, disrupción endocrina, caracol marino, imposex, metales pesados, sedimento

ABSTRACT

Marine ecosystems have been affected by contamination from heavy metals and antifouling organotin paints, where the latter generate the imposex phenomenon in marine gastropods. The presence of heavy metals and imposex in the marine snail *Thaisella chocolata* was evaluated at the «El Faro» artisanal fishing landing stage and at approximately 2 km from said pier, located in Matarani (Arequipa, Peru), during the winter and spring of 2021. In addition, heavy metals in the water and in the marine sediment were evaluated. Heavy metals in the water, sediment and muscle tissue samples of *T. chocolata* were compared with national and international standards for environmental quality. Boron in the water exceeded the norm in both areas in the spring. No heavy metal exceeded the regulations in the sediment. The values of As, Cd and Cu and Se in the tissues of *T. chocolata* exceeded some of the eight international standards for comparison. The risk to human health from the consumption of marine mollusks evidenced the absence of non-carcinogenic risk based on the Target risk quotient (THQ) and the Hazard index (HI) for heavy metals in *T. chocolata*. Shell size and penis length in males in *T. chocolata* were correlated. The percentages of imposex (9.6%) were classified as low. The RPLI (relative penile length index), the RPLIest (standardized RPLI), and the VSDI index (vas deferens sequence index) ranged from I to II in *T. chocolata* presenting low severity. It is suggested to continue monitoring the levels of heavy metals and imposex in *T. chocolata* in the southern zone of Peru to improve management efficiency and to enforce national and international regulations.

Key words: seawater, endocrine disruption, marine snail, imposex, heavy metals, sediment

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, los ecosistemas marinos se han visto afectados por la contaminación de metales pesados (MP), debido a fuentes naturales o antropogénicas (Perumal *et al.*, 2021). Estos contaminantes representan un importante problema ambiental y de salud pública debido a su persistencia, abundancia

y toxicidad (Pérez y Azcona, 2012; López-Bellido y López, 2013; Feoktistova y Clark, 2018; Medina-Pizzali *et al.*, 2018; Naggar *et al.*, 2018; Cadavid-Muñoz y Arango-Ruiz, 2020; El-Amier *et al.*, 2021). Además, el incremento de MP en el sedimento marino aumenta las posibilidades de bioacumulación en organismos bentónicos, generando efectos adversos negativos (García *et al.*, 2008; Fuentes *et al.*, 2010; Yunus *et al.*, 2020). Los efec-

tos letales, subletales y la bioacumulación de MP influyen en la disrupción endocrina de la fauna (Sierra-Marquez *et al.*, 2018).

Por otro lado, el estaño presente en los tintes antiincrustantes se manifiesta a través del imposex (IMP), definido como la presencia de características sexuales masculinas en los especímenes femeninos de gasterópodos prosobranquios (Otegui *et al.*, 2019). Este fenómeno se expresa en el individuo con relación a la biodisponibilidad del TBT (Tributilo de estaño), compuesto organometálico (França *et al.*, 2021; Lee *et al.*, 2022). El TBT ingresa en gran medida al ecosistema marino por la presencia de tintes antiincrustantes en embarcaciones (Valkirs *et al.*, 1991; Schøyen *et al.*, 2019). Los puertos con alta circulación de embarcaciones y áreas aledañas a los astilleros son donde, principalmente, se presentan los más altos niveles de esta sustancia estañosa (Rivas *et al.*, 2017).

En el Perú existen escasas investigaciones sobre la presencia de esta alteración reproductiva denominada IMP en sus costas marinas (Castro y Fillmann, 2012; Guabloche *et al.*, 2013; Chumbimune y Ponce, 2017; Rivas *et al.*, 2017; Enrique *et al.*, 2019). En los puertos de Callao y Chimbote se han determinado altas concentraciones de TBT relacionadas al fenómeno de IMP en *Thaisella chocolata*. Por otro lado, Enrique *et al.* (2019) sugieren que *T. chocolata* posee alta sensibilidad al TBT, lo que la convierte en una especie centinela, en comparación a *Xanthochorus buxeus*. Existen varias hipótesis que proponen como se produce el imposex en los caracoles por acción del TBT, el que es inducido por (1) la inhibición de la aromatasa, (2) modulación de testosterona o (3) inhibición de la excreción de testosterona, aumentando los niveles de testosterona libre, (4) alteración del factor morfogenético del pene y, finalmente, (5) modulación anormal de la vía de señalización de los receptores X de retinoides (RXR) (Ragagnin y Turra, 2022).

Thaisella chocolata, conocido también como «caracol negro» se distribuye desde Paíta (Perú) hasta Valparaíso (Chile). Es un gasterópodo de interés comercial por su consumo local y de exportación (Alfaro, 2020). Además, estos organismos bentónicos se distribuyen sobre superficies de conchuela molida, rocosa y arena gruesa, entre 5 y 40 m de profundidad; y no presenta dimorfismo sexual (Cantillán *et al.*, 2011; Guzmán, 2021; Iannacone *et al.*, 2022).

El desembarcadero pesquero artesanal (DPA) «El Faro», en Matarani, Arequipa, Perú, provee distintos recursos hidrobiológicos a la pesca industrial y artesanal (PRODUCE, 2016; IMARPE, 2017). En esta investigación se evaluó la presencia de MP e IMP en *T. chocolata* en el DPA «El Faro» así como en una zona distante 2 km de dicho muelle, durante el invierno y la primavera de 2021. Además, se evaluaron los MP en el agua y en el sedimento marino.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

La zona de muestreo «A» (17°0'53.92" S 72°6'31.89" LO) se encuentra ubicada el DPA «El Faro», en el cual se realizan actividades de descarga de especies hidrobiológicas para consumo nacional e internacional, por lo cual hay gran afluencia de embarcaciones en la zona. La zona de muestreo «B» se localizó aproximadamente a 2 km del DPA (17°0'55.52" S y 72°6'52.61" O), donde se encuentran islotes y lobos marinos, y se desarrollan además actividades turísticas como paseos en botes para observar la fauna marina. Ambas zonas se encuentran localizadas en el distrito de Matarani, provincia de Islay, Arequipa, Perú (Figura 1).

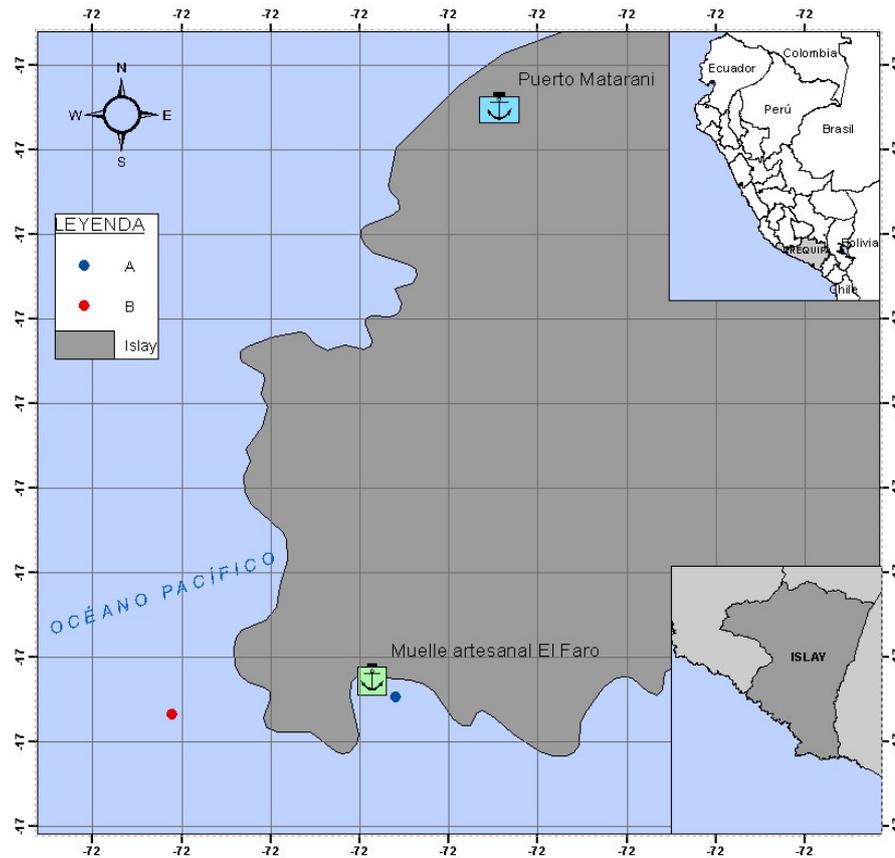


Figura 1. Ubicación de las dos zonas de muestreo: Desembarcadero Pesquero Artesanal (DPA) «El Faro» (Zona A: 17°0'53.92" LS y 72°6'31.89" LO) y a aproximadamente a 2 km del DPA (Zona B: 17°0'55.52" LS y 72°6'52.61" LO). Distrito de Matarani, provincia de Islay, región Arequipa, Perú

Muestras

Se extrajeron muestras de agua, sedimento e individuos del caracol marino *T. chocolata* provenientes de las zonas A y B durante dos estaciones (invierno y primavera) de 2021. Las zonas se denominaron *Ainv* (zona A en invierno), *Apri* (zona A en primavera), *Binv* (zona B en invierno) y *Bpri* (zona B en primavera) para los fines del presente estudio.

