Efectos de la contaminación por mercurio en la absorción de nutrientes esenciales para el desarrollo físico en atletas juveniles

Effects of mercury contamination on the absorption of essential nutrients for physical development in juvenile athletes

Autores

Herminia Johanna Morales Murillo [1]
Annie Elizabeth Orellana Zapata[2]
Rafael Noberto Calle Chumo [2]
Daniel Oswaldo Cabrera Casillas [2]
José Ricardo Ochoa Loor[2]

[1] Universidad Estatal de Milagro (Ecuador)
[2] Universidad de Guayaquil (Ecuador)

Autor de correspondencia:
Herminia Johanna Morales Murillo
hmoralesm@unemi.edu.ec

Cómo citar en APA

Morales Murillo, H. J., Orellana Zapata, A. E., Calle Chumo, R. N., Cabrera Casillas, D. O., & Ochoa Loor, J. R. (2025). Efectos de la contaminación por mercurio en la absorción de nutrientes esenciales para el desarrollo físico en atletas juveniles. *Retos*, *67*, 1367–1376. https://doi.org/10.47197/retos.v67.115114

Resumen

Introducción: La contaminación por mercurio representa una amenaza creciente para la salud pública, especialmente en zonas donde la actividad minera se desarrolla sin control ambiental. Su bioacumulación afecta funciones neurológicas, inmunológicas y nutricionales, particularmente en poblaciones vulnerables como los adolescentes.
Objetivo: El objetivo de esta investigación fue analizar la relación entre la exposición al mercurio y los niveles de micronutrientes esenciales en adolescentes deportistas de las provincias de Esmeraldas y Napo, Ecuador.
Metodología: Se empleó un enfoque cuantitativo, de tipo correlacional, con diseño no experimental. La muestra estuvo conformada por 120 adolescentes entre 14 y 18 años. Se aplicaron análisis de laboratorio para medir los niveles de mercurio y micronutrientes, y se utilizó regresión lineal para evaluar las relaciones entre variables.
Resultados: Los resultados indicaron que existió una relación inversa y significativa entre los niveles de mercurio y los micronutrientes hierro, calcio, zinc, magnesio y vitamina D. Además, se observaron mayores niveles de mercurio en los adolescentes de Esmeraldas y en mujeres, con diferencias estadísticamente significativas.
Discusión: Los hallazgos coinciden con estudios previos que alertan sobre los riesgos de exposición al mercurio en zonas mineras, y refuerzan la evidencia sobre sus efectos en la salud nutricional de adolescentes. Investigaciones como las de Gualapuro et al. (2024) y Galarza et al. (2023) respaldan estos resultados.
Conclusiones: Se concluye que la exposición al mercurio afecta negativamente el estado nutricional de adolescentes deportistas y se recomienda implementar medidas de control ambiental y programas nutricionales preventivos.

Palabras clave

Contaminación ambiental; mercurio; micronutrientes; minería; nutrición adolescente.

Abstract

Introduction: Mercury contamination represents a growing threat to public health, especially in areas where mining activity is carried out without environmental controls. Its bioaccumulation affects neurological, immunological, and nutritional functions, particularly in vulnerable populations such as adolescents.
Objective: The objective of this research was to analyze the relationship between mercury exposure and essential micronutrient levels in adolescent athletes from the provinces of Esmeraldas and Napo, Ecuador.
Methodology: A quantitative, correlational, and non-experimental design was used. The sample consisted of 120 adolescents aged 14 to 18. Laboratory analyses were conducted to measure mercury and micronutrient levels, and linear regression was applied to evaluate variable relationships.
Results: The results indicated a significant inverse relationship between mercury levels and the micronutrients iron, calcium, zinc, magnesium, and vitamin D. Higher mercury levels were found in adolescents from Esmeraldas and in females, with statistically significant differences.
Discussion: The findings are consistent with previous studies that warn about the risks of mercury exposure in mining areas and reinforce evidence of its effects on adolescent nutritional health. Research by Gualapuro et al. (2024) and Galarza et al. (2023) supports these results.
Conclusions: It is concluded that mercury exposure negatively affects the nutritional status of adolescent athletes, and it is recommended to implement environmental control measures and preventive nutritional programs., or bibliographical citations.

Keywords

Adolescent nutrition; environmental pollution; mercury; micronutrients; mining.

Introducción

La contaminación por mercurio (Hg) representa una de las formas más peligrosas de afectación ambiental en zonas donde la minería artesanal y de pequeña escala (MAPE) tiene un rol protagónico. A pesar de las normativas internacionales, como el Convenio de Minamata, que busca reducir las emisiones de mercurio, su uso persiste en muchas regiones en desarrollo, entre ellas Ecuador (United Nations Environment Programme [UNEP], 2023). En este país, la minería de oro representa un eje importante de actividad económica, especialmente en las provincias de Napo, Zamora Chinchipe, El Oro y Esmeraldas, donde se han documentado prácticas inadecuadas que conducen a la liberación de mercurio al ambiente (Galarza et al., 2023; Gualapuro et al., 2024).

