

8. Metal(oid)es en ecosistemas costeros de Sonora: Impactos y riesgos



MARTÍN ENRIQUE JARA MARINI*

LETICIA GARCÍA RICO**

JAQUELINE GARCÍA HERNÁNDEZ***

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.360.08>

Resumen

La contaminación ambiental es una problemática mundial. Las emisiones de contaminantes, como los metales y metaloides, que se dispersan en los ambientes cuando no son adecuadamente tratados y/o confinados, representan un riesgo permanente para la salud de los ecosistemas. El estado de Sonora no escapa a la misma por diferentes compuestos y elementos, como los metal(oid)es. La problemática con estos elementos en los ecosistemas costeros de Sonora se relaciona, principalmente, con las emisiones de actividades agrícolas, acuícolas y urbanas. Este trabajo es una recopilación de estudios que los autores han publicado sobre esta problemática, en los que se han monitoreado/estudiado los niveles de estos elementos en matrices ambientales y se han evaluado los riesgos a la salud por el consumo de algunas especies de origen marino. Los resultados de estos estudios indican que los niveles acumulados en suelos, sedimentos y organismos representan riesgos para la salud tanto de los organismos propios de tales ecosistemas como de las personas que son expuestas a ellos por diferentes vías. Los riesgos son mayores en sectores vulnerables de la población, como los niños y las mujeres

* Doctor en Ciencias. Profesor-investigador titular en el Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3346-6416> ; correspondencia: mjara@ciad.mx

** Doctora en Biotecnología. Profesora-investigadora titular en el Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1618-2238>

*** Doctora en Ciencias. Profesora-investigadora titular en el Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5251-0526>

embarazadas. Esto es clave para proponer cambios en los patrones de consumo de especies acuáticas, basados no solo en los beneficios nutricios sino también en los riesgos para la salud por la presencia de contaminantes, proveyendo de seguridad alimentaria al disminuirlos. Se requiere evaluar la exposición a metal(oid)es por polvos en regiones rurales, a causa de la vulnerabilidad dadas sus condiciones de vida.

Palabras clave: *contaminación, metales y metaloides, salud de los ecosistemas, riesgos a la salud.*

Introducción

La contaminación ambiental es una problemática mundial. Las diferentes actividades humanas generan emisiones de diversos tipos de agentes tóxicos, que se dispersan en los ambientes cuando no son adecuadamente tratados y/o confinados. También las fuentes de los contaminantes pueden ser naturales (como el vulcanismo y el intemperismo), aunque las antropogénicas son las que más impactos negativos han tenido (Bracamonte-Terán et al., 2023). Los países en desarrollo son los más vulnerables a la contaminación porque sus regulaciones para el tratamiento y confinamiento suelen ser más laxas, y/o las regulaciones vigentes no se aplican adecuadamente. La exposición a los agentes tóxicos es un riesgo permanente para la salud (FAO/WHO, 2011).

Considerando que la problemática de la contaminación es mundial, el estado de Sonora no escapa a la misma por diferentes compuestos y elementos, como los metal(oid)es. La problemática con estos elementos en los ecosistemas costeros de Sonora se relaciona, principalmente, con las emisiones de actividades agrícolas, acuícolas y urbanas (García-Hernández et al., 2018; Molina-García et al., 2021; Bracamonte-Terán et al., 2023). Este trabajo es una recopilación de estudios que los autores hemos publicado sobre dicha problemática, en los que se han monitoreado/estudiado los niveles de contaminantes metálicos en matrices ambientales y se han evaluado los riesgos para la salud por el consumo de algunas especies de origen marino.

Metodología

Área de estudio

El estado de Sonora se localiza en el noroeste de México, entre las coordenadas $32^{\circ}29'35''\text{N}$ – $115^{\circ}03'10''\text{O}$ y $26^{\circ}18'58''\text{N}$ – $108^{\circ}25'22''\text{O}$. Posee una línea de costa de 1250 km, con una gran variedad de ecosistemas como bahías, lagunas, ciénegas y esteros. En el estado de Sonora existen varios ecosistemas con problemas de contaminación con metal(oid)es, asociados a diversas actividades humanas, por lo que se seleccionaron 10 sitios costeros (Figura 1).