Parámetros Físicoquímicos del Agua

Se extrajeron muestras de agua, determinándose *in situ* la temperatura (T°), pH, conductividad eléctrica (mS/cm), salinidad (g/L), sólidos disueltos totales (g/L), oxígeno disuelto (mg/L) y transparencia (m) (Exo 2

multiparameter, YSI®, USA). La transparencia se midió sumergiendo el disco Secchi hasta no tener visibilidad de este, para lo cual se colocó una marca en la cuerda, midiendo la altura. Se determinó la ficocianina ($\mu\text{g/L}$) y clorofila ($\mu\text{g/L}$) por el método fluorométrico (Eijkkelkamp®, Países Bajos). Los nitratos (mg/L), amonio (mg/L) y amoniaco (mg/L) fueron evaluados únicamente en el invierno (Rice *et al.*, 2017).

Granulometría del Sedimento

Se extrajeron 500 g de sedimento de cada zona y estación para la granulometría. Las muestras fueron secadas al ambiente, analizándose 100 g de cada zona por el método de sedimentación (Gibbs *et al.*, 1971).

Metales Pesados

Se analizaron 42 MP en total: Plata (Ag), Aluminio (Al), Arsénico (As), Antimonio (Sb), Azufre (S), Boro (B), Bario (Ba), Berilio (Be), Bismuto (Bi), Calcio (Ca), Cadmio (Cd), Cerio (Ce), Cobalto (Co), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Hierro (Fe), Galio (Ga), Mercurio (Hg), Indio (In), Potasio (K), Lantano (La), Litio (Li), Magnesio (Mg), Manganeso (Mn), Molibdeno (Mo), Sodio (Na), Níquel (Ni), Fósforo (P), Plomo (Pb), Selenio (Se), Silicio (Si), Estaño (Sn), Estroncio (Sr), Tantalio (Ta), Teluro (Te), Titanio (Ti), Talio (Tl), Uranio (U), Vanadio (V), Wolframio (W), Zinc (Zn) y Zirconio (Zr). En total fueron 37 en agua de mar, 39 en sedimentos marinos y 37 MP en el tejido muscular de *T. chocolata*.

- *Agua*: Se extrajo 500 ml de agua de mar en frascos de polietileno siguiendo el Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales (ANA, 2016). Se añadieron 25 gotas de ácido nítrico en cada frasco para ser sellados y refrigerados para su correcta preservación. Para la determinación de la concentración de MP se empleó el método de espectrometría de masas de plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS) (ICP-Masa: ISO 17294-2.2016, UNE-EN ISO, 2017). Posteriormente, las muestras fueron comparadas con normativa nacional e internacional para la calidad de aguas marino-costeras.
- *Sedimento*: Se extrajo 500 g de sedimentos de cada zona y estación mediante el uso de la draga Van Veen de 0.04 m². Para la determinación de MP se empleó el método de espectrometría de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES: EPA Method 6010C.-2007, EPA, 2007). Posteriormente, debido a que el Perú no cuenta con estándares de calidad ambiental para sedimentos marinos, las muestras fueron comparadas con el ECA canadiense y el ECA australiano-neozelandés para sedimentos marinos.

- *Thaisella chocolata*: Para el análisis de MP se extrajeron 15 individuos de *T. chocolata* de cada zona y estación aplicándose el método de ICP-OES (EPA Method 6010C.2007, EPA, 2007). Los resultados fueron comparados con estándares nacionales e internacionales, entre ellos SANIPES (2016), CE (2016), FAO-WHO (2018), ANZFSC (2015), MS (2013), DHO (2004), Villanueva-Fragoso y Paez-Osuna (1996), FDA (2001) y DOH-RSA (2016).

Riesgos en la Salud por el Consumo de Moluscos

Se determinó el riesgo en la salud por el consumo de moluscos.

- *Ingesta diaria estimada (IDE)*. La IDE de MPs de *T. chocolata* se calculó mediante la ecuación: $IDE = (C \times TICM) / PC$, donde C es la concentración de MP en los tejidos de caracol marino (mg/kg de peso seco); TICM es la tasa de ingestión de caracoles marinos, que es de 0.11 g/día (consumo de alimentos del área de estudio). La determinación del TICM fue calculada a partir del consumo humano directo global de productos hidrobiológicos (caracol marino de 2020: 38.42 g/año) (PRODUCE, 2021); PC es el peso corporal: 70 kg para adultos y 15 kg para niños.
- *Riesgo no carcinogénico*. Los cocientes de riesgo objetivo (THQ) se estimaron mediante la proporción de IDE y la dosis de referencia oral (DRf). Si el THQ es superior a 1, es posible que la población expuesta experimente efectos adversos para la salud. La fórmula THQ se expresa de la siguiente manera: $THQ = [(FrE * DE * TICM * C) / (DRf * PCP * TM)] \times 10^{-3}$, donde DE es la duración de la exposición (30 años); FrE es la frecuencia de exposición (365 días/año); TICM es la tasa de ingestión de alimentos (g/persona/día); C es la concentración de metales en el caracol (mg/kg); DRf es la dosis de refe-

rencia oral (mg/kg/día); PCP es el peso corporal promedio; TM es el tiempo medio para los no cancerígenos (365 días/año, número de años de exposición, suponiendo 30 años). Las dosis de referencia oral (DrF) (mg/kg) de los elementos fueron 0.0003, 0.001, 0.04 y 0.005 para As, Cd, Cu y Se, respectivamente (Qu *et al.*, 2012).

- *Índice de peligro (HI)*. Se calculó en HI para los MP encontrados en las muestras del caracol marino, mediante la siguiente ecuación (Qu *et al.*, 2012): $HI = \sum THQ$, donde, THQ es el valor de riesgo estimado para cada metal individual. Cuando el valor de HI es superior a 1, el efecto de riesgo no cancerígeno se considera alto para los consumidores expuestos (Qu *et al.*, 2012).

Imposex

En la estación de invierno se recolectaron 85 individuos de *T. chocolata* en la zona B (*Binv*) y ninguno en la zona A (*Ainv*). En la estación de primavera se obtuvieron 68 individuos en la zona A (*Apri*) y 60 en zona B (*Bpri*). Los caracoles fueron colocados en *coolers* para su traslado al Laboratorio de Ecología y Biodiversidad Animal (LEBA), Facultad de Ciencias Naturales y Matemática, Universidad Nacional Federico Villarreal, Lima, Perú. Se determinó la longitud (mm) y el ancho de la conchilla (mm) de los caracoles con un vernier de 0.02 mm de precisión. Luego, se determinó el peso con conchilla y sin conchilla (g), con una balanza analítica digital GR-200, Serie Gemini, Marca A&D de 0.0001 mg de precisión; por último, se extrajeron los tejidos blandos. La caracterización del sexo se realizó bajo microscopio óptico y estereoscopio, mediante el criterio de presencia de glándula de la cápsula y ovarios para los caracoles femeninos; mientras que para los caracoles masculinos se observó la vesícula seminal. Asimismo, se midió la longitud del pene (LP) para machos y para hembras con imposex (Castro y Fillman, 2012, Braga *et al.*, 2018).

El grado de imposex se determinó por medio de los índices de porcentaje de caracoles femeninos (I%), índice de LP en caracoles femeninos (FPL), el índice relativo de LP (RPLI), y el índice de secuencia del conducto deferente (VDSI). Además, se realizó un ajuste con la longitud de la conchilla (Collado *et al.*, 2010; Castro y Fillman, 2012, Braga *et al.*, 2018). Se establecieron las siguientes cuatro categorías de niveles de IMP usando los resultados del % IMP: ausente (% IMP = cero), bajo (% IMP = 0.1-33%), medio (% IMP = 33.1-66%) y alto (% IMP = 66.1-100%) (Ragagnin y Turra, 2022). Se emplearon estadígrafos descriptivos e inferenciales para determinar la significancia comparativa entre las *Binv*, *Apri* y *Bpri* para MLC (media de longitud de la conchilla [mm] de machos), HLC (media de longitud de la conchilla [mm] de hembras), HiLC (media de longitud de la conchilla [mm] de hembras con IMP), MLP (media de longitud del pene [mm] de machos) y HiLP (media de longitud del pene [mm] de hembras con IMP), previo cumplimiento de la normalidad de Shapiro-Wilk, y de la homogeneidad de varianzas con la prueba de Levene.

Se usó el análisis de varianza (ANOVA F) al cumplir con estos dos requerimientos para pruebas paramétricas, y la prueba de Kruskal-Wallis en caso de incumplimiento. Además, la prueba de Tukey para ambos casos. De igual forma, se comparó entre MLC vs HLC, y entre MLP vs HiLP usando la prueba de *t* de Student. Se realizaron correlaciones de Pearson (r_p) y ecuaciones de regresión lineal con su respectivo coeficiente de determinación (R^2) entre MLC y MLP, y entre HiLC y HiLP. La prueba de X^2 fue empleada para determinar si existían diferencias entre los porcentajes de IMP y las zonas evaluadas. Para el cálculo de los estadísticos se empleó el software PAST v. 4.03 a un nivel de significancia de 0.05.

Aspectos Éticos

La presente investigación fue aprobada por Comité Institucional de Ética en Investigación con Animales y Biodiversidad de la Universidad Científica del Sur (CIEI-AB-CIENTÍFICA) (Constancia N.º 051-CIEI-AB-CIENTÍFICA-2021).