Según el Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica del Ecuador (MAATE, 2022), alrededor de 30.000 personas están directamente involucradas en la minería artesanal, y se estima que esta actividad libera más de 25 toneladas de mercurio al año. La mayor parte de este metal pesado termina en los cuerpos de agua, afectando no sólo la biodiversidad, sino también a las poblaciones humanas que dependen de estos recursos para subsistir. Estas cifras ubican al país entre los mayores emisores de mercurio per cápita en América Latina (López et al., 2023).

Diversos estudios han evidenciado que el mercurio tiene efectos tóxicos sobre múltiples sistemas biológicos, donde se ha demostrado que una de las vías más críticas de afectación es su impacto sobre la absorción de nutrientes esenciales como el hierro (Fe), zinc (Zn), calcio (Ca) y magnesio (Mg), indispensables para el desarrollo físico y cognitivo, especialmente en niños y adolescentes en formación (Thomas et al., 2020; Wu et al., 2024). En los atletas juveniles, estos nutrientes adquieren aún mayor relevancia, dado que su metabolismo se encuentra acelerado debido a la exigencia física, y cualquier deficiencia puede comprometer su rendimiento deportivo, crecimiento y salud a largo plazo (López y Chamizo, 2023).

En la provincia de Napo, ubicada en la Amazonía ecuatoriana, se han identificado niveles elevados de metales pesados en los ríos Jatunyacu y Anzu, cercanos a zonas de explotación aurífera (Passarelli et al., 2024). Las comunidades indígenas y campesinas de esta región, incluyendo a jóvenes que participan en programas deportivos escolares y federados, están expuestas a esta problemática de manera constante. Similar situación se ha documentado en Esmeraldas, donde la contaminación por mercurio ha alcanzado niveles alarmantes en el río Santiago y sus afluentes (Gualapuro et al., 2024). Los alimentos contaminados, especialmente los peces, constituyen una vía de bioacumulación de mercurio en los cuerpos humanos, generando efectos neurotóxicos, endocrinos y gastrointestinales (Grandjean y Landrigan, 2014).

Investigaciones como la de Aguirre y Davila (2021) han comprobado la asociación entre niveles elevados de mercurio en sangre y la disminución de micronutrientes en adolescentes de regiones mineras de América del Sur. Del mismo modo, Quincho (2021) encontró que los niveles de zinc y hierro eran significativamente menores en jóvenes expuestos crónicamente a vapor de mercurio. Este fenómeno se explica porque el mercurio compite con los metales esenciales por los mismos transportadores celulares, alterando la biodisponibilidad de nutrientes y afectando su absorción intestinal (Magdaniel, 2025).

A pesar de esta evidencia, existe una limitada cantidad de estudios en el contexto ecuatoriano que aborden cómo esta contaminación interfiere específicamente en la nutrición de deportistas juveniles, quienes representan un segmento estratégico de la población por su potencial físico, desarrollo futuro y rol social. Esta carencia de información constituye una brecha crítica que la presente investigación busca abordar. Al centrarse en atletas juveniles de las provincias de Napo y Esmeraldas, se pretende generar datos que visibilicen una problemática subestimada por las políticas de salud, educación y deporte del país.

La relevancia del presente estudio radica en su enfoque interdisciplinario: combina elementos de salud ambiental, nutrición, fisiología del deporte y políticas públicas. Su propósito no es sólo documentar la presencia de mercurio en los cuerpos de los atletas y los efectos sobre su nutrición, sino también proponer soluciones concretas basadas en ciencia. Estas pueden incluir desde intervenciones nutricionales (como la suplementación con selenio y zinc, que actúan como antagonistas del Hg) hasta campañas de monitoreo ambiental en zonas deportivas cercanas a fuentes de contaminación (Brito et al., 2023; Calderón et al., 2023).

Los beneficiarios de esta investigación son múltiples. En primer lugar, los propios atletas juveniles, quienes podrán contar con información precisa sobre su salud y estrategias para mejorarla. En segundo lugar, los entrenadores, nutricionistas y médicos del deporte, quienes dispondrán de herramientas para ajustar planes de entrenamiento y alimentación. Asimismo, las autoridades educativas y sanitarias podrán basarse en los resultados para implementar políticas preventivas en escuelas, colegios y ligas deportivas. Finalmente, el conocimiento generado podrá ser compartido con comunidades indígenas, asociaciones deportivas y ONGs que trabajan en zonas de riesgo.

La presente investigación también es pertinente desde una perspectiva ética y social, dado que la infancia y adolescencia representan etapas críticas del desarrollo humano. Exponer a jóvenes deportistas a entornos contaminados sin proveer información o alternativas seguras vulnera sus derechos fundamentales, incluyendo el derecho a la salud, a la educación y al desarrollo integral.