Figura 8.1. Áreas de estudio en la zona costera de Sonora, noroeste de México



Fuente: elaboración propia.

Muestreos, procesamiento y cuantificación de elementos

Se usó un muestreo aleatorio simple para coleccionar muestras representativas de suelos, sedimentos y organismos en sitios costeros de Sonora. Se

colectaron especímenes de moluscos (almejas, balano, caracoles, mejillones y ostiones), isópodos (ligia), crustáceos (camarones, jaibas, langosta y pulpo) y peces (ángel, blanquillos, botete, cabrillas, carpa, chihuil, cochito, curvina, jurel, lenguado, lisa, lobina, mero, mojarra, pámpanos, pargo, pelágicos mayores, pez loro, pez sol, rayas, roncacho, sardina, tiburones y tilapia). Las muestras fueron transportadas al laboratorio en hieleras, disectadas para obtener los tejidos comestibles, secadas por liofilización (133×10^{-3} mBar y -40°C por 72 h) y almacenadas (en refrigeración a 4°C) hasta su posterior análisis.

Las muestras de suelos y sedimentos fueron tamizadas a $<20 \mu\text{m}$ y $<62 \mu\text{m}$, respectivamente, luego 0.3 ± 0.003 g fueron sometidas a una digestión a 140°C por 5 h, usando $\text{HNO}_3:\text{HCl}$ concentrados (proporción 3:1, respectivamente). Las muestras de organismos fueron digeridas vía húmeda (HNO_3 concentrados y H_2O_2 al 30% v/v). La cuantificación de As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Se y Zn totales en sedimentos, suelos, polvos y organismos fueron realizadas por las técnicas de espectroscopia de absorción atómica, usando flama y generador de vapor e hidruros (Varian, SpectrAA 240 FS), fluorescencia de rayos X (Thermo Scientific, Niton FXLGOLDD) y voltamperometría (Metrohm, VA 797), de acuerdo con las especificaciones de los fabricantes. Los resultados de las concentraciones fueron reportados tanto en base húmeda (BH) como en base seca (BS).

Riesgos para la salud

Se realizaron muestreos aleatorios simples para seleccionar las casas a muestrear y localizar el mayor número posible de personas en cada una. La ingestión dietética habitual se evaluó con un recordatorio de 24 horas (R-24h) y un cuestionario de frecuencia alimentaria (CFA), los cuales fueron validados y están vinculados a la base de datos de composición alimentaria del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A. C. (CIAD) para estimar la ingestión de componentes de alimentos.

Posteriormente, se determinó el Riesgo a la Salud (RS) para cada metal(l)ide, usando el modelo desarrollado por la Federación para la Evaluación de Sitios Contaminados de Canadá. Las fórmulas y valores usados para

calcular los riesgos para la salud son detallados en García-Hernández et al. (2018), usando las partes comestibles de los organismos.

Resultados

Las concentraciones de metales en las matrices ambientales que se presentan son una recopilación de publicaciones que los tres investigadores hemos realizado sobre los impactos de metal(oid)es en ecosistemas costeros de Sonora.

Las concentraciones ($\mu\text{g g}^{-1}$) de metal(oid)es en suelos, sedimentos y polvos (Cuadro 1) son muy variables, con altos niveles de algunos elementos que tienen un mayor potencial tóxico, como As (4.10-54.8), Cd (0.71-3.57), Hg (0.17-2.00), Mn (5.00-2,731), Ni (<LD-20.6) y Pb (<LD-236.7). Las áreas con mayores niveles de metal(oid)es en los sedimentos fueron el delta del Río Colorado y la laguna El Tóbari. Los niveles de acumulación son relativos y generalmente son comparables a los valores en los que se ha reportado algún efecto adverso para la salud (MacDonald et al., 1996).

Cuadro 8.1. Concentraciones de metal(oid)es ($\mu\text{g g}^{-1}$, BS) en sedimentos, suelos y polvos de sitios de las zonas costeras de Sonora (Áreas: áreas de estudio. Ref: referencias.

