



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

FoodUPV
INSTITUTO DE INGENIERIA DE ALIMENTOS

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Instituto Universitario de Ingeniería de Alimentos
(FoodUPV)

Comparación del riesgo debido a la presencia de arsénico
y plomo en café peruano

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Gestión de la Seguridad y Calidad
Alimentaria

AUTOR/A: Tafur Becerra, Rosa Paola

Tutor/a: Doménech Antich, Eva María

Director/a Experimental: Guadalupe Chuqui, Grobert Amado

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

COMPARACIÓN DEL RIESGO DEBIDO A LA PRESENCIA DE ARSÉNICO Y PLOMO EN CAFÉ PERUANO

Rosa Paola Tafur Becerra¹, Eva María Doménech Antich¹, Grobert Amado Guadalupe Chuqui¹

RESUMEN

Perú es uno de los principales exportadores de café en el mundo. Su consumo se relaciona con efectos positivos para la salud como su aporte en nutrientes, antioxidantes y cafeína, disminución de la mortalidad, diabetes mellitus, demencia, enfermedad de Parkinson, enfermedades cardiovasculares y muchos tipos de cáncer. Sin embargo, la presencia de metales pesados puede poner en peligro la seguridad de los consumidores. El objetivo principal de este estudio fue caracterizar probabilísticamente el riesgo para el consumidor por la presencia de iAs y Pb en el grano verde de café producido en Perú. Con este fin, se analizaron 135 muestras de grano verde de café por triplicado, adquiridas en fincas productoras de café en las regiones Amazonas ($n = 42$) y San Martín ($n = 93$), durante las campañas de cosecha 2021 ($n = 99$) y 2024 ($n = 36$). La concentración de Pb y As se determinó mediante análisis de Espectroscopia de Emisión Atómica de plasma de microondas (MP-AES). Los resultados por región y año mostraron diferencias significativas, San Martín presentó niveles superiores de iAs que el Pb. Tras simular la concentración en la taza de café, con modelos predictivos de otros autores, se caracterizó el riesgo. El riesgo de efectos no genotóxicos del iAs es muy bajo. En el caso del margen de exposición, calculado para el Pb el riesgo es descartable para la mayoría de modelos predictivos. Por otra parte, los valores de probabilidad de padecer cáncer, por la ingesta de iAs y Pb presentes en el café, fue en general bajo. La única excepción se presentó en el arsénico, para el percentil 95, cuyo riesgo puede considerarse alto. Para este metal, se deberían proponer medidas de gestión capaces de aumentar la seguridad de los consumidores.

Palabras claves: evaluación del riesgo, metales pesados, tóxicos, margen de exposición, riesgo de cáncer, ingesta diaria.

¹ Instituto Universitario de Ingeniería de Alimentos Food-UPV, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain

RESUM

El Perú és un dels principals exportadors de café en el món. El seu consum es relaciona amb efectes positius per a la salut com la seua aportació en nutrients, antioxidants i cafeïna, disminució de la mortalitat, diabetis mellitus, demència, malaltia de Parkinson, malalties cardiovasculars i molts tipus de càncer. No obstant això, la presència de metalls pesants pot posar en perill la seguretat dels consumidors. L'objectiu principal d'este estudi va ser caracteritzar probabilísticament el risc per al consumidor per la presència de iAs i Pb en el gra verd de café produït al Perú. A este efecte, es van analitzar 135 mostres de gra verd de café per triplicat, adquirides en finques productores de café a les regions Amazonas (n = 42) i Sant Martí (n = 93), durant les campanyes de collita 2021 (n = 99) i 2024 (n = 36). La concentració de Pb i As es va determinar mitjançant anàlisi d'Espectroscòpia d'Emissió Atòmica de plasma de microones (MP-AES). Els resultats per regió i any van mostrar diferències significatives, Sant Martín presente nivells superiors de iAs que el Pb. Després de simular la concentració en la tassa de café, amb models predictius d'altres autors, es va caracteritzar el risc. El risc d'efectes no genotòxics del iAs és molt baix. En el cas del marge d'exposició, calculat per al Pb el risc és descartable per a la majoria de models predictius. D'altra banda, els valors de probabilitat de patir càncer, per la ingesta de *iAs i *Pb presents en el café, va anar en general baix. L'única excepció es va presentar en l'arsènic, per al percentil 95, el risc del qual pot considerar-se alt. Per a este metall, s'haurien de proposar mesures de gestió capaces d'augmentar la seguretat dels consumidors.