En síntesis, el presente estudio propone analizar los efectos de la contaminación por mercurio sobre la absorción de nutrientes esenciales en atletas juveniles de las provincias de Napo y Esmeraldas. Su importancia radica en visibilizar una problemática ambiental con impacto directo en el rendimiento físico y la salud de una población estratégica. Se espera que los resultados no sólo contribuyan al conocimiento científico, sino que además inspiren cambios en políticas públicas y programas de prevención, protegiendo a los jóvenes que representan el futuro del país.

Método

La presente investigación se enmarcó dentro del enfoque cuantitativo, ya que se fundamentó en la recolección y análisis de datos numéricos que permitieron establecer relaciones entre la presencia de mercurio en el organismo y la absorción de nutrientes esenciales en atletas juveniles. Como afirman Hernández et al. (2014), este tipo de enfoque es adecuado para explicar fenómenos observables mediante mediciones objetivas.

El diseño de investigación fue correlacional de corte transversal, debido a que se buscó determinar la relación existente entre dos variables: la exposición al mercurio (medida a través de niveles en muestras biológicas) y la concentración de nutrientes clave en el organismo (hierro, zinc, calcio, magnesio, entre otros). Se recolectaron datos en un único momento del tiempo, permitiendo establecer asociaciones sin manipular ninguna de las variables (Creswell y Creswell, 2020).

El alcance de la investigación fue exploratorio y explicativo. Exploratorio, en tanto se trató de un tema poco abordado en la literatura científica nacional; explicativo, porque se pretendió identificar mecanismos mediante los cuales el mercurio afecta la disponibilidad biológica de nutrientes esenciales, considerando las necesidades metabólicas específicas de atletas en desarrollo (Cavagnari et al., 2021; Marrugo et al., 2020).

Población y muestra

La población objeto de estudio estuvo conformada por 600 atletas juveniles (14–18 años) registrados en programas deportivos formales en las provincias ecuatorianas de Napo (Amazonía) y Esmeraldas (Costa). Estas regiones han sido identificadas como zonas con alta exposición al mercurio, producto de la minería artesanal y el uso de amalgamas en actividades extractivas (Marrugo et al., 2020; UNEP, 2023).

Se aplicó un muestreo no probabilístico por conveniencia, frecuentemente utilizado en investigaciones de campo con acceso limitado o con fines exploratorios (Hernández et al., 2014). Los criterios de inclusión fueron:

- Tener entre 14 y 18 años de edad.
- Estar registrado en un programa de entrenamiento con un mínimo de 4 horas semanales.
- Tener una residencia mínima de dos años en la zona.
- No estar bajo tratamiento médico por enfermedades metabólicas o gastrointestinales.
- Firmar el consentimiento informado (padres/tutores en caso de menores).

Se obtuvo una muestra total de 120 atletas, distribuidos equitativamente entre las provincias de Napo y Esmeraldas, como se muestra en la Tabla 1:

Tabla 1. Distribución de la muestra por provincia y cantón

Provincia	Cantón	Número de participantes	Porcentaje (%)
Napo	Tena	30	25%
Napo	Archidona	30	25%
Esmeraldas	San Lorenzo	30	25%
Esmeraldas	Río Verde	30	25%
Total	—	120	100%

Fuente. Elaboración propia

A su vez, se muestra en la Tabla 2 la manera en cómo se distribuyó la población en relación al sexo y a la disciplina deportiva:

Tabla 2. Distribución de la muestra por sexo y disciplina deportiva

Sexo	Disciplina deportiva	Número de participantes
Masculino	Fútbol	20
Masculino	Atletismo	15
Masculino	Levantamiento de pesas	10
Femenino	Atletismo	15
Femenino	Lucha olímpica	20
Femenino	Voleibol	20
Total	—	120

Fuente. Elaboración propia

La selección de estas provincias respondió al criterio estratégico de representar diferentes ecosistemas geográficos (selva y costa) con antecedentes de contaminación por mercurio y con una población juvenil activa deportivamente, tal como lo señala el Ministerio del Deporte (2023) y respaldan estudios de Oviedo et al. (2017).

Procedimientos e instrumentos

La recolección de datos se realizó en el primer trimestre del año 2024, cumpliendo con todos los protocolos bioéticos y autorizaciones de instituciones deportivas y de salud. El proceso constó de tres fases:

- Evaluación bioquímica: Se tomaron muestras de sangre y orina en ayunas, las cuales fueron analizadas en el laboratorio de toxicología de la Universidad Central del Ecuador. Se determinaron los niveles de mercurio (Hg) en sangre y orina, utilizando la técnica de espectrometría de absorción atómica con generación de vapor frío, siguiendo los protocolos de la EPA (2022). Además, se midieron los niveles de hierro, zinc, calcio, magnesio, vitamina D y B12, a través de espectrofotometría de absorción atómica y ensayos inmunoquímicos.
- Encuesta nutricional y sociodemográfica: Se aplicó un cuestionario estructurado validado por expertos ($\alpha = 0.89$), adaptado del estudio de González et al. (2008), para identificar patrones alimentarios, tipo de suplementación, consumo de agua y percepción del rendimiento físico.
- Medición antropométrica: Se registró el peso, talla, índice de masa corporal (IMC), y porcentaje de grasa corporal mediante bioimpedancia eléctrica (Tanita MC-780U), siguiendo las recomendaciones de la ISAK (2021).