TEL: Nivel Umbral de Efecto, en $\mu\text{g g}^{-1}$ BS. PEL: Nivel de Efecto Probable, $\mu\text{g g}^{-1}$ BS).

	Sedimentos	Sedimentos	Suelos y polvos	TEL	PEL
As	–	28.3-54.8	4.10-44.0	7.24	41.6
Cd	0.71-1.33	<LD-3.57	–	0.68	4.21
Cr	3.08-17.7	–	–	52.3	160
Cu	2.18-9.66	<LD-44.0	29.6-214.4	18.7	108
Fe	600.0-43.700	7,100 -42,300	1,089-85,107	–	–
Hg	–	0.17-2.00	–	0.13	0.7
Mn	125.4-449.2	217.0-1,424.0	5.00-2,731	–	–
Ni	–	<LD-20.6	–	15.9	42.8
Pb	7.20-11.7	<LD-76.0	<2.50-236.7	30.2	112
Se	–	0.50-1.30	–	–	–
Zn	–	15.2 -128.1	65.9 -3,102	124	271
Áreas ^a	2	1, 3	4		
Ref ^b	A	B, C, D	E		

Nota: Áreas de estudio: 1. Delta del Río Colorado; 2. Bahía Bacoichibampo; 3. Laguna El Tóbari; 4. Costa de Hermosillo.

Fuente: A. Ochoa-Valenzuela et al. (2009); B. García-Hernández et al. (2013a); C. Jara-Marini et al. (2013); D. Vargas-González et al. (2017); E. Bracamonte-Terán et al. (2023).

Otra manera de medir los impactos de las actividades humanas es evaluando el contenido de metal(oid)es en suelos, incluyendo las fracciones finas ($<20\ \mu\text{m}$) consideradas como polvos, ya que son las que se dispersan más rápido y a grandes distancias, además de que son las que pueden ingresar a las vías respiratorias (Bracamonte-Terán et al., 2023). Los niveles de estos elementos en las fracciones finas de suelos colectados en la región costera-agrícola de Hermosillo son mayores a los encontrados en los sedimentos de las otras áreas en todos los elementos estudiados, pero destacan As ($4.10\text{-}44.0\ \mu\text{g g}^{-1}$ BS), Mn ($5.00\text{-}2,731\ \mu\text{g g}^{-1}$ BS) y Pb ($<2.50\text{-}236.7\ \mu\text{g g}^{-1}$ BS).

En cuanto al contenido de metal(oid)es en los organismos marinos (Cuadro 2), los valores de los elementos antes señalados (tanto en BS como BH) son muy variables. Sin embargo, cabe destacar el contenido de algunos elementos considerados potencialmente tóxicos, como As y Cr en los peces ($<\text{LD}\text{-}18.2\ \mu\text{g g}^{-1}$ BS y $0.37\text{-}78.1\ \mu\text{g g}^{-1}$ BS, respectivamente), lo que indica que pueden ser usados como biomonitores.

También destaca el intervalo de concentraciones de Cd en isópodos ($16.5\text{-}140.0\ \mu\text{g g}^{-1}$ BS), que es significativamente mayor a los encontrados en el resto de los organismos estudiados. Esto es indicativo de que los isópodos son organismos acumuladores y tolerantes a este elemento, y que pueden ser usados como biomonitores de la exposición a varios elementos. Además, se destacan las concentraciones mayores de Hg en los moluscos ($0.05\text{-}4.02\ \mu\text{g g}^{-1}$ BS) y peces ($<\text{LD}\text{-}4.54\ \mu\text{g g}^{-1}$ BS), respecto a las determinadas en los demás organismos. Asimismo, es notoria la acumulación de Mn en peces ($7.40\text{-}2,651.0\ \mu\text{g g}^{-1}$ BS), lo que indica que son acumuladores de este elemento y pueden ser usados como biomonitores de la exposición de dicho elemento.

En moluscos e isópodos se determinaron las mayores concentraciones de Pb ($0.74\text{-}10.7\ \mu\text{g g}^{-1}$ y $24.4\text{-}144.0\ \mu\text{g g}^{-1}$, respectivamente), respecto a los otros organismos. Esto indica que ambas especies pueden ser utilizadas como biomonitoras de la exposición a Pb en ambientes costeros marinos.