RESULTADOS

Parámetros fisicoquímicos del agua de mar y granulometría del sedimento

El Cuadro 1 nos muestra los resultados obtenidos en las zonas *Ainv* y *Apri* y *Binv* y *Bpri*, en función a los parámetros fisicoquímicos del agua de mar, y los porcentajes de granulometría en el sedimento marino, para las mismas zonas y estaciones.

Los parámetros comparables con el ECA-Perú agua Categoría 2, Subcategoría C1; T°, pH, OD, amoníaco y nitratos, cumplen con los valores establecidos en la normativa. Los valores de temperatura presentan variaciones menores a 3 °C. De igual manera, el pH oscila entre 7.14 y 7.50, el OD fluctúa entre 8.36 y 9.30, en tanto que el amoníaco y los nitratos mostraron valores bajos en los dos parámetros. Por otro lado, se registraron valores de parámetros no comparables con la normativa vigente como: CE, SAL, SDT, TRANS y amonio. Los valores de estos parámetros denotan pequeñas variaciones y resultados similares entre las zonas A y B, incluso entre estaciones, a excepción de la transparencia del agua, presentando una mayor profundidad en *Binv* y a menor profundidad en *Apri*. Los resultados para los pigmentos de fitoplancton indican que, la concentración de clorofila-a y ficoeritrina fueron sumamente bajas. El mayor valor para clorofila-a fue en la zona *Binv* y para ficoeritrina en *Bpri*.

Los porcentajes de granulometría en el sedimento en la zona A varían entre limo y arena, según estación, primando el limo en invierno; sin embargo, en primavera aumenta el porcentaje de arena y el limo se reduce. Por otro lado, tanto para *Binv* y *Bpri*, predominan las estructuras calcáreas (Cuadro 1).

*Metales pesados en agua, sedimento y tejidos de *T. chocolata**

En el Cuadro 2 se muestran los resultados de los 37 MPs en agua de mar, provenientes de las zonas A y B en las estaciones de invierno y primavera de 2021. Al comparar con estándares de calidad ambiental y normativa nacional e internacional para determinar el grado de contaminación del agua marina (Cuadro 3), los MP no sobrepasaron ninguno de los valores de comparación a excepción del B que sobrepasó para *Apri* y *Bpri*.

Los 39 MPs (mg/L) en los sedimentos de la zona A y B en las dos estaciones no sobrepasaron los estándares internacionales de la CCME (2022) y de la CEQG (2022) (Cuadros 4 y 5).

El Cuadro 6 muestra 37 MPs en los tejidos de *T. chocolata* de *Binv*, *Apri* y *Bpri*. Al contrastar con ocho normas internacionales, el As, Cd y Cu y Se presentaron al menos una de las estaciones con valores de MPs por encima de alguna de estas normas. El As en las tres estaciones presentó valores sobre las guías ANZFSC y MS, el Cd sobre las ocho guías internacionales, el Cu para las tres estaciones según lo recomendado por la FAO-WHO, y Se para la guía MS en *Bpri* (Cuadro 7).

Riesgos en la salud por el consumo de moluscos

La IDE y el riesgo no carcinogénico en base a THQ y al HI de cuatro metales pesados (As, Cd, Cu y Se) para *T. chocolata* señalan ausencia de efectos adversos en la salud humana, al ser THQ y HI <1 (Cuadro 8).

Cuadro 1. Parámetros fisicoquímicos del agua de mar y granulometría del sedimento marino de la zona A (Desembarcadero Pesquero Artesanal “El Faro”) y B (a aproximadamente a dos km del DPA) en las estaciones invierno y primavera, distrito de Matarani, provincia de Islay, Región Arequipa, Perú

Parámetros fisicoquímicos	<i>A_{inv}</i>	<i>A_{pri}</i>	<i>B_{inv}</i>	<i>B_{pri}</i>	ECA
Agua					
T (°C)	19.3	21.8	19.4	20.5	
pH	7.14	7.31	7.5	7.22	7-8.5
CE (mS/cm ²)	52.2	51.6	51.9	51.7	
SAL (g/L)	34	33.9	33.9	33.7	
SDT (g/L)	52.2	51.1	52	51.8	
OD (mg/L)	9.3	8.36	8.47	8.75	≥ 4
TRANSP (m)	> 4.25	> 3.14	8.76	7.56	-
CLOR (µg/L)	0.31	0.40	0.95	0.10	
FICOE (µg/L)	0.19	0.22	0.50	0.60	
FICO (µg/L)	0.00	0.00	0.00	0.00	
Amonio (mg/L)	<0.13	-	<0.13	-	-
Amoniaco (mg/L)	<0.12	-	<0.12	-	-
Nitratos (mg/L)	1.137	-	0.396	-	16
Sedimentos (%)					
Estructuras calcáreas	-	-	70.8	74.1	
Arena	18.2	54.1	12.5	11.1	
Limo	72.7	40.5	-	-	
Arcilla	9.1	5.4	16.7	14.8	

Ainv: Zona A (Estación invierno); Apr: Zona A (Estación primavera); Binv: Zona B (Estación invierno); Bpri: Zona B (Estación primavera); T°: Temperatura superficial del mar; CE: Conductividad eléctrica; SAL: Salinidad; SDT: Sólidos disueltos totales; OD: Oxígeno disuelto; TRANSP: Transparencia del agua de mar; CLOR: Clorofila; FICOE: Ficoeritina; FICO: Ficocianina; ECAagua: Estándar de Calidad Ambiental para Agua en el Perú, Categoría 2: Extracción, cultivo y otras actividades marino-costeras y continentales. Subcategoría C1: Extracción y cultivo de moluscos, equinodermos y tunicados en aguas marino-costeras

Imposex

Los indicadores de IMP en *T. chocolata* se presentan en el Cuadro 9. La MCL en *Binv* fue mayor que en *Apri* y *Bpri* ($H'=17.62$, $p<0.05$). La HCL en *Binv* y *Bpri* fueron mayores que en *Apri* ($H'=14.28$, $p<0.05$). No se observaron diferencias entre HiLC para *Binv*, *Apri* y *Bpri* ($F=0.14$, $p=0.86$;

Prueba de Levene, $p=0.39$). La MLP presentó el siguiente orden: $Binv > Bpri > Apri$ ($H'=52.4$, $p<0.05$). No hubo diferencias entre HiLP para *Binv*, *Apri* y *Bpri* ($F=2.05$, $p=0.18$; Prueba de Levene, $p=0.06$).

Se observaron diferencias entre el MLC y el HCL para toda la muestra de caracoles, siendo HCL más grandes que los MLC ($t=$

Cuadro 2. Metales pesados en agua de mar de la zona A (Desembarcadero Pesquero Artesanal “El Faro”) y B (a aproximadamente a dos km del DPA) en las estaciones invierno y primavera, distrito de Matarani, provincia de Islay, Región Arequipa, Perú

Metal pesado	Agua (mg/L)			
	A_{inv}	B_{inv}	A_{pri}	B_{pri}
Plata (Ag)	<0.001	<0.001	<0.00005	<0.00005
Aluminio (Al)	<0.010	<0.010	<0.0025	<0.0025
Arsénico (As)	<0.003	<0.003	<0.0005	<0.0005
Antimonio (Sb)	<0.006	<0.006	<0.0002	<0.0002
Boro (B)	1.624	1.660	5.448	5.088
Bario (Ba)	<0.001	<0.001	<0.00015	<0.00015
Berilio (Be)	<0.001	<0.001	<0.00015	<0.00015
Bismuto (Bi)	<0.003	<0.003	<0.0025	<0.0025
Calcio (Ca)	>50	>50	490.7	467.5
Cadmio (Cd)	<0.001	<0.001	<0.00005	<0.00005
Cerio (Ce)	<0.010	<0.010	-	-
Cobalto (Co)	0.002	0.002	<0.0003	<0.0003
Cromo (Cr)	<0.001	<0.001	<0.0005	<0.0005
Cobre (Cu)	<0.001	<0.001	<0.0003	<0.0003
Hierro (Fe)	<0.010	<0.010	<0.01	<0.01
Galio (Ga)	<0.003	<0.003	-	-
Mercurio (Hg)	<0.001	<0.001	<0.00005	<0.00005
Potasio (K)	>50	>50	471.2	444.4
Litio (Li)	0.003	0.004	0.25044	0.2254
Magnesio (Mg)	>50	>50	1 513	1 439
Manganeso (Mn)	<0.001	<0.001	<0.00025	<0.00025
Molibdeno (Mo)	<0.001	<0.001	<0.0002	<0.0002
Sodio (Na)	>50	>50	12 999	12 287
Níquel (Ni)	<0.002	<0.002	<0.00035	<0.00035
Fósforo (P)	0.025	0.020	<0.100	<0.1
Plomo (Pb)	<0.002	<0.002	<0.0002	<0.0002
Selenio (Se)	<0.007	<0.007	<0.001	<0.001
Silicio (Si)	0.508	0.465	<0.01	<0.01
Estaño (Sn)	<0.005	<0.005	<0.00025	<0.00025
Estroncio (Sr)	2.131	2.189	8.329	8.833
Teluro (Te)	<0.005	<0.005	<0.0005	<0.0005
Titanio (Ti)	<0.005	<0.005	<0.0005	<0.0005
Talio (Tl)	<0.005	<0.005	<0.00016	<0.00016
Uranio (U)	<0.010	<0.010	<0.00005	<0.00005
Vanadio (V)	<0.004	<0.004	<0.0005	<0.0005
Wolframio (W)	<0.005	<0.005	<0.0005	<0.0005
Zinc (Zn)	0.009	0.007	<0.0005	<0.0005