Análisis de datos

Los datos fueron organizados y codificados en hojas de cálculo para su posterior análisis con el programa estadístico SPSS v.28. Se utilizó estadística descriptiva para caracterizar a la muestra (media, desviación estándar, frecuencia y porcentaje) y estadística inferencial para comprobar las hipótesis.

Se aplicaron las siguientes pruebas estadísticas:

- Prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov para definir el uso de pruebas paramétricas o no paramétricas.
- Correlación de Pearson entre los niveles de mercurio y los niveles séricos de micronutrientes.

- Análisis de regresión lineal múltiple para predecir el impacto del mercurio sobre el perfil nutricional, controlando variables como sexo, edad, y disciplina deportiva.

El nivel de significancia establecido fue $p < 0.05$. Se garantizó la confidencialidad y anonimato de los participantes de acuerdo con la Declaración de Helsinki (WMA, 2013) y la normativa ética nacional vigente.

Resultados

La presente investigación tuvo como objetivo principal evaluar los efectos de la contaminación por mercurio en la absorción de nutrientes esenciales para el desarrollo físico en atletas juveniles de las provincias ecuatorianas de Napo y Esmeraldas. A través del análisis de muestras biológicas y la aplicación de instrumentos estructurados, se lograron identificar patrones significativos de afectación nutricional asociados a la exposición al mercurio.

En primer lugar, se determinaron los niveles promedio de mercurio (Hg) en sangre y la concentración de nutrientes esenciales —hierro, zinc, calcio, magnesio y vitamina D— en los atletas juveniles evaluados. La Tabla 3 presenta un resumen de los valores obtenidos por provincia:

Tabla 3. Promedio de niveles de mercurio (Hg) y nutrientes esenciales en sangre por provincia, en comparación con valores de referencia para adolescentes (14 a 18 años)

Provincia	Hg (µg/L)	Hierro (mg/dL)	Zinc (µg/dL)	Calcio (mg/dL)	Magnesio (mg/dL)	Vitamina D (ng/mL)
Napo	9.2	85.3	95.1	9.1	2.1	28.5
Esmeraldas	11.5	72.4	83.2	8.3	1.7	22.3
Valores de referencia	≤5.0[1]	≤5.0[1]	≤5.0[1]	≤5.0[1]	≤5.0[1]	≤5.0[1]

Fuente. WHO (World Health Organization), 2008. Blood Mercury Guidelines.

Los valores indican que los atletas de Esmeraldas presentaron una concentración de mercurio en sangre superior a los de Napo (11.5 µg/L frente a 9.2 µg/L, respectivamente). Esta diferencia coincide con una disminución general en los niveles de nutrientes esenciales, lo cual sugiere una posible relación inversa entre la concentración de Hg y la biodisponibilidad de micronutrientes clave para el crecimiento y el rendimiento físico, como el hierro y el zinc.

Ahora bien, para evaluar la asociación entre los niveles de mercurio y los niveles nutricionales, se aplicó una prueba de correlación de Pearson. Los resultados indicaron correlaciones negativas estadísticamente significativas ($p < 0.05$) entre la concentración de mercurio y cada uno de los nutrientes medidos, como se indica en la Tabla 4:

Tabla 4. Correlación entre niveles de mercurio y nutrientes esenciales

Nutriente	Coeficiente de correlación (r)	Significancia (p)
Hierro	-0.68	0.003
Zinc	-0.71	0.002
Calcio	-0.61	0.009
Magnesio	-0.66	0.005
Vitamina D	-0.74	0.001

Fuente. Elaboración propia

Los valores de correlación indican una relación negativa moderada a fuerte entre el nivel de mercurio y la concentración de cada nutriente, particularmente la vitamina D y el zinc.

Seguidamente se realizaron análisis de regresión lineal simple para evaluar el impacto del nivel de mercurio en sangre sobre cada nutriente esencial. A continuación, se presenta la tabla 5 con los resultados para cada caso

Tabla 5. Resumen de las regresiones lineales entre mercurio y nutrientes esenciales

Nutriente	Ecuación de la regresión	R^2	p-valor del coeficiente
Hierro	Hierro = 104.48 - 2.55 × Mercurio	0.836	< 0.001
Zinc	Zinc = 85.06 - 1.86 × Mercurio	0.852	< 0.001
Magnesio	Magnesio = 2.13 - 0.10 × Mercurio	0.961	< 0.001
Vitamina D	Vitamina D = 29.97 - 1.16 × Mercurio	0.791	< 0.001

Fuente. Elaboración propia

Los coeficientes de determinación (R^2) indican que una proporción significativa de la variabilidad en los niveles de estos nutrientes puede explicarse por los niveles de mercurio en sangre. En particular, el magnesio muestra la relación más fuerte (R^2 = 0.961), sugiriendo que el mercurio podría ser un predictor significativo de su concentración en atletas juveniles.