Finalmente, destacan las concentraciones de Se acumuladas en los moluscos y peces ($3.77\text{-}23.1\ \mu\text{g g}^{-1}$ y $0.48\text{-}18.4\ \mu\text{g g}^{-1}$, respectivamente), lo que es indicativo de que estos organismos pueden ser usados para el monitoreo de la exposición a este elemento. Las implicaciones sobre la acumulación de metal(oid)es en los organismos tienen varias aristas, por lo que el uso

de organismos biomonitores puede ser clave para evaluar los impactos de las actividades humanas en los ecosistemas costeros.

Cuadro 8.2. Concentraciones de metal(oid)es ($\mu\text{g g}^{-1}$, base seca (BS) o base húmeda (BH)) en organismos marinos de sitios de las zonas costeras de Sonora (Áreas: áreas de estudio. Ref: referencias).

	<i>Moluscos</i>	<i>Isópodos</i>	<i>Crustáceos</i>	<i>Peces</i>	<i>NOM-242-SSA1(2009)</i>
As	<LD-0.15 (BH)	–	–	<LD-18.2 (BS)	80 (BH)
Cd	<0.40-4.01 (BH) 0.20-1.35 (BS)	16.5-140.0 (BS)	–	<LD-1.55 (BS)	0.50-2.00 (BH)
Cr	0.39-1.03 (BS)	–	0.40-1.97 (BS)	0.37-78.1 (BS)	–
Cu	1.40-20.2 (BH) 2.18-96.8 (BS)	<LD-325.0 (BS)	0.40-65.2 (BS)	<LD-83.9 (BS)	–
Fe	56.1-1,190.1 (BS)	–	38.0-189.0 (BS)	38.8-2,439.0 (BS)	–
Hg	0.02–0.17 (BH) 0.05-4.02 (BS)	0.20-0.65 (BS)	<0.16-0.17 (BH)	<LD-4.54 (BS) <LD-0.65 (BH)	0.50-1.00 (BH)
Mn	3.20-49.9 (BS)	–	5.37-32.7 (BS)	7.40-2,651.0 (BS)	–
Ni	3.50-5.30 (BS)	–	–	<LD-6.50 (BS)	–
Pb	<LD-0.60 (BH) 0.74-10.7 (BS)	24.4-144.0 (BS)	–	<LD-2.70 (BS)	0.50-1.00 (BH)
Se	0.17-0.28 (BH) 3.77-23.1 (BS)	–	–	0.48-18.4 (BS)	–
Zn	8.00-30.8 (BH) 34.5-1,876.9 (BS)	75.5-326.0 (BS)	52.5-482.7 (BS)	20.0-284.0 (BS)	–
Área ^a	3, 4, 6, 7	5	4 y 7	1, 2, 4 y 7	
Ref ^b	B, E, F, G, H	C	E, H	A, C, E, F, H	

^a Áreas de estudio: (1) Delta del Río Colorado; (2) Costas de El Choyudo y Puerto Peñasco; (3) Golfo de Santa Clara; (4) Laguna El Tóbari; (5) Costas de Puerto Peñasco, Puerto Libertad y Guaymas; (6) Esteros Morúa, Santa Cruz y Santa Bárbara; 7). Bahía Kino.

^b Referencias: (A) García-Hernández et al. (2007); (B) Cadena-Cárdenas et al. (2009); (C) García-Hernández et al. (2013b); (D) García-Hernández et al. (2015); (E) García-Hernández et al. (2018); (F) García-Rico y Tejeda-Valenzuela (2020); (G) García-Molina et al. (2021); (H). Murillo-Castillo et al. (2022).