A_{inv} : Zona A (Estación invierno); A_{pri} : Zona A (Estación primavera); B_{inv} : Zona B (Estación invierno); B_{pri} : Zona B (Estación primavera)

Cuadro 3. Estándares de calidad ambiental y normativa nacional e internacional para la calidad de agua de mar de la zona A (Desembarcadero Pesquero Artesanal “El Faro”) y B (aproximadamente a dos km del DPA) en las estaciones invierno y primavera, distrito de Matarani, provincia de Islay, Región Arequipa, Perú

Metal pesado	Agua (mg/L)								
	Categ. 2		Categ. 4		USEPA, Vida Acuática		CCME	B.C. Ministry of Environment and Climate Change Strategy	
	C1	C3	E3	Agudo	Crónico	PVAc	Max	Agudo	Crónico
Ag				0.0019	-			0.003	0.015
Al				-	-	0.005			
As	0.05	0.05	0.036	0.069	0.036		0.125		
Sb	0.64	0.64	**						
B	5	**		-	-				1.2
Cd	0.01	**	0.0088 (Cd disuelto)	0.33	0.0079	0.00012			
Cr VI	0.05	0.05	0.05	1.1	0.05	0.001			
Cu	0.0031	0.05	0.05	0.0048	0.0031	0.002	0.003	≤ 0.002	
Fe				-	-	0.3			
Hg	0.00094	0.0018	0.0001	0.0018	0.00094				0.001; 0.002
Ni	0.0082	0.074	0.0082	0.074	0.0082				
Pb	0.0081	0.03	0.0081	0.21	0.0081		0.14	≤ 0.002	
Se	0.071	**	0.071	0.29	0.071				0.001; 0.002
Tl	**	**	**	-	-	0.0008			
Zn	0.081	0.12	0.081	0.09	0.081	0.03	0.055	0.01	

El símbolo ** dentro de la tabla significa que el parámetro no aplica para esta Subcategoría. Agua: Categoría 2: Extracción, cultivo y otras actividades marino-costeras y continentales (Subcategorías: C1: Extracción y cultivo de moluscos, equinodermos y tunicados en aguas marino-costeras; C3: Actividades marino portuarias, industriales o de saneamiento en aguas marino-costeras); Categoría 4: Conservación del ambiente acuático (Subcategoría: E3: Ecosistemas marinos) (El Peruano, 2017); USEPA (2022); CCME (2022); PVAc. Protección de la Vida Acuática; B.C. Ministry of Environment and Climate Change Strategy (2021); Max: Máximo WQG (Water Quality Guidelines), Aguda: Aguda a corto plazo, Crónica: crónica a largo plazo)

2.26, $p=0.02$). Sin embargo, no hubo diferencias entre el MLC y el HCL para B_{inv} ($t=1.27$, $p=0.21$). Tampoco entre el MLC y el HCL para A_{pri} ($t=0.62$, $p=0.53$), pero sí entre el MLC y el HCL para B_{pri} ($t=4.05$,

$p=0.0001$), siendo mayor en HCL (Cuadro 9). De igual manera, se notaron diferencias entre el MLP y el HiLP ($t=8.04$, $p<0.05$). Se encontraron diferencias entre el MLP y el HiLP para B_{inv} ($t=15.09$, $p<0.05$), entre el

Cuadro 4. Metales pesados en sedimentos marinos de la zona A (Desembarcadero Pesquero Artesanal “El Faro”) y B (a aproximadamente a dos km del DPA) en las estaciones invierno y primavera, distrito de Matarani, provincia de Islay, Región Arequipa, Perú

Metal pesado	Sedimentos (mg/kg)			
	A_{inv}	B_{inv}	A_{pri}	B_{pri}
Plata (Ag)	<1	1	<0.20	<0.20
Aluminio (Al)	6 665	714	7 199	148
Arsénico (As)	<1	<1	<0.60	<0.60
Antimonio (Sb)	<1	<1	<0.50	<0.50
Azufre (S)	2 832	5 114	-	-
Boro (B)	-	-	68.5	20.3
Bario (Ba)	52	9	22.8	9.97
Berilio (Be)	-	-	<0.10	<0.10
Bismuto (Bi)	<3	<3	<0.50	<0.50
Calcio (Ca)	>20000	>20000	93 472	362 592
Cadmio (Cd)	<1	<1	<0.10	<0.10
Cobalto (Co)	7	1	9.90	<0.10
Cromo (Cr)	58	8	14.2	<0.10
Cobre (Cu)	18	3	9.30	<0.10
Hierro (Fe)	17 065	1 157	13 209	324
Mercurio (Hg)	<1	<1	-	-
Indio (In)	<1	<1	-	-
Potasio (K)	1 740	608	954	274
Lantano (La)	9	1	-	-
Litio (Li)	4	1	7.52	<0.30
Magnesio (Mg)	6 283	2 389	7 143	2 869
Manganeso (Mn)	136	21	182	7.80
Molibdeno (Mo)	<1	<1	<0.10	<0.10
Sodio (Na)	7 680	10 664	3 874	7 306
Níquel (Ni)	15	2	18.2	<0.10
Fósforo (P)	682	269	281	408
Plomo (Pb)	16	19	<0.20	<0.20
Selenio (Se)	<1	<1	<0.60	<0.60
Silicio (Si)	-	-	24.9	31.7
Estaño (Sn)	<2	<2	<0.20	<0.20
Estroncio (Sr)	658	1 546	737	2 324
Tantalio (Ta)	<5	<5	-	-
Teluro (Te)	<5	<5	-	-
Titanio (Ti)	317	44	135	2.59
Talio (Tl)	<5	<5	8.51	<0.30
Vanadio (V)	29	2	20.8	<0.10
Wolframio (W)	<1	<1	-	-
Zinc (Zn)	50	29	39.2	<0.10
Zirconio (Zr)	<1	<1	-	-

A_{inv} : Zona A (Estación invierno); A_{pri} : Zona A (Estación primavera); B_{inv} : Zona B (Estación invierno); B_{pri} : Zona B (Estación primavera)

Cuadro 5. Estándares de calidad ambiental y normativa internacional para metales pesados en sedimentos de la zona A (Desembarcadero Pesquero Artesanal “El Faro”) y B (aproximadamente a dos km del DPA) en las estaciones invierno y primavera, distrito de Matarani, provincia de Islay, Región Arequipa, Perú

Metales pesados	Sedimentos (mg/kg)		
	CCME	CEQG	
		ISQG	PEL
As	41.6	7.24	41.6
Cd	4.2	0.7	4.2
Cr VI	160	52.3	160
Cu	108	18.7	108
Hg	0.7	0.13	0.7
Pb	112	30.2	112
Zn	271	124	271

CCME (2022); CEQG (2022); ISQG (Interim Sediment Quality Guidelines/Valor guía interino de la calidad de sedimento: Concentración por debajo el cual no se presenta efecto biológico adverso) y PEL: (Probable Effect Level/Nivel de efecto probable Concentración sobre los cuales los efectos biológicos adversos se encuentran con frecuencia)

MLP y el HiLP para *Apri* ($t=3.67, p<0.05$), y entre el MLP y el HiLP para *Bpri* ($t=6.37, p<0.05$) (Cuadro 9).

Los porcentajes de IMP en *T. chocolata* no fluctuaron significativamente entre *Binv*, *Apri* y *Bpri* ($X^2=0.33, p=0.84$) y fueron catalogados como bajos. El RPLI y el RPLIest presentaron el siguiente orden: *Apri* > *Bpri* > *Binv* (Cuadro 9). El índice de VSDI presentó valores bajos.

MLC y MLP en *T. chocolata* se encontraron correlacionados en el total de las muestras ($r_p=0.61, p<0.001$), y la ecuación

Cuadro 6. Metales pesados en tejidos de *Thaisella chocolata* de la zona A (Desembarcadero Pesquero Artesanal “El Faro”) y B (aproximadamente a dos km del DPA) en las estaciones invierno y primavera, distrito de Matarani, provincia de Islay, Región Arequipa, Perú

Metal pesado	Tejidos (mg/Kg)		
	<i>B_{inv}</i>	<i>A_{pri}</i>	<i>B_{pri}</i>
Ag	1	1	0.1619
Al	5	2	0.3034
As	17	17	18.50
Sb	<1	<1	<0.020
S	5 616	4 124	-
Ba	<1	<1	<0.015
Be	-	-	<0.015
Bi	<3	<3	-
Ca	2 473	2 407	1 455
Cd	2	2	4.354
Co	<1	<1	0.04304
Cr	<1	<1	0.05250
Cu	19	19	22.39
Fe	27	21	20.06
Hg	<1	<1	0.02041
In	<1	<1	-
K	3 792	4 128	2 958
La	<1	<1	-
Li	<1	<1	-
Mg	2 725	2 493	2 881
Mn	2	2	1.521
Mo	<1	<1	-
Na	2626	2 889	3 232
Ni	1	1	0.1106
P	1631	1 645	-
Pb	<1	<1	<0.020
Se	<1	<1	0.3317
Sn	<2	<2	-
Sr	12	13	-
Ta	<5	<5	-
Te	<5	<5	-
Ti	<5	<5	-
Tl	<5	<5	<0.025
V	<1	<1	<0.05
W	<1	<1	-
Zn	24	23	31.68
Zr	<1	<1	-