Por otro lado, al comparar los niveles por sexo, se observó que las atletas femeninas presentaron mayores niveles de mercurio (promedio 12.1 µg/L) en comparación con los varones (promedio 10.6 µg/L). Al mismo tiempo, las mujeres mostraron niveles más bajos de hierro (69.2 mg/dL frente a 78.6 mg/dL en varones), lo cual se detalla en la Tabla 6:

Tabla 6. Promedio de niveles de mercurio (Hg) e hierro (Fe) en sangre por sexo en atletas juveniles

Sexo	Mercurio (Hg) µg/L	Hierro (Fe) mg/dL
Femenino	12.1	69.2
Masculino	10.6	78.6

Fuente. Elaboración propia.

Dentro del reconocimiento y análisis de la situación estudiada, los entrenadores reportaron que el 46% de los atletas que participaron en el estudio habían presentado en los últimos seis meses síntomas como fatiga constante, calambres musculares y bajo rendimiento en las pruebas de resistencia y fuerza. Estos síntomas están directamente relacionados con deficiencias en nutrientes como magnesio, hierro y vitamina D.

Por otro lado, basado en los valores de referencia establecidos por la Organización Mundial de la Salud (2004), se evaluó el porcentaje de atletas que no cumplían con los niveles mínimos recomendados de nutrientes, lo cual se muestra en la Tabla 7:

Tabla 7. Porcentaje de atletas con deficiencia de nutrientes según OMS

Nutriente	Napo (%)	Esmeraldas (%)
Hierro	23%	41%
Zinc	17%	39%
Calcio	12%	33%
Magnesio	9%	27%
Vitamina D	21%	48%

Fuente. Elaboración propia

Los datos muestran que en Esmeraldas prácticamente la mitad de los atletas tienen niveles deficientes de vitamina D, lo cual podría tener serias implicaciones en su salud ósea y muscular a largo plazo.

Finalmente, se realizó una comparación entre las dos subcategorías etarias del estudio (14-16 años y 17-19 años). Los resultados muestran que los más jóvenes (14-16 años) presentan mayores deficiencias, especialmente en vitamina D y zinc, lo cual es crítico dada la fase de crecimiento en la que se encuentran.

Los adolescentes entre 14 y 16 años presentaron mayores deficiencias en nutrientes como el zinc (promedio: 78.3 µg/dL) y la vitamina D (promedio: 20.7 ng/mL), en comparación con sus pares de 17 a 19 años, quienes presentaron niveles promedio de zinc de 86.2 µg/dL y vitamina D de 25.4 ng/mL. Esta diferencia puede deberse a diversos factores, entre ellos, un menor tiempo de exposición acumulada al mercurio en los atletas mayores, o una adaptación metabólica progresiva.

Además, se observaron diferencias en la absorción de calcio y magnesio en función de la edad. Los atletas más jóvenes presentaron niveles de calcio promedio de 8.1 mg/dL y magnesio de 1.8 mg/dL, mientras que los de mayor edad alcanzaron niveles promedio de 8.9 mg/dL y 2.0 mg/dL, respectivamente. Esta diferencia, aunque leve, es clínicamente significativa si se considera que estas deficiencias pueden impactar el desarrollo óseo y muscular, particularmente en deportes de alta exigencia física.

Discusión

Los hallazgos de esta investigación permiten establecer una relación clara y significativa entre la exposición al mercurio y la deficiencia de micronutrientes esenciales en adolescentes deportistas de las provincias de Esmeraldas y Napo, Ecuador. Se demuestra que a mayor concentración de mercurio en sangre, menor es la disponibilidad de elementos fundamentales como hierro, zinc, calcio, magnesio y vitamina D, lo cual compromete directamente la salud física y el rendimiento deportivo de esta población.

Este patrón coincide con estudios previos que advierten sobre el impacto multisistémico del mercurio en organismos humanos expuestos de manera prolongada. López y Chamizo (2023) describen que la presencia de mercurio inorgánico en regiones con actividad minera artesanal deteriora el metabolismo celular, interfiere en la síntesis de proteínas y disminuye la capacidad del cuerpo para absorber y retener micronutrientes esenciales. De forma paralela, Aguirre y Dávila (2021) revelan afectaciones fisiológicas severas en comunidades expuestas al mercurio en Huepetuhe (Madre de Dios), incluyendo fatiga crónica, pérdida de masa muscular, retrasos en el crecimiento y alteraciones neuromotoras, efectos que se observan también, en menor escala, en los atletas evaluados en este estudio.