ABSTRACT

Peru is one of the main exporters of coffee in the world. Its consumption is associated with positive health effects such as nutrients, antioxidants and caffeine, reduced mortality, diabetes mellitus, dementia, Parkinson's disease, cardiovascular disease and many types of cancer. However, the presence of heavy metals may jeopardise consumer safety. The main objective of this study was to probabilistically characterise the risk to consumers from the presence of iAs and Pb in green coffee beans produced in Peru. To this end, 135 samples of green coffee beans were analysed in triplicate, acquired from coffee producing farms in the Amazonas (n = 42) and San Martin (n = 93) regions, during the 2021 (n = 99) and 2024 (n = 36) harvest seasons. The concentration of Pb and iAs was determined by microwave plasma atomic emission spectroscopy (MP-AES) analysis. The results by region and year showed significant differences, with San

Martin showing higher levels of iAs than Pb. After simulating the concentration in the coffee cup, using predictive models of other authors, the risk was characterised. The risk of non-genotoxic effects of iAs is very low. In the case of the margin of exposure, calculated for Pb, the risk is discardable for most predictive models. On the other hand, the probability values of suffering from cancer, due to the intake of iAs and Pb present in coffee, were generally low. The only exception was in arsenic, for the 95th percentile, whose risk can be considered high. For this metal, management measures capable of increasing consumer safety should be proposed.

1. INTRODUCCION

Hoy en día el café representa uno de los productos más consumidos en todo el mundo, donde las exportaciones de grano verde en febrero de 2024 ascendieron a 10,43 millones de sacos, en comparación con 9,52 millones de sacos en febrero del año anterior. Lo que representa un incremento del 9,5 % (OIC, 2024). El café se cultiva en más de 50 países en vías de desarrollo, participando en su producción más de 25 millones de pequeños agricultores, por lo que es uno de los principales motores en el desarrollo de la economía rural (Freitas et al., 2024; OIC, 2021).

El café en el Perú es un pilar fundamental de la economía, para más de dos millones de personas en diversas etapas de su producción, donde se destaca por la exportación de cafés especiales de alta calidad, consolidando su posición en el mercado global, la producción de café en grano al primer trimestre del 2023 ascendió a 30,1 mil toneladas, notándose un incremento de 2,5% respecto a las 29,3 mil toneladas obtenidas en el primer trimestre de 2022 (Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI), 2024).

El grano de café dentro de su estructura química alberga una abundancia de nutrientes esenciales, como potasio, niacina, magnesio, tocoferoles, polisacáridos, monosacáridos, lípidos, esteroides y una variedad de antioxidantes, tales como polifenoles, ácidos clorogénicos, ácidos hidroxycinámicos, cafeína y ácido cafeico (Guadalupe et al., 2023). Además existen estudios que asocian el consumo de café con la disminución de la mortalidad, diabetes mellitus, demencia, enfermedad de Parkinson, enfermedades cardiovasculares y muchos tipos de cáncer (Di Maso et al., 2021; Hou et al., 2022; Kim et al., 2021). No obstante, estos efectos positivos podrían verse comprometidos debido a la existencia de contaminantes como metales pesados, los cuales pueden encontrarse en el entorno de forma natural o ser resultado de actividades industriales y agrícolas (Ashu & Chandravanshi, 2011; Guadalupe et al., 2023; Kowalska, 2021; Pigozzi et al., 2018; Tripathy et al., 2015). Los metales pesados son difíciles de degradar y podrían hasta mantenerse por largos periodos de tiempo en el entorno (Khunlert et al., 2022; Sabrina et al., 2017; Schmidt et al., 2009), produciendo que estos metales se acumulen en las raíces e incluso ser absorbidos por estos y estar presentes en las raíces, brotes y granos del café (Khunlert et al., 2022; Sabrina et al., 2017; Schmidt et al., 2009).

La Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) clasifica a varios metales como el arsénico inorgánico (iAs) dentro de los carcinógenos de categoría 1, asociado al cáncer en los seres humanos incluso con una exposición leve a moderada (Albals et al., 2021; Corazon-Guivin et al., 2023) y por otro lado

al Pb dentro del grupo 2B, probablemente carcinógeno (International Agency for Research on Cancer, 2024; Taghizadeh et al., 2023). Estos metales pueden llegar a afectar a órganos como los riñones, hígado, pulmones, células sanguíneas, sistema nervioso central y mental (Berego et al., 2023),

Los riesgos para los consumidores pueden determinarse mediante la realización de una evaluación de riesgos. Este componente del análisis de riesgos se define como el proceso sistemático de identificar, analizar y caracterizar los riesgos para la salud de los consumidores durante un período específico (Roychowdhury et al., 2003). Al realizar este proceso analítico, se deben utilizar métodos probabilísticos para tener en cuenta la variabilidad en los datos de entrada, como el consumo, las concentraciones de contaminantes químicos o las diferencias de peso corporal entre poblaciones, a fin de reducir la incertidumbre en los riesgos calculados (Doménech & Martorell, 2017; Guo et al., 2019).

El objetivo principal de este estudio fue caracterizar probabilísticamente el riesgo para el consumidor por la presencia de iAs y Pb en el grano verde de café producido en Perú. Con este objetivo se tomaron los datos de la concentración de iAs y Pb en granos de café cosechados en dos campañas (2021 y 2024) de las principales regiones productoras peruanas (Amazonas y San Martín). Se modeló la variación de la concentración en las etapas de tostado e infusión y se realizó la evaluación probabilística del riesgo. Este estudio se enmarca dentro de los objetivos de desarrollo sostenible salud y bienestar (ODS3) y producción y consumo responsables (ODS12).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Toma de muestras

Las muestras utilizadas en el presente estudio fueron granos verdes procedentes de las regiones de Amazonas y San Martín, cosechadas en las campañas de 2021 y 2024. Un total de 135 muestras fueron recogidas directamente en las fincas productoras (figura 1). Una vez recogidas las muestras se envasaron en recipientes individuales, etiquetados preservando la trazabilidad. A continuación, se trasladaron al Laboratorio de Investigación de Suelos y Aguas (LABISAG) de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas del Perú, acreditado conforme a la norma ISO/IEC 17025:2017.

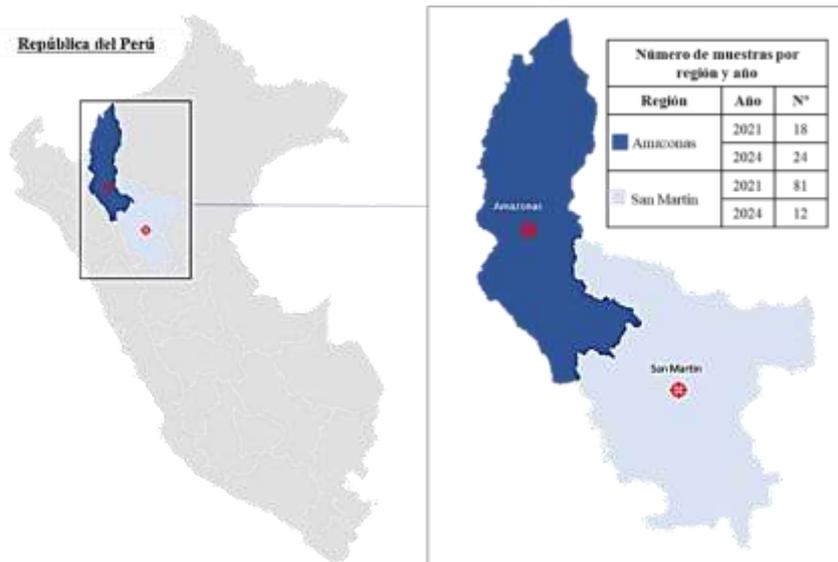


FIGURA 1. Mapa del Perú indicando las regiones de extracción de muestras (Amazonas y San Martín), año (2021 y 2024) y número de muestras (Fuente: elaboración propia).

2.2 Proceso de producción

El proceso productivo del café comienza con la recolección de los granos maduros. Luego los granos se despulpan para retirar la cáscara y se fermentan para eliminar el mucílago. Posteriormente se secan hasta obtener la humedad del 12%, obteniendo el grano pergamino. Luego se realiza el pilado/descascarillado para obtener el grano verde, sobre el que se han realizado los análisis en este estudio. Finalmente, los granos verdes se tuestan y se muelen para su preparación de la infusión.



FIGURA 2. Proceso de las diferentes etapas desde la recolección del café hasta la obtención de la infusión

2.3 Análisis químicos

La determinación de la concentración de arsénico inorgánico (iAs) y plomo (Pb), se realizó por espectrometría de emisión atómica por plasma de microondas (MP-AES) de Agilent, modelo 4100 MP-AES, con un acoplador inductivo (ICP).