Apri: Zona A (Estación primavera); *Binv*: Zona B (Estación invierno); *Bpri*: Zona B (Estación primavera)

Cuadro 7. Estándares de calidad ambiental y normativa nacional e internacional para metales pesados en tejidos de *Thaisella chocolata* de la zona A (Desembarcadero Pesquero Artesanal “El Faro”) y B (aproximadamente a dos km del DPA) en las estaciones invierno y primavera, distrito de Matarani, provincia de Islay, Región Arequipa, Perú

Metales pesados	Tejido (mg/kg)							
	SANIPES (2016)	CE (2016)	FAO-WHO (2018)	ANZZFSC (2015)	MS (2013)	DHO (2014)	Villanueva-Fragoso y Paez-Osuna (1996)	FDA (2001)
As	-	-	-	1	1	3		
Cd	≤ 2	1	1	2	1	0.05	2	4
Cu		-	10	-	-	-	150	
Hg	-	0.5	-	0.5	0.5			
Ni					5			
Pb	-	1.5	2	2	2	0.2	2.5	1.7
Se					0.3			
Zn		-	-				200	-

Cuadro 8. Ingesta diaria estimada (IDE) y riesgo no carcinogénico en base a cocientes de riesgo objetivo (THQs) y al Índice de Peligro (HI) de cuatro metales pesados para *Thaisella chocolata* de la zona A (Desembarcadero Pesquero Artesanal “El Faro”) y B (aproximadamente a dos km del DPA) en las estaciones invierno y primavera, distrito de Matarani, provincia de Islay, Región Arequipa, Perú

Zona	IDE (As)		IDE (Cd)		IDE (Cu)		IDE (Se)			
	A	N	A	N	A	N	A	N		
<i>Binv</i>	0.026	0.124	0.0031	0.0146	0.0298	0.139	NA	NA		
<i>Apri</i>	0.026	0.124	0.0031	0.0146	0.0298	0.139	NA	NA		
<i>Bpri</i>	0.029	0.136	0.0068	0.0319	0.0351	0.164	0.0005	0.0024		
	THQ (As)		THQ (Cd)		THQ (Cu)		THQ (Se)		HI	
	A	N	A	N	A	N	A	N	A	N
<i>Binv</i>	0.0890	0.4155	0.0031	0.0146	0.0007	0.0038	NA	NA	0.0928	0.4339
<i>Apri</i>	0.0890	0.4155	0.0031	0.0146	0.0007	0.0038	NA	NA	0.0928	0.4339
<i>Bpri</i>	0.0969	0.4522	0.0068	0.0319	0.0008	0.0041	0.0001	0.0004	0.1046	0.4886

A= Adulto. N= Niño

Cuadro 9. Indicadores de Imposex en *Thaisella chocolata* de la zona A (Desembarcadero Pesquero Artesanal “El Faro”) y B (aproximadamente a dos km del DPA) en las estaciones invierno y primavera, distrito de Matarani, provincia de Islay, Región Arequipa, Perú

Zona	M	H	Hi	MLC ± DE	HLC ± DE	HiLC ± DE	MLP ± DE	HiLP ± DE	RPLI	VSDI	FPLest	RPLIest	IMP %
<i>Binv</i>	30	55	5	56.5 ±3.4 ^b	55.5 ±3.5 ^a	55.8 ±3.5 ^a	22.1 ±3.0 ^c	1.4 ±0.5 ^a	6.3	1.0	0.03	6.4	9.1
<i>Apri</i>	36	32	4	51.6 ±4.9 ^a	52.4 ±5.2 ^b	56.0 ±5.3 ^a	11.4 ±4.8 ^a	2.5 ±0.6 ^a	21.9	1.5	0.05	21.5	12.5
<i>Bpri</i>	23	37	3	53.2 ±3.6 ^a	56.6 ±3.0 ^a	57.3 ±2.9 ^a	15.6 ±3.5 ^b	2.3 ±1.5 ^a	14.7	1.3	0.04	13.8	8.1
Total	88	124	12	53.6 ±4.6	55.1 ±4.2	56.3 ±3.7	16.1 ±6.0	2.0 ±0.9	12.4	1.2	0.04	12.0	9.6

M: machos; H: hembras; Hi: hembras con IMP; LC: media de longitud de la conchilla (mm); LP: media de longitud del pene (mm); DE: desviación estándar; RPLI: índice de la longitud relativa del pene; VSDI: índice de secuencia del conducto deferente; FPLest: índice de la longitud del pene de las hembras estandarizado; RPLI estándar: RPLI estandarizado; IMP %: porcentaje de Imposex.

^{a,b} Letras minúsculas iguales dentro de columnas indican promedios estadísticamente similares ($p > 0.05$)

de regresión lineal obtenida no fue significativa ($MLP = 0.8067 * MLC - 27.219$; $R^2 = 0.38$). MLC y MLP no se encontraron correlacionados en *Binv* ($r_p = 0.34$, $p = 0.06$), y la ecuación de regresión lineal no fue significativa ($MLP = 0.3045 * MLC + 4.852$; $R^2 = 0.11$). La MLC y MLP se encontró relacionada en *Apri* ($r_p = 0.52$, $p = 0.001$), siendo significativa la ecuación de regresión ($MLP = 0.5097 * MLC - 14.905$; $R^2 = 0.27$). Finalmente, MLC y MLP también se encontraron relacionadas para *Bpri* ($r_p = 0.42$, $p = 0.049$), siendo significativa la ecuación de regresión, pero con un bajo coeficiente de determinación ($MLP = 0.96 * MLC + 4.852$; $R^2 = 0.16$). HiLC y HiLP no se encontraron relacionados ($r_p = 0.12$, $p = 0.69$), y la ecuación de regresión lineal no fue significativa ($MLP = 0.0324 * MLC + 0.1766$; $R^2 = 0.01$).

DISCUSIÓN

Metales pesados en agua y sedimento

Los MP en el agua marina no sobrepasaron los valores guías de comparación na-

cional e internacional, a excepción de B que sobrepasó para *Apri* (5.448 mg/L) y *Bpri* (5.088 mg/L) según la Categoría 2, C1 (5 mg/L). Se sabe que B es abundante en el océano y es un micronutriente esencial para la biota, en especial para las algas marinas (Carrano *et al.*, 2009; Miller *et al.*, 2016). El B se presenta principalmente en la forma de borato y juega un papel importante en la estabilización de las paredes celulares de las plantas y de las algas marinas mediante el entrecruzamiento con los carbohidratos (Carrano *et al.*, 2009). Sin embargo, es tóxico en altas concentraciones en el ambiente marino, pero no parece que se biomagnifique a través de la cadena trófica (Miller *et al.*, 2016). Valores sobre 1-2 mg/L podrían estar afectando a las comunidades bentónicas acuáticas (Howe, 1998). Las CL_{50} aguda para los invertebrados acuáticos más sensibles son cercanos a 100 mg B/L con valores a 48 h de exposición que oscila entre 95 y 226 mg/L (Howe, 1998).

Los MPs en los sedimentos de la zona A y B en invierno y primavera no sobrepasaron los estándares internacionales de comparación. Los sedimentos marinos de Mata-

rani mostraron un riesgo ecológico potencial muy bajo para los MPs estudiados (Jolly *et al.*, 2021). Solo el Cu, aunque no sobrepasó los valores guía internacionales para A_{inv} (18 mg/L) se encontró muy cercano a la ISGQ según la norma canadiense (18.7 mg/L). El Cu es un metal esencial de preocupación ecotoxicológica, pero también es tóxico en altas concentraciones en las zonas costeras marinas contaminadas (Sánchez-Marín, 2020). La contaminación por Cu puede estar asociada a los cambios en la temperatura, salinidad y materia orgánica, y ser un motivo de especial preocupación debido a su presencia en los sitios contaminados; y a su mayor uso como biocida en los cascos de las embarcaciones desde la prohibición a nivel mundial del tributilestaño (TBT), con el aumento de la pesca, el turismo y las visitas de embarcaciones de investigación a la región (Holan *et al.*, 2019).

Metales pesados en *T. chocolata*

T. chocolata en *Binv*, *Apri* y *Bpri*, acumuló As, Cd y Cu y Se en sus tejidos, los que se presentaron en al menos una de las estaciones con valores de MPs sobre alguna de las ocho normas internacionales de comparación. Las concentraciones de MPs en *Binv*, *Apri* y *Bpri* fueron $Cu > As > Cd > Se$. En consecuencia, este caracol marino puede acumular diversas cantidades de MPs según su tasa de filtración, tasa de ingestión y calidad del fluido intestinal y pueden adoptar diversos mecanismos de desintoxicación (p. ej., almacenamiento en forma no tóxica o eliminación) (Jolly *et al.*, 2021). La acumulación de MPs en los tejidos musculares de estos caracoles podría tener un efecto directo sobre la salud ecosistémica en la cadena trófica (Jolly *et al.*, 2021).

La presencia de altos niveles de algunos MP como As, Cd y Cu y Se en los tejidos blandos de *T. chocolata* podría deberse a las funciones centrales del Cu y Se como componentes de biomoléculas metabólicamente importantes, incluidas algunas enzimas,

metaloenzimas y pigmentos respiratorios. Específicamente, se sugiere que los tejidos blandos de los caracoles podrían ser estructuras objetivo para Cd y Cu, debido a que sus concentraciones superaron los valores guías internacionales, lo que permite la ocurrencia de procesos de bioacumulación de estos metales pesados. Estos gasterópodos acuáticos generalmente acumulan y almacenan algunos MP y los utilizan en la síntesis de pigmentos como se ha observado en *Bellamyia bengalensis* y en *Physella acuta* (Al-Warid *et al.*, 2020).