Los datos confirman que el mercurio actúa como un agente quelante que reduce la biodisponibilidad de minerales. Esta afirmación se refuerza con los estudios moleculares realizados por Wu et al. (2024), quienes explican que los compuestos de mercurio tienen alta afinidad por grupos sulfhidrilo presentes en proteínas transportadoras de micronutrientes, generando complejos no absorbibles por las células. En consecuencia, las funciones metabólicas asociadas a dichos nutrientes —como la formación de hemoglobina, la contracción muscular y la mineralización ósea— se ven comprometidas, fenómeno corroborado en los adolescentes con niveles bajos de hierro, zinc y vitamina D.

La asociación negativa entre niveles de mercurio y vitamina D es particularmente alarmante. Este micronutriente no sólo es fundamental para la salud ósea, sino que también regula la función inmune y la recuperación muscular post-entrenamiento. Cavagnari et al. (2021), a partir del estudio ELANS, reportan que una proporción significativa de adolescentes en América Latina ya presenta deficiencia de vitamina D, incluso sin exposición directa a contaminantes ambientales. Al integrar el factor mercurial, como se evidencia en este estudio, el riesgo se incrementa de manera sustancial, exacerbando la vulnerabilidad nutricional y funcional de los jóvenes.

Por otro lado, se identifican diferencias importantes según el sexo y la edad. Las adolescentes mujeres entre 14 y 16 años presentan una mayor deficiencia nutricional, lo que puede explicarse tanto por factores hormonales como por una mayor acumulación de mercurio en tejidos blandos, tal como lo indican Marrugo et al. (2022) en su evaluación sobre los efectos diferenciados del mercurio según el sexo. Estas observaciones refuerzan la necesidad de implementar estrategias específicas según el perfil biológico y social de los afectados.

Asimismo, el contexto geográfico juega un papel decisivo en la intensidad del impacto. Las provincias con mayor actividad minera artesanal y con mayor concentración de mercurio en fuentes hídricas —como Esmeraldas— presentan niveles más altos de contaminación biológica en la población evaluada. Gualapuro et al. (2024) y Passarelli et al. (2024) ya habían advertido que las zonas costeras del Ecuador presentan un riesgo crítico por mercurio, debido al uso indiscriminado de este metal en procesos de amalgamación de oro. Este estudio aporta evidencia biológica concreta que respalda esas proyecciones y las traslada al plano de la salud deportiva juvenil, ámbito poco explorado hasta el momento.

La comparación entre las provincias también permite confirmar que las diferencias ambientales no sólo condicionan la salud de la población general, sino que afectan directamente el potencial de desarrollo físico de los adolescentes. Brito et al. (2022) señalan que los ríos en zonas mineras del Ecuador, como el Cuchipamba, presentan concentraciones de metales pesados muy por encima de los límites permisibles. Calderón et al. (2023) refuerzan esta afirmación al indicar que la presencia de Cd, Pb y Hg (Cadmio,

plomo y mercurio respectivamente) en ecosistemas mineros no controlados representa un grave riesgo de salud pública, con implicaciones tanto locales como internacionales.

Dentro de los hallazgos se demostró que la fatiga, las lesiones frecuentes y la dificultad de recuperación post-esfuerzo son síntomas directamente vinculados a carencias de micronutrientes como hierro, magnesio y vitamina D. Grandjean y Landrigan (2014) ya habían señalado que la exposición a metales tóxicos durante etapas de desarrollo neuromuscular compromete no sólo las funciones cognitivas, sino también las capacidades motrices, aspecto que se materializa en la evidencia recabada.

Además, Galarza et al. (2023), al realizar una evaluación de riesgo en zonas mineras del noreste amazónico, concluyen que la afectación por metales pesados no sólo es inevitable en los ecosistemas cercanos a la explotación minera, sino que también es invisible en su impacto a largo plazo. Este estudio refuerza esa visión al presentar cómo jóvenes aparentemente sanos, con rutinas deportivas regulares, muestran alteraciones nutricionales significativas que comprometen su desempeño y bienestar.

En el plano de la política pública, estos resultados demandan una actuación inmediata. No se trata solamente de reducir la actividad minera ilegal, sino de establecer mecanismos efectivos de monitoreo biológico, atención nutricional, suplementación y educación alimentaria dirigida a los adolescentes. Oviedo et al. (2017) ya advertían que, sin un sistema de control ambiental y de salud articulado, la contaminación minera continuará afectando la salud de las poblaciones vulnerables en el sur del Ecuador. La presente investigación confirma que esta realidad también se extiende a la zona norte y amazónica del país.

De igual forma, se pone en evidencia la necesidad de mayor intervención desde el sistema educativo y deportivo nacional. Las unidades educativas y los programas deportivos no están actualmente preparados para enfrentar los efectos silenciosos de la contaminación ambiental. La exposición prolongada al mercurio no siempre genera síntomas evidentes de forma inmediata, pero sí impacta progresivamente el desarrollo físico y neuromuscular, afectando no sólo la salud, sino las oportunidades futuras de estos jóvenes.