La selección de ondas para el iAs fue 228,802 nm y para el Pb fue 253,652 nm. Los análisis se realizaron por triplicado y fueron realizados por el Laboratorio de Investigación de Suelos y Aguas (LABISAG) de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas del Perú, en cual cuenta con acreditación conforme a la norma ISO/IEC 17025:2017.

2.4 Modelos predictivos

La concentración de los metales en la infusión de café se obtuvo utilizando modelos predictivos publicados. Así, partiendo de la concentración de grano verde analizada se simula la reducción en la etapa de tostado y la lixiviación del grano tostado a la infusión. La Tabla 1, muestra los valores de reducción durante el tostado y de lixiviación a la infusión de iAs y Pb según los distintos autores. En el caso de Semen et al. (2017), su modelo predictivo considera una infusión sobre el grano verde sin realizar la etapa de tostado.

TABLA 1. Variación de las concentraciones de iAs y Pb en las etapas de tostado e infusión según los autores utilizados en este estudio

Metal	Reducción del grano verde al tostado (%)	Lixiviación del grano tostado a la infusión (%)	Lixiviación del grano verde a la infusión (%)	Modelo predictivo
iAs	12	6	-	Guadalupe et al., 2023
	-	-	82	Semen et al., 2017
Pb	15	8	-	Guadalupe et al., 2023
	-	-	37	Semen et al., 2017
	14	7	-	Adler et al., 2019
	128	2	-	Khunlert et al., 2021
	14	94	-	Winiarska-Mieczan et al., 2021

2.5 Evaluación del riesgo

La evaluación del riesgo se realizó considerando los modos de acción específicos de cada metal. Para los efectos no genotóxicos del iAs se calculó el índice de peligro. Para los no genotóxicos del Pb, relacionados con su neurotoxicidad y cardiotoxicidad se utilizó el margen de exposición (MOE, por sus siglas en ingles). Para los efectos genotóxicos del iAs, se emplearon el MOE, la Probabilidad de Exceso de Riesgo (POE). Por último, para calcular la probabilidad de padecer cáncer por ambos metales, se calculó el riesgo de cáncer (CR por sus siglas en ingles). La tabla 2 presenta las ecuaciones utilizadas, los datos necesarios para los cálculos y las fuentes consultadas.

TABLA 2. Parámetros, ecuaciones y valores de referencia para caracterizar el riesgo para la salud para cada peligro (x= iAs, Pb) y región (i =Amazonas, San Martín).

Parámetro	Descripción	Ecuaciones y valores de referencia	Unidades	Fuente
C_{xi}	Concentración	Tabla 3	mg/kg	Este estudio
IR	Tasa de ingesta	Exponencial 1,44E-01	kg/día	EFSA, 2023
Bw	Peso corporal	Gamma (10%;55,4;50%;63,8;95%;83,91)	kgBw	Quintanilla et al. 2019
EDI_{xi}	Ingesta diaria estimada	$C_{xi} \cdot IR / Bw$	mg/kgBw/día	EFSA, 2014
BMDL _x	Dosis de referencia	BMDL01 (iAs): (3E-04;8E-03)	mg/kgBw/día	EFSA, 2021
		BMDL01 (Pb): 1,5E-03 (Cardiovascular)	mg/kgBw/día	EFSA, 2010
		BMDL01 (Pb): 1,5E-03 (Cardiovascular)	mg/kgBw/día	EFSA, 2010
		BMDL10 (Pb): 6,3E-04 (Nefrotóxico)	mg/kgBw/día	EFSA, 2010
MOE _{xi}	Margen de exposición	$BMDL_x / EDI_{xi}$	-	Doménech & Martorell, 2024
POE _{xi}	Probabilidad de exceder RV	$Pr(EDI_{xi} > BMDL_x) = \int_{BMDL_{\%x}}^{\infty} f(E) dE$	-	Doménech & Martorell, 2021
SF _x	Factor de pendiente	SF (iAs): 1,5	$(mg/kgBw/día)^{-1}$	EPA, 2022
		SF(Pb): 8,5E-03	$(mg/kgBw/día)^{-1}$	EPA, 2022
CR _{xi}	Riesgo de cáncer	$EDI_{xi} \cdot SF_x$	-	ATSDR, 2022
RV	Valor de referencia	RV (iAs): 3,00E-04	mg/kgBw/día	EPA, 2022
HQ _{xi}	Cociente de Riesgo	EDI_{xi} / RV_x	-	ATSDR, 2022