Se ha señalado a esta especie de caracol como modelo de bioacumulación para siete MP (As, Cd, Cu, Cr, Hg, Pb y Se) en la bahía del Callao, Perú, minerales que sobrepasaron los límites permisibles para MPs según guías internacionales al acumularlos en los tejidos musculares blandos (Iannacone *et al.*, 2022). De igual forma, Condori *et al.* (2021) encontraron que, en Punta Meca y Santa Rosa e Ite (Perú), que *T. chocolata* en estadios de juvenil y adulto, superaron los valores guías de As y Cd, con rangos que oscilaron entre 5.39 a 21.14 mg/kg y 0.42 a 1.02 mg/kg, respectivamente. El Cd y As son usados en distintos productos agrícolas, pigmentos, pinturas, entre otros (Londoño-Franco *et al.*, 2016).

El As en los tejidos musculares de *T. chocolata* presentó valores de 17, 17 y 18.50 mg/kg en las zonas de *Binv*, *Apri* y *Bpri*, respectivamente. Las guías internacionales de ANZFSC y MS señalan que no debe superar a 1 mg/kg. El As es uno de los elementos más tóxicos para los humanos. Se presenta de forma natural en los ecosistemas marinos y debido a la acción antropogénica, este semi-metal se transfiere a la biota a través de la cadena alimentaria. El factor abiótico clave que influye en la presencia de As en los invertebrados es la contaminación antropogénica, seguido de la ubicación geográfica. Entre los factores biótico-cruciales está la genética de cada especie, incluidos su comportamiento trófico, el hábitat cercano a los sedimentos, las habilidades metabólicas,

las actividades fisiológicas de los organismos y los niveles de metales en su hábitat y alimento (Kato *et al.*, 2020). Los resultados sugieren que el potencial de transferencia, bioacumulación y biomagnificación de As en el ambiente marino puede ser favorecido por los hábitos bentónicos, como es el caso de *T. chocolata* y de diversos factores ambientales (Córdoba-Tovar *et al.*, 2022). Otras especies de gasterópodos marinos como *Alviniconcha hessleri*, *Ifremeria nautilei* y *Bathymodiolus manusensis* pueden acumular a nivel muscular valores similares de As (4.5-43.3 mg/kg) a lo observado en este trabajo (Kato *et al.*, 2020).

El Cu en los tejidos de *T. chocolata* obtuvo valores de 19, 19 y 22.39 mg/kg en las zonas de *Binv*, *Apri* y *Bpri*, respectivamente. Las guías internacionales de la FAO-OOMS indican que no se debe superar el valor de 10 mg/kg. Cárdenas *et al.* (2015) encontraron que *T. chocolata* sobrepasó los límites del Cu en los bancos naturales en Tancona, y Punta Coles en Moquegua, y en Meca-Lozas en Tacna, Perú, con valores entre 26.02 y 80.4 mg/kg, siendo este último ocho veces más de lo sugerido por FAO-OOMS. En los organismos vivos como los caracoles, el Cu actúa como una parte esencial de varias enzimas y es requerido para la síntesis de la hemoglobina. La mayoría de los organismos acuáticos han desarrollado mecanismos para regular las concentraciones de Cu en sus tejidos en presencia de concentraciones variables de Cu en el agua, los sedimentos y los alimentos en el ambiente (Jolly *et al.*, 2021).

El Se sobrepasó el valor guía MS en los tejidos de *T. chocolata* solamente en la zona *Bpri*. A pesar de ser un elemento esencial, su exceso puede causar efectos adversos en la biota. La literatura indica que la bioacumulación del Se en los sistemas acuáticos está influenciada en gran medida por factores ambientales, ecológicos y biológicos (Córdoba-Tovar *et al.*, 2022).

Riesgos en la salud por el consumo de moluscos

Los valores de THQ y de HI en base a cuatro metales pesados (As, Cd, Cu y Se) indican que no hay efectos adversos en la salud humana al consumir *T. chocolata*, dado que THQ y HI fue <1. El valor de HI indica que no hay ningún riesgo potencial no cancerígeno para los consumidores del área de estudio en la zona sur del Perú (Jolly *et al.*, 2021). Los resultados sugieren que este caracol podría estar libre de contaminación y, por ende, se puede consumir sin riesgo de la salud.

Imposex

Los hallazgos demostraron la distribución espacial-temporal en las dos zonas y en las dos estaciones en Matarani, así como la intensidad de IMP en el área de estudio, incluso después de las prohibiciones globales del TBT de 12 años atrás.

Se notaron diferencias significativas entre el MLP y el HiLP en *T. chocolata* en todos los caracoles. Los porcentajes de IMP fueron catalogados como bajos según Ragagnin y Turra (2022), así como los índices VSDI y RPLIest. Otras investigaciones en este caracol en tres puntos del puerto del Callao obtuvieron LC muy similares para el caso de los puntos cercanos al puerto, a diferencia del LC en el punto más alejado. Con respecto al LP en los machos, se encontró un valor promedio de 10.4 y 11.2 mm para los puntos cercanos y 17.8 mm para el punto más distante (Enrique *et al.*, 2019).

Chumbimune y Ponce (2015) obtuvieron en Ica un porcentaje de IMP mayor (33%) en el otoño en la Isla de San Gayán, ubicada cerca al litoral. No obstante, se han encontrado valores cercanos al 100% en puntos más cercanos a la zona litoral en el Callao y en Miraflores (Lima), con índices de VSDI entre I-IV; sin embargo, en el punto más alejado no se identificaron hembras con imposex (Braga *et al.*, 2018).

Debido a los efectos severos del TBT sobre la vida marina, la legislación internacional ha ido imponiendo gradualmente la prohibición del uso de TBT en las pinturas antiincrustantes. La Organización Marítima Internacional (OMI) en 2001 adoptó la Convención Internacional sobre el Control de Sistemas Antiincrustantes dañinos en las embarcaciones, que entró en vigor en septiembre de 2008 (Rumampuk *et al.*, 2018). Después de esta fecha, ha habido una prohibición mundial sobre el uso de TBT como agente antiincrustante. Los niveles bajos del porcentaje de IMP, los índices VSDI y RPLIest para *T. chocolata* en Matarani sugieren que, en el caso del sur del Perú, se está aplicando muy recientemente esta normatividad internacional, empleándose al parecer menor cantidad de estas pinturas, ocasionando que los indicadores de imposex sean bajos.

La zona A presenta actividades de descarga de especies marinas para el consumo, por lo cual hay presencia de embarcaciones pequeñas relacionadas con la pesquería artesanal, en tanto que en la zona B se desarrolla el turismo con recorridos en pequeñas embarcaciones para observar los vertebrados marinos (Ribeiro-Brasil *et al.*, 2021; Uc-Peraza *et al.*, 2022). Estas embarcaciones usualmente no pasan por inspecciones, lo que hace más complejo controlar cualquier uso ilegal de pinturas a base de TBT; a diferencia de la mayoría de grandes embarcaciones que están sujetos a inspecciones periódicas (Ribeiro-Brasil *et al.*, 2021), por lo que se encontraron valores bajos para el porcentaje de IMP (8.11-12.5), VSDI (I y II) y RPLIest (6.46-21.58) y sin diferencias significativas entre las dos zonas. Es así que el fenómeno de IMP parece representar un riesgo limitado para *T. chocolata*. Además, porque esta especie presenta un desarrollo larvario planctónico y, por lo tanto, la larva migra a sitios menos contaminados para asegurar el reclutamiento de nuevas cohortes poblacionales en los lugares menos contaminados,

como sucede con el caracol *Nassarius reticulatus* (Sousa *et al.*, 2009).

Mattos y Romero (2016) recomiendan el índice de severidad VSDI para *T. chocolata*; pues proporciona una medida realista de la masculinización y el potencial reproductivo de las hembras de los gasterópodos afectados. Además, representa una estimación de las concentraciones de TBT en el medio marino.

CONCLUSIONES

- El boro en el agua marina fue mayor a lo indicado en las normas en las dos zonas en primavera. Los metales pesados no sobrepasaron la normativa en el sedimento.
- Los valores de As, Cd y Cu en los tejidos de *T. chocolata* en todas las zonas evaluadas estuvieron por encima de las normas internacionales de comparación. Se solo fue mayor en una zona.
- Se observó una carencia de riesgo no carcinogénico por el consumo de moluscos marinos en base al cociente de riesgo objetivo (THQ) y al índice de peligro (HI) por MP en el caracol marino, sugiriendo ausencia de efectos adversos en la salud.
- Los porcentajes de IMP fueron considerados bajos. El RPLI (índice de la longitud relativa del pene), el RPLIest (RPLI estandarizado), y el índice de VSDI (índice de secuencia del conducto deferente) en *T. chocolata* presentaron una baja severidad.

Agradecimientos

Se agradece a la Universidad Científica del Sur (Científica) por el apoyo económico con el Fondo Semilla 2021 (030-2021-PRO99) para la presente investigación.