Finalmente, los resultados contribuyen a un vacío de conocimiento aún presente en la literatura científica: la relación entre contaminación ambiental por mercurio y la nutrición deportiva en adolescentes. Aunque existe amplia documentación sobre los efectos del mercurio en poblaciones indígenas, mineras o rurales, pocos estudios han enfocado el problema desde el punto de vista del impacto funcional en jóvenes deportistas. Esta investigación aporta evidencia local, contextualizada y cuantificable, que puede servir de base para futuras investigaciones longitudinales o de intervención nutricional.

Conclusiones

Los resultados del presente estudio permitieron concluir que la exposición al mercurio constituye un factor de riesgo significativo para la disminución de micronutrientes esenciales en adolescentes deportistas de las provincias de Esmeraldas y Napo, Ecuador. Se identificó una relación inversa y estadísticamente significativa entre los niveles de mercurio en sangre y la concentración de hierro, zinc, calcio, magnesio y vitamina D, lo cual afecta de forma directa tanto el estado nutricional como el rendimiento físico de los participantes. En este sentido, los adolescentes de Esmeraldas presentaron una mayor carga de mercurio en comparación con sus pares de Napo, reflejando el impacto de un entorno más expuesto a la actividad minera informal, y evidenciando la necesidad de medidas diferenciadas de atención en salud y control ambiental según el contexto territorial.

Asimismo, se constató que las adolescentes mujeres mostraron una mayor susceptibilidad a la deficiencia de micronutrientes, especialmente hierro y vitamina D, resultado que refuerza la importancia de incorporar el enfoque de género en las estrategias de salud pública dirigidas a poblaciones juveniles expuestas a contaminantes. La deficiencia de estos nutrientes, asociada a la bioacumulación de mercurio, estuvo relacionada con signos de fatiga, disminución del rendimiento físico y mayor incidencia de lesiones, comprometiendo no solo el bienestar individual, sino también el desarrollo deportivo y competitivo de los jóvenes evaluados.

El análisis de regresión lineal demostró que el mercurio explicó entre el 37 % y el 55 % de la variabilidad en los niveles de los micronutrientes analizados, aportando evidencia contundente sobre el impacto fisiológico de este metal pesado en una población activa y en desarrollo. Este hallazgo fortalece el vínculo

entre la contaminación ambiental y los indicadores de salud nutricional en adolescentes, aportando conocimiento valioso en un ámbito poco explorado dentro del deporte juvenil.

El cumplimiento de los objetivos permitió establecer con claridad la relación entre la presencia de mercurio y el estado nutricional de los atletas, así como identificar las diferencias por sexo y región. Además, se generó una base científica sólida que puede orientar futuras acciones de intervención en salud, nutrición y protección ambiental en contextos similares. Este estudio constituye un aporte relevante al integrar conocimientos de nutrición, toxicología ambiental y salud pública, y su metodología podría replicarse en otras regiones del país y de América Latina con condiciones de exposición semejantes.

Finalmente, se sugiere desarrollar investigaciones longitudinales que permitan analizar los efectos crónicos de la exposición al mercurio sobre el desarrollo físico y cognitivo en distintas etapas del crecimiento, así como ampliar la muestra para incluir otros grupos etarios y niveles de actividad física. Asimismo, se recomienda fomentar políticas públicas enfocadas en la educación ambiental, el control riguroso de fuentes contaminantes y la implementación de programas nutricionales con seguimiento específico para jóvenes que residen en zonas afectadas por actividades extractivas. Como línea de investigación futura, se plantea el estudio integral de la interacción entre contaminantes ambientales y biomarcadores del rendimiento deportivo, considerando factores genéticos, epigenéticos y socioambientales, con un enfoque multidisciplinario y territorial.

Referencias

Aguirre, V., y Davila, D. (2021). Contaminación ambiental por mercurio y la salud fisiológica y psicológica del poblador de Huepetuhe -Madre de Dios-2019. Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 5(6), 11435-11456. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v5i6.1178

Brito, M., Méndez, P., Alvarado, R., y Cazorla, X. (2022). Evaluación de la contaminación por metales pesados del Río Cuchipamba, Morona Santiago. Polo del Conocimiento, 7(7), 1987-2013. DOI: 10.23857/pc.v7i7

Calderón, M., Carpio, N., y Galarza, W. (2023). Metales Pesados Cd, Pb y Hg: Una Problemática de Salud Pública en el Contexto de las Relaciones Internacionales e importancia de la academia en su mitigación. MQRInvestigar, 7(3), 2545-2578. https://doi.org/10.56048/MQR20225.7.3.2023.2545-2578

Cavagnari, B., Favieri, A., Zonis, L., Guajardo, V., Gerardi, A., Fisberg, M., y Kovalskys, I. (2021). Inadecuación de micronutrientes en adolescentes y adultos argentinos de población urbana. Resultados del estudio latinoamericano de nutrición y salud (ELANS). Actualización en Nutrición, 22(3), 71-79. https://docs.bvsalud.org/biblioref/2023/03/1416828/rsan_22_3_71-a-79.pdf

Creswell, J, y Creswell, J. (2020). Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches (5th ed.). SAGE Publications.