Discusión

Las concentraciones de As, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn en sedimentos de diversos ecosistemas de Sonora (Cuadro 1) fueron mayores a los valores de efecto adverso (Nivel Umbral de Efecto, TEL por sus siglas en inglés; y Nivel de Efecto Probable, PEL por sus siglas en inglés) reportados por MacDonalds et al. (1996). Ecosistemas como el delta del Río Colorado y la laguna El Tóbari son considerados como impactados por metal(oid)es, asociados a actividades agrícolas, acuícolas y descargas urbanas (García-Hernández et al., 2013; Jara-Marini et al., 2013). También, las concentraciones de Cd, Mn y

Pb fueron altas en la Bahía Bacochibampo, aledaña a Guaymas, aunque solo Cd fue mayor al TEL. Esta ciudad es impactada por actividades antropogénicas como las descargas urbanas y la generación de electricidad (García-Rico et al., 2003). En todos los estudios con sedimentos, los ecosistemas estudiados fueron considerados como moderadamente impactados por metal(oid)es resultado de diversas actividades humanas.

En la fracción fina de los suelos colectados en la zona costera de Hermosillo (Bracamonte-Terán et al., 2023), los valores de As y Pb fueron mayores a los valores TEL y PEL (MacDonalds et al., 1996), lo que implica que pueden ocurrir efectos adversos cuando son inhalados por el contenido de estos elementos, aunado a los efectos adversos que las propias partículas pueden provocar en el tracto respiratorio. Estos dos elementos están asociados a enfermedades, como diferentes tipos de cáncer, afectaciones al sistema respiratorio y al sistema cognitivo en niños preescolares (Bracamonte-Terán et al., 2023).

En cuanto a los organismos marinos estudiados, todas las especies estudiadas mostraron tener potencial para ser usados como biomonitores, ya que acumularon cantidades relativamente altas de metal(oid)es. En particular, los peces son viables para este propósito, considerando que en las áreas de estudio existen muchas especies de esos organismos con diferentes características biológicas, que pueden ser estudiados en varios tipos de ecosistemas acuáticos de la región.

Los isópodos mostraron ser acumuladores de Cd, por lo que resultan ser un buen organismo biomonitor de la contaminación por Cd en ambientes costeros. Sin embargo, una limitación es que su distribución no es amplia en todos los ecosistemas costeros, por lo que frecuentemente se tienen que utilizar otros organismos con otras características similares (García-Hernández et al., 2013).

Los moluscos y peces mostraron ser acumuladores de Hg, lo que indica que pueden ser usados para biomonitoreo de la exposición de ese elemento. Sin embargo, es importante destacar que los moluscos son de amplio consumo por la población en general, lo que implica posibles riesgos al consumidor, considerando los valores establecidos en la norma mexicana (NOM 242 SSA1 2009). El Hg es considerado altamente tóxico, dado que en los tejidos de los organismos marinos predominan las formas químicas orgánicas, que

son las especies más móviles y disponibles para interferir en las actividades metabólicas en los diferentes tejidos y, por ende, causar efectos adversos en la salud (García-Hernández et al., 2018). En relación con este elemento, también se encontró que los moluscos y peces son acumuladores de selenio, elemento implicado como antagonista durante la detoxificación de Hg. Esto puede tener un efecto contra la posible toxicidad de las especies orgánicas de Hg, ya que se ha documentado que relaciones molares Hg: Se > 1 implican que se actúa contrarrestando los efectos tóxicos del Hg, lo que disminuye significativamente los riesgos a la salud (Ralston et al., 2016).

Los peces mostraron acumular concentraciones consideradas altas de Mn. La norma mexicana (NOM 242 SSA1 2009) no establece límites de este elemento en organismos marinos. Sin embargo, se ha demostrado que el consumo de organismos contaminados con este elemento tiene implicaciones toxicológicas, ya que es considerado un elemento neurotóxico para infantes en desarrollo, por lo que puede ser significativa la exposición en ese sector de la población por el consumo de peces. Esto es cierto también por el consumo de organismos contaminados con Hg, donde que se ha documentado un alto riesgo para la salud por parte de grupos vulnerables como los niños y las mujeres embarazadas (García-Hernández et al., 2018). La implicación en las determinaciones de los riesgos a la salud por la exposición de metal(oid)es debido al consumo de organismos es que hay una alta probabilidad de que se presenten efectos adversos para la salud a diferentes niveles; desde los leves (como alergias) hasta los graves (como el cáncer) (Ralston et al., 2016; García-Hernández et al., 2018). De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (FAO/WHO 2011), se recomienda un consumo semanal de pescado de 2-3 veces, basado en las propiedades alimenticias de este alimento (por ej. el contenido de ácidos grasos omega-3). Sin embargo, basado en estudios recientes, se adecuó la recomendación de las especies que se pueden consumir con más frecuencia, bajando el consumo de peces que son depredadores tope en la trama alimenticia porque poseen altos contenidos de contaminantes, como metal(oid)es y pesticidas (Ralston et al., 2016).