LITERATURA CITADA

1. **Alfaro MS. 2020.** Distribución batimétrica de *Thaisella chocolata* (Duclos) en la isla Guañape norte, La Libertad, Perú. Marzo 2016. Bol Inst Mar Perú 35: 19-28.
2. **Al-Warid HS, Ali HZ, Jaffar A, Nissan G, Haider A, Yosef A. 2020.** Use of two aquatic snail species as bioindicators of heavy metals in Tigris River-Baghdad. Iraqi J Sci 61: 1589-1592. doi: 10.24996/ijsc.2020.61.7
3. **[ANA] Autoridad Nacional del Agua. 2016.** Protocolo nacional para el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales R.J. N°010-2016-ANA. Lima, Perú: Ed ANA. 86 p.
4. **[ANZFSC] Australia New Zealand Food Standards Code. 2015.** Schedule 19. Maximum levels of contaminants and natural toxicants. Food Standards Australia New Zealand Act 1991.
5. **Braga I, Iannacone J, Santos S, Fillman G. 2018.** TBT is still a matter of concern in Peru. Chemosphere 205: 253-259. doi: 10.1016/j.chemosphere.-2018.04.097
6. **Cadavid-Muñoz N, Arango-Ruiz A. 2020.** El mercurio como contaminante y factor de riesgo para la salud humana. Rev Lasallista Investig 7: 280-296. doi: 10.22507/rli.v17n2a21
7. **Cantillán M, Avendaño M, Rojo M, Olivares A. 2011.** Parámetros reproductivos y poblacionales de *Thais chocolata* (Duclos, 1832) (Gastropoda, Thaididae), en la reserva marina La Rinconada, Antofagasta, Chile. Lat Am J Aquat Res 39: 499-511. doi: 10.3856/vol39-issue3-fulltext-10
8. **Cárdenas F, Pastor-Cuba R, Balda-rrago D, Castañeda-Muñoz V, Romu-cho VY. 2015.** Trazas de metales en agua, sedimento y organismos bentónicos en bancos naturales de las Regiones Tacna y Moquegua. Inf Inst Mar Perú 42: 122-136.
9. **Carrano CJ, Schellenberg S, Amin SA, Green DH, Küpper FC. 2009.** Boron and marine life: a new look at an enigmatic bioelement. Mar Biotechnol 11: 431. doi: 10.1007/s10126-009-9191-4
10. **Castro I, Fillmann G. 2012.** High tributyltin and imposex levels in the commercial muricid *Thais chocolata* from two Peruvian harbor areas. Environ Toxicol Chem 31: 955-960. doi: 10.1016/j.rsma.2019.100510
11. **[CCME] Canadian Council of Ministers of the Environment. 2022.** Water quality guidelines for the protection of aquatic life freshwater, marine. [Internet]. Available in: <https://ccme.ca/en/resources/water-aquatic-life#>
12. **[CE] Comunidad Europea. 2016.** Reglamento (CE) N° 1881/2006 de la Comisión de 19 de diciembre de 2006, por el que se fija el contenido máximo de determinados contaminantes en los productos alimenticios (Texto pertinente a efectos del EEE). [Internet]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/ALL/?uri=CELEX%3A32006R1881>
13. **[CEQG] Canadian Environmental Quality Guidelines. 2022.** Summary of existing Canadian environmental quality guidelines. [Internet]. Available in: http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/dgaam/publicaciones/curso_cierreminas/02_T%C3%A9cnico/03_Calidad%20de%20Aguas/TecCalAg-L2_CCME%20WQ%20Standards.pdf
14. **Chumbimune L, Ponce Z. 2015.** Monitoreo de contaminación por tributilestaño (TBT) en puertos de Paracas, Ica (Perú), mediante el fenómeno de Imposex en *Stramonita chocolata*. Científica 12: 222-230. doi: 10.21142/cient.v12i3.328
15. **Collado G, Osorio C, Retamal M. 2010.** Imposex en los caracoles marinos *Acanthina monodon* (Pallas, 1774) y *Nassarius coppingeri* E.A. Smith, 1881 en el sur de Chile. Cienc Tecnol Mar 33: 67-76.

16. **Condori L, Chaparro E, Tirado L. 2021.** Bioacumulación de metales pesados en *Concholepas concholepas*, *Fissurella latimarginata* y *Thais chocolata* en dos bancos naturales de Ite, Perú. *Ciencia & Desarrollo* 20: 3-16. doi: 10.33326/26176033.2021.2.1214
17. **Córdoba-Tovar L, Marrugo-Negrete J, Ramos-Barón P, Díez S. 2022.** Drivers of biomagnification of Hg, As and Se in aquatic food webs: A review. *Environ Res* 204: 112226. doi: 10.1016/j.envres.2021.112226
18. **[DOH-RSA] Department of Health - Republic of South Africa. 2016.** Foodstuffs, cosmetics and disinfectants act of 1972, No. 54. Regulations relating to maximum levels for metals in foodstuffs. Government Gazette N.º 40252. p 9-17. [Internet]. Available in: https://members.wto.org/crnattachments/2016/SPS/ZAF/16_3892_00_e.pdf
19. **El-Amier YA, Bessa AZE, Elsayed A, El-Esawi MA, AL-Harbi MS, Samra BN, Kotb WK 2021.** Assessment of the heavy metals pollution and ecological risk in sediments of Mediterranean Sea drain estuaries in Egypt and phytoremediation potential of two emergent plants. *Sustainability* 13: 12244. doi: 10.3390/su132112244
20. **El Peruano. 2017.** Aprueban estándares de calidad ambiental (ECA) para agua y establecen disposiciones complementarias. Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM. [Internet]. Disponible en: <https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-estandares-calidad-ambiental-ea-agua-establecen-disposiciones>
21. **Enrique S, Guabloche A, Tuesta E, Iannacone J, Castro I. 2019.** Imposex responses in *Thaisella chocolata* and *Xanthochorus buxeus* from Callao harbor, Peru. *Reg Stud Mar Sci* 26: 100510. doi: 10.1016/j.rsma.2019.100510
22. **[EPA] United States Environmental Protection Agency. 2007.** Method 6010C (SW-846): Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry, Revision 3. [Internet]. Available in: https://19january2017snapshot.epa.gov/homeland-security-research/epa-method-6010c-sw-846-inductively-coupled-plasma-atomic-emission_.html
23. **[FAO-WHO] Food and Agriculture Organization of the United Nations - World Health Organization. 2018.** Codex Alimentarius Commission on contaminants in foods, Twelfth Session Report. Utrecht, The Netherlands: FAO-WHO. 169 p.
24. **[FDA] US Food & Drug Administration. 2001.** Fish and fisheries products hazards and controls guidance. Third Edition June 2001. <http://www.cfsan.fda.gov/~comm/haccp4i.html>
25. **Feoktistova L, Clark Y. 2018.** El metabolismo del cobre. Sus consecuencias para la salud humana. *Medisur: Rev Cienc Méd Cienfuegos* 16: 579-587.
26. **Fuentes MV, Rojas de Astudillo L, Diaz A, Martinez G 2010.** Distribución de metales pesados en los sedimentos superficiales del Saco del Golfo de Cariaco, Sucre, Venezuela. *Rev Biol Trop* 58: 129-140.
27. **França MA, Otegui MBP, Zamprogno GC, Menario JMFS, Costa MBda. 2021.** Imposex and ecological quality status in *Stramonita brasiliensis* (Claremount & Reid, 2011): a temporal (2007 to 2018) and spatial evaluation on the southeastern coast of Brazil. *J Sea Res* 174: 102080. doi: 10.1016/j.seares.2021.102080
28. **García EM, Cruz-Motta JJ, Farina O, Bastidas C. 2008.** Anthropogenic influences on heavy metals across marine habitats in the western coast of Venezuela. *Cont Shelf Res* 28: 2757-2766. doi: 10.1016/j.csr.2008.09.020
29. **Gibbs RJ, Matthews MD, Link DA. 1971.** The relationship between sphere size and settling velocity. *J Sediment Petrol* 41: 7-18. doi: 10.1306/74D721D0-2B21-11D7-8648000102C1865D