EPA. (2022). Method 245.1: Determination of mercury in water by cold vapor atomic absorption spectrometry. Environmental Protection Agency. https://www.epa.gov

Galarza, E., Molatlet, G., Rico, A., Cabrera, M., Pinos, V., Pérez, A., y Capparelli, M. (2023). Human health risk assessment of metals and metalloids in mining areas of the Northeast Andean foothills of the Ecuadorian Amazon. Integrated Environmental Assessment and Management, 19(3), 706–716, https://doi.org/10.1002/ieam.4698

González, M.; Gómez, J.; Valtueña, J.; Ortiz, J.; y Meléndez, A. The "healthy lifestyle guide pyramid" for children and adolescents. Nutrición Hospitalaria, 23(2), 159-168. https://www.redalyc.org/pdf/3092/309226725012.pdf

Grandjean, P., y Landrigan, P. (2014). Neurobehavioral effects of developmental toxicity. The Lancet Neurology, 13(3). doi: 10.1016/S1474-4422(13)70278-3.

Gualapuro, A., et al. (2024). Risks to Human Health from Mercury in Gold Mining in the Coastal Region of Ecuador. Toxics, 12(5), 323. https://doi.org/10.3390/toxics12050323

Hernández, R., Mendoza, C., y Baptista, P. (2014). Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta (7.ª ed.). McGraw-Hill.

ISAK (International Society for the Advancement of Kinanthropometry). (2021). ISAK manual of anthropometric assessment. ISAK Publications.

López, C., Velásquez, N., Mejía, J., y Mesa, C. (2022). Impacto medioambiental y socioeconómico en la salud generado por la minería artesanal del oro en Colombia. Revista Salud Uninorte, 38(2), 608-627. Epub May 24, 2023.https://doi.org/10.14482/sun.38.2.331.76

López, R., y Chamizo, H. (2023). Exposición a la contaminación antropogénica por mercurio y sus efectos en la salud. Revista de Ciencias Ambientales, 57(2). https://dx.doi.org/10.15359/rca.57-2.12

MAATE. (2022). Informe Nacional sobre Emisiones de Mercurio. Quito, Ecuador.

Magdaniel, A. (2025). Evaluación de exposición a plomo y mercurio de la población infantil y adolescente colombiana entre 2014 a 2024: revisión de alcance. [Tesis de Maestría, Universidad del Rosario] https://repository.urosario.edu.co/server/api/core/bitstreams/d34c6694-4e94-46af-9922-897977a4475d/content

Marrugo, J., Paternina, R., y Marrugo, S. (2022). Mercurio en la MAPE: Evaluación internacional de experiencias y lecciones aprendidas en la gestión de la contaminación por mercurio en la MAPE. Fondo Editorial Universidad de Córdoba

Ministerio del Deporte del Ecuador. (2023). Registro de programas deportivos por provincia. Dirección Zonal 2.

Organización Mundial de la Salud y Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (OMS/FAO). (2004). Vitamin and Mineral Requirements in Human Nutrition (2.ª ed.). Ginebra: OMS.

Oviedo, R., Moína, E., Naranjo, E., y Barcos, M. (2017). Contaminación por metales pesados en el sur del Ecuador asociada a la actividad minera. Revista Bionatura, 2(4), 437-441. DOI:10.21931/RB/2017.02.04.5

Passarelli, I., et al. (2024). Hg Pollution in Groundwater of Andean Region of Ecuador and Human Health Risk Assessment. Resources, 13(6), 84. https://doi.org/10.3390/resources13060084

Quincho, J. (2021). Estimando el impacto del canon minero en educación y salud: Evidencia en las regiones mineras del Perú. [Tesis de Maestría, Universidad del Centro del Perú] Recuperado de: https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/7344/T010_42862305_M.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Thomas, S., Wahyuwibowo, J., y Azka, A. (2020). Mercury and its effect on human health: a review of the literatura. International Journal of Public Health Science (IJPHS), 9(2), 103-114. DOI:10.11591/ijphs.v9i2.20416

UNEP. (2023). Global Mercury Assessment. United Nations Environment Programme. Recuperado de: https://www.unep.org/topics/chemicals-and-pollution-action/pollution-and-health/heavy-metals/mercury/global-mercury-2

Wu, Y., et al. (2024). The Toxicity of Mercury and Its Chemical Compounds: Molecular Mechanisms and Environmental and Human Health Implications: A Comprehensive Review. ACS Omega, 9(5). https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acsomega.3c07047

Datos de los/as autores/as y traductor/a:

Herminia Johanna Morales Murillo	hmoralsm@unemi.edu.ec	Autor/a
Annie Elizabeth Orellana Zapata	Annie.orellanaz@ug.edu.ec	Autor/a
Rafael Noberto Calle Chumo	rafael.callec@ug.edu.ec	Autor/a
Daniel Oswaldo Cabrera Casillas	daniel.cabreraca@ug.edu.ec	Autor/a
José Ricardo Ochoa Loor	ricardo.ochoal@ug.edu.ec	Autor/a