Una cuestión ampliamente discutida por varios autores (García-Hernández et al., 2018) es el hecho de que los niveles de metal(oid)es que se detectan en muchos organismos no necesariamente son indicativos del grado de exposición a estos contaminantes, debido a que la acumulación de estos

elementos depende de varios factores. Un organismo acumulador de metal(oid)es tiene tasas de eliminación bajas y esto no implica que son acumuladores de todos estos elementos por factores como la salinidad, talla, y variaciones intraespecie; hay organismos que son acumuladores de Cd, Cr, Se, y Zn, pero no de otros elementos como la plata. Es decir, en los patrones de la acumulación de estos elementos en organismos acuáticos intervienen tanto factores fisiológicos como bioquímicos, así como la geoquímica propia de dichos elementos (García-Hernández et al., 2018; Murillo-Castillo et al., 2022). Entonces, lo que se busca con los estudios de biomonitorio es encontrar un organismo que cumpla con el requisito de ser acumulador de metal(oid)es, que sea de amplia distribución y abundante en los ambientes, y que ocupe un estrato trófico que permita evaluar la acumulación, pero también la posible transferencia de esos elementos a niveles tróficos mayores (García-Hernández et al., 2018).

Por otro lado, en estudios sobre el consumo de algunas especies marinas en áreas costeras de Sonora se demostró que las concentraciones de algunos metal(oid)es (como Hg, Cr y Pb) encontradas en organismos para consumo humano son de riesgo para la salud de los consumidores (NOM 242 SSA1 2009; García-Hernández et al., 2018; Murillo-Castillo et al., 2022). Este riesgo fue mayor en sectores vulnerables de la población, como son los niños y las mujeres embarazadas (García-Hernández et al., 2018).

Conclusiones

Este es un trabajo que recopila información de publicaciones que los autores han reportado en estudios sobre ecosistemas costeros de Sonora. Las concentraciones de metal(oid)es en las diferentes matrices ambientales indican impactos adversos en los ecosistemas costeros de Sonora. Los niveles de estos elementos en los suelos (incluida la fracción fina) y sedimentos indican que hay riesgos a la salud tanto de los organismos propios de tales ecosistemas como de las personas que son expuestos a ellos por medio de diferentes vías. Los contenidos de estos contaminantes se reflejaron en los niveles encontrados en los organismos, que los acumulan en cantidades que representan riesgos ecológicos y para la salud de los consumidores; tales riesgos

son mayores en sectores vulnerables de la población, como los niños y las mujeres embarazadas. Esto es clave para proponer cambios en los patrones de consumo de especies acuáticas basados no solo en los beneficios nutricios sino también en los riesgos para la salud debido a la presencia de contaminantes, por lo que se debe buscar la seguridad alimentaria al disminuirlos. También es necesario evaluar los riesgos ocasionados por la exposición de elementos como Mn y Pb, y por la toxicidad que implica su exposición. Además, se debe evaluar la exposición a metal(oid)es por polvos en regiones rurales, en las que esta vía puede representar altos niveles de exposición y, por lo tanto, ocasionar riesgos a la salud en esos sectores de la población.