30. **Guabloche A, Alvarez J, Rivas R, Hurtado S, Pradel R, Iannacone J. 2013.** Imposex in the marine snail *Xanthochorus buxea* (Broderip, 1833) (Muricidae) from the South American Pacific. *Biologist* 11: 237-249. doi: 10.24039/rtb2013112402
31. **Guzmán PARA. 2021.** Muricidae Rafinesque, 1815 (Gastropoda: Neogastropoda) de las costas de Pucusana (Lima-Perú). *Sagasteguiana* 9: 15-28.
32. **Holan JR, King CK, Proctor AH, Davis AR. 2019.** Increased sensitivity of subantarctic marine invertebrates to copper under a changing climate - Effects of salinity and temperature. *Environ Pollut* 249: 54-62. doi: 10.1016/j.envpol.2019.02.016.
33. **Howe PD. 1998.** A review of boron effects in the environment. *Biol Trace Elem Res* 66: 153-166. doi: 10.1007/BF02783135.
34. **Iannacone J, Romero S, Rosas J, Guabloche A, Alvareño L, Castañeda L, Carrasco L. 2022.** Metals in *Thaisella chocolata* from the Callao Bay, Perú. *Int. J Mech Eng Educ* 7: 1356-1364.
35. **[IMARPE] Instituto del Mar del Perú. 2017.** Anuario científico tecnológico, 2016. [Internet]. Disponible en: <https://repositorio.imarpe.gob.pe/handle/20.500.12958/3180>
36. **Jolly YN, Rakib RJ, Islam S, Akter S, Idris AM, Phoungthong K. 2021.** Potential toxic elements in sediment and fishes of an important fish breeding river in Bangladesh: a preliminary study for ecological and health risks assessment. *Toxin Rev* 1: 1-14. doi: 10.1080/15569543.2021.1965624
37. **Kato LS, Ferrari RG, Leite JVM, Conte-Junior CA. 2020.** Arsenic in shellfish: a systematic review of its dynamics and potential health risks. *Mar Pollut Bull* 161: 111693. doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111693
38. **Lee SH, Chen YS, Chen, CF, Albarico FPJB, Lim YC, Wang MH, Chen CW, et al. 2022.** Butyltin contamination in fishing port sediments after the ban of tributyltin antifouling paint: a case of Qianzhen fishing port in Taiwan. *Water* 14: 813. doi: 10.3390/w14050813
39. **Londoño-Franco L, Londoño-Muñoz P, Muñoz-García F. 2016.** Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial* 14: 145-153. doi: 10.18684/BSAA(14)145-153
40. **López-Bellido F, López L. 2013.** Selenio y salud; valores de referencia y situación actual de la población española. *Nutr Hosp* 28: 1396-1406.
41. **Mattos Y, Romero MS. 2016.** Imposex in *Thaisella chocolata* (Duclos, 1832) (Gastropoda: Muricidae) Caldera Bay, Chile. *Lat Am J Aquat Res* 44: 825-834. doi: 10.3856/vol44-issue4-fulltext-18
42. **Medina-Pizzali M, Robles P, Mendoza M, Torres C. 2018.** Ingesta de arsénico: el impacto en la alimentación y salud humana. *Rev Peru Med Exp Salud Pública* 35: 93-102. doi: 10.17843/rpmpesp.2018.351.3604
43. **Miller EP, Wu Y, Carrano CJ. 2016.** Boron uptake, localization, and speciation in marine brown algae. *Metallomics* 8: 161-169. doi: 10.1039/c5mt00238a
44. **[MS] Ministerio da Saude. 2013.** Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução - RDC N° 42 de 29 de agosto de 2013. Dispõe sobre o Regulamento Técnico MERCOSUL sobre Límites Máximos de Contaminantes Inorgânicos em Alimentos. [Internet]. Disponible en: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2013/rdc0042_29_08_2013.html
45. **Naggar Y, Khalil M, Ghorab M. 2018.** Environmental pollution by heavy metals in the aquatic ecosystems of Egypt. *Open Access J Toxicol* 3: 555603. doi: 10.19080/OAJT.2018.03.555603

46. **Otegui PMB, Zamprogno GC, França MA, Daros BN, Albino J, da Costa MB. 2019.** Imposex response in shell sizes of intertidal snails in multiple environments. *J Sea Res* 147: 10-18. doi: 10.1016/j.seares.2019.02.003
47. **Pérez P, Azcona MI. 2012.** Los efectos del cadmio en la salud. *Rev Esp Med Quir* 17: 199-205.
48. **Perumal K, Antony J, Muthuramalingam S. 2021.** Heavy metal pollutants and their spatial distribution in surface sediments from Thondi coast, Palk Bay, South India. *Environ Sci Eur* 33: 63. doi: 10.1186/s12302-021-00501-2
49. **[PRODUCE] Ministerio de la Producción. 2016.** Anuario estadístico pesquero y acuícola, 2015. [Internet]. Disponible en: <https://www.produce.gob.pe/documentos/estadisticas/anuarios/anuario-estadistico-pesca-2015.pdf>
50. **[PRODUCE] Ministerio de la Producción. 2021.** Anuario Estadístico Pesquero y Acuícola 2020. Lima, Perú: PRODUCE. 182 p.
51. **Qu CS, Ma ZW, Yang J, Liu Y, Bi J, et al. 2012.** Human exposure pathways of heavy metals in a lead-zinc mining area, Jiangsu Province, China. *PLoS ONE* 7: e46793. doi: 10.1371/journal.pone.0046793
52. **Ragagnin MN, Turra A. 2022.** Imposex incidence in the sandy beach snail *Hastula cinerea* reveals continued and widespread tributyltin contamination after its international ban. *Reg Stud Mar Sci* 49: 102118. doi: 10.1016/j.rsma.2021.102118
53. **Ribeiro-Brasil DRG, Castro ÍB, Petracco M, Batista RM, Brasil LS, Ferreira JA, et al. 2021.** Spatial distribution of butyltins and imposex in eastern Brazilian Amazon. *Mar Pollut Bull* 165: 112155.
54. **Rice EW, Baird RB, Eaton AD. 2017.** Standard methods for the examination of water and wastewater. 23th ed. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. [Internet]. Available in: <https://www.wef.org/resources/publications/books/StandardMethods/>
55. **Rivas R, Pradel R, Hurtado S, Cornelio D, Mendoza J, Guabloche A, Iannacone J, Alvarino L, Castañeda L. 2017.** Imposex en *Crassilabrum crassilabrum* (Neogastropoda; Muricidae) en la costa central del Perú. *Rev Inv Vet Perú* 28: 834-842. doi: 10.15381/rivep.v28i4.13873
56. **Rumampuk ND, Rumengan IF, Rompas RM, Undap SL, Boneka FB, Jensen KR, Lasut MT. 2018.** Tributyltin (TBT) contamination and impacts on imposex in *Thalessa aculeata* (Mollusca: Neogastropoda: Muricidae) in Minahasa Peninsula coastal waters, North Sula-wesi, Indonesia. *AAACL Bioflux* 11: 184-193.
57. **Sánchez-Marín P. 2020.** A review of chemical speciation techniques used for predicting dissolved copper bioavailability in seawater. *Environ Chem* 17: 469-478. doi: 10.1071/EN19266
58. **[SANIPES] Organismo Nacional de Sanidad Pesquera. 2016.** Indicadores sanitarios y de inocuidad para los productos pesqueros y acuícolas para mercado nacional y de exportación. Resolución de Dirección Ejecutiva N° 057-2016-SANIPES/DE.
59. **Schøyen M, Green NW, Hjermann DØ, Tveiten L, Beylich B, Øxnevad S, Beyer J. 2019.** Levels and trends of tributyltin (TBT) and imposex in dogwhelk (*Nucella lapillus*) along the Norwegian coastline from 1991 to 2017. *Mar Environ Res* 144: 1-8. doi: 10.1016/j.marenvres.2018.11.011
60. **Sierra-Marquez L, Sierra-Marquez J, De la Rosa J, Olivero-Verbel J. 2018.** Imposex in *Stramonita haemastoma* from coastal of Cartagena, Colombia. *Braz J Biol* 78: 548-555. doi: 10.1590/1519-6984.173301
61. **Sousa A, Laranjeiro F, Takahashi S, Tanabe S, Barroso CM. 2009.** Imposex and organotin prevalence in a European post-legislative scenario: Temporal trends

- from 2003 to 2008. *Chemosphere* 77: 566-573. doi: 10.1016/j.chemosphere.-2009.06.049
62. **Uc-Peraza RG, Delgado-Blasé VH, Rendón-von Osten J, Castro IB, Proietti MC, Fillmann G. 2022.** Mexican paradise under threat: the impact of antifouling biocides along the Yucatán Peninsula. *J Hazard Mater* 427: 128162. doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.-128162
63. **UNE-EN ISO 17294-2:2017. 2017.** Calidad del agua. Aplicación de espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS). Parte 2: Determinación de elementos seleccionados incluyendo isótopos de uranio. (ISO 17294-2:2016). [Internet]. Available in: [https://www.laboratuar.com/es/testler/sivilar-ve-yakit-testleri/iso-17294-2-su-kalitesi—enduktif-olarak-eslestirilmis-plazma-kutle-spektrometrisinin-\(icp-ms\)-uygulanmasi—bolum-2:-uranyum-izotoplari-dahil-secilen-elementlerin-belirlenmesi/](https://www.laboratuar.com/es/testler/sivilar-ve-yakit-testleri/iso-17294-2-su-kalitesi—enduktif-olarak-eslestirilmis-plazma-kutle-spektrometrisinin-(icp-ms)-uygulanmasi—bolum-2:-uranyum-izotoplari-dahil-secilen-elementlerin-belirlenmesi/)
64. **[USEPA] United States Environmental Protection Agency. 2022.** National recommended aquatic life criteria table. [Internet]. Available in: <https://www.epa.gov/wqc/national-recommended-water-quality-criteria-aquatic-life-criteria-table#table>
65. **Valkirs AO, Davidson B, Kear LL, Fransham RL. 1991.** Long-term monitoring of tributyltin in San Diego Bay, California. *Mar Environ Res* 32: 151-167. doi: 10.1016/0141-1136(91)90039-B
66. **Villanueva-Fragoso S, Páez-Osuna YF. 1996.** Niveles de metales en el Golfo de México: agua, sedimentos y organismos. En: Botello AV, Rojas-Galaviz JL, Benitez-Torres JA, Zárata-Lomeli DJ (eds). *Golfo de México. Contaminación e impacto ambiental, diagnóstico y tendencias*. Univ. Autónoma de Campeche.- p 309-347.
67. **Yunus K, Zuraidah MA, John A. 2020.** A review on the accumulation of heavy metals in coastal sediment of Peninsular Malaysia. *Ecofeminism and Climate Change* 1: 21-35. doi: 10.1108/EFCC-03-2020-0003