Referencias

- Bracamonte-Terán, J. A., D., Meza-Figueroa, L., García-Rico, B., Schiavo, M. M., Meza-Montenegro y A. I. Valenzuela-Quintanar. (2023). Agricultural abandoned lands as emission sources of dust containing metals and pesticides in the Sonora-Arizona Desert. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195, 1496. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-12086-9>
- Cadena-Cárdenas, I., L., Méndez-Rodríguez, T., Zenteno-Savín, J., García-Hernández, y B. Acosta-Vargas. (2009). Heavy metal levels in marine mollusks from areas with, or without, mining activities along the Gulf of California, Mexico. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 57, 96-102. <https://doi.org/10.1007/s00244-008-9236-0>
- FAO/WHO. (2011). Food and Agriculture Organization of the United Nations/World Health Organization. Fisheries and Aquaculture Report No. 978. <http://www.fao.org/docrep/014/ba0136e/ba0136e00.pdf>
- García-Hernández, J., L., Cadena-Cárdenas, M., Betancourt-Lozano, L. M., García- de la Parra, L., García-Rico, y F. Márquez-Farías. (2007). Total mercury content found in edible tissues of top predator fish from the Gulf of California, Mexico. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 89, 507-522. <https://doi.org/10.1080/02772240601165594>
- García-Hernández, J., E. P., Glenn, y K. Flessa. (2013a). Identification of chemicals of potential concern (COPECs) in anthropogenic wetlands of the Colorado River delta. *Ecological Engineering*, 59, 52-60. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.04.045>
- García-Hernández, J., L. A., Hurtado, G., Leyva-García, A., Güido-Moreno, D., Aguilera-Márquez, V., Mazzei y M. Ferrante. (2013b). Isopods of the genus *Ligia* as potential biomonitors of trace metals from the Gulf of California and the Pacific coast of the Baja California peninsula. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 112, 177-185, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.11.002>

- García-Hernández, J., M. I., Ortega-Vélez, A. D., Contreras-Paniagua, D., Aguilera-Márquez, G., Leyva-García y J. Torre. (2018). Mercury concentrations in seafood and the associated risk in women with high fish consumption from coastal villages of Sonora, Mexico. *Food and Chemical Toxicology*, 120, 367- 377. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2018.07.029>
- García-Rico L., y L. Tejeda-Valenzuela. (2020). Metal concentrations in oysters *Crassostrea gigas* cultured in the Gulf of California and risk assessment to human health. *Exposure and Health*, 12, 33-39. <https://doi.org/10.1007/s12403-018-0281-2>
- Jara-Marini M. E., J. N., Tapia-Alcaraz, J. A., Dumer-Gutiérrez, L., García-Rico, J., García-Hernández y F. Páez-Osuna. (2013). Distribution and accumulation of Cd, Cu, Hg, Pb and Zn in the surface sediments of El Tobari Lagoon, central-East Gulf of California: An ecosystem associated with agriculture and aquaculture activities. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 48, 1842-1851. <http://dx.doi.org/10.1080/10934529.2013.823341>
- MacDonald D. D., Carr R. S., Calder F. D., Long E. R., Ingersoll C. G. (1996). Development and evaluation of sediment quality guidelines for Florida coastal waters. *Ecotoxicology*, 5, 253-278.
- Molina-García A., García-Hernández J., Soto-Jiménez M. F., Páez-Osuna F., Jara-Marini M. E. (2021). Mercury and selenium biomagnification in a coastal food web from the Gulf of California influenced by agriculture and shrimp aquaculture. *Environmental Science and Pollution Research*. 28:56175-56187. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14524-y>
- Murillo-Castillo, K. D., T., Quizán-Plata, J. C., Peralta-Altamirano, M. A. G., Corella-Madueño, y M. E. Jara-Marini. (2022). Estimation of metal concentrations in marine biota and associated health risk assessment for inhabitants of a coastal region in Northwestern Mexico. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194, 466-482. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10083-y>
- NOM 242-SSA1. (2009). Norma Oficial Mexicana sobre productos de la pesca frescos, refrigerados, congelados y procesados. 120 p.
- Ochoa-Valenzuela, L. E., A., Gómez-Álvarez, L., García-Rico, y A. I. Villalba-Atondo. (2009). Distribution of heavy metals in surface sediments of the Bacochibampo Bay, Sonora, Mexico. *Chemical Speciation & Bioavailability*. 21, 211-218. <https://doi.org/10.3184/095422909X12548393083284>
- Ralston, N. V., C. R., Ralston, y L. J. Raymond. (2016). Selenium health benefit values: updated criteria for mercury risk assessments. *Biological Trace Element Research*, 171(2), 262-269. <https://doi.org/10.1007/s12011-015-0516-z>