2.6 Análisis estadístico de datos

El estudio estadístico, para determinar las diferencias significativas de la concentración por región y año de producción se realizó mediante un ANOVA y la comparación de medias con el uso de la prueba Tukey, empleando el software Statgraphis 19.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1 Concentración de iAs y Pb en grano verde de café

La concentración media, mínimo, máximo y desviación estándar de iAs y Pb por región de producción y año de cosecha, así como el ANOVA se muestran en la Tabla 3. Los datos revelan una diferencia significativa en las concentraciones de iAs entre regiones y los dos años. Específicamente se observa que la Región Amazonas presenta concentraciones de iAs considerablemente más bajas en comparación con la región San Martín. En relación al Pb, solo el factor región es

significativo, no observándose variación por campaña. Siendo también la región de San Martín, la que presenta mayores concentraciones.

TABLA 3. Concentración media, mínimo, máximo y desviación estándar (DE) de iAs y Pb en grano verde de café por región y año de producción.

Metal	Concentración (mg/kg)	Año 2021		Año 2024		ANOVA F-ratio	
		Amazonas	San Martín	Amazonas	San Martín	Región	Campaña
iAs	Media	0,41 ^a	0,69 ^b	0,64 ^b	0,86 ^c	75,06 ^{***}	50,62 ^{***}
	Min.	0,11	0,44	0,57	0,81		
	Max.	0,80	0,97	0,72	0,93		
	DE	0,15	0,13	0,05	0,04		
Pb	Media	0,31 ^a	0,34 ^b	0,32 ^a	0,34 ^b	32,90 ^{***}	1,11 ^{ns}
	Min.	0,26	0,29	0,30	0,38		
	Máx.	0,34	0,39	0,36	0,31		
	DE	0,02	0,02	0,02	0,02		

Letras diferentes por fila indican grupos estadísticamente diferentes (prueba de Tukey, $p < 0,05$), ns: no significativo; ^{***} $p < 0,001$.

En la Figura 3 se muestran los valores de concentración de iAs (a) y Pb (b) por región y campaña ajustados a una distribución, con el programa @Risk (palisade versión 8), se muestran en cuyos datos se presentan en la tabla 1 de anexos. Los resultados indican que las distribuciones en el iAs están más separadas, especialmente las de San Martín, que se sitúan más a la derecha. En el caso del Pb, en cambio, se observa una mayor coincidencia entre las distribuciones, tanto en su forma como en los valores.

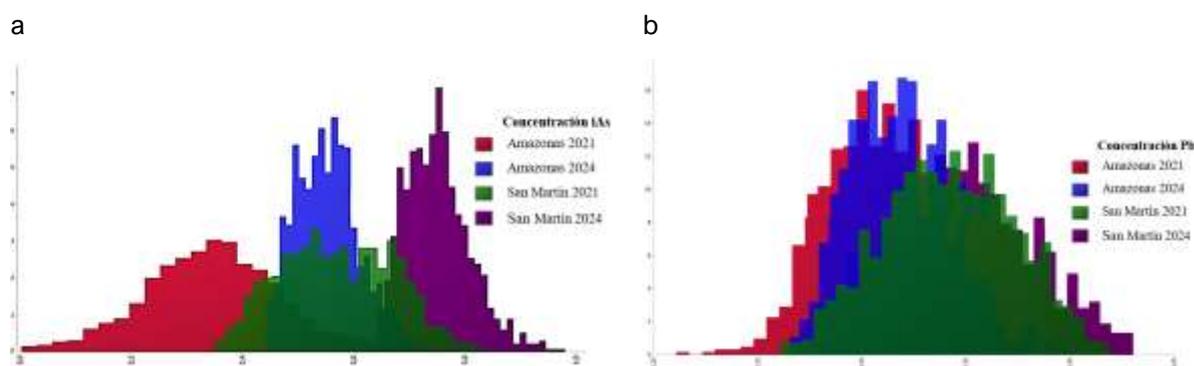


FIGURA 3. Distribución de la concentración de iAs (a) y para el Pb (b) por región y año.

La figura 4 presenta una comparación de los resultados del presente estudio, con investigaciones previas que determinaron la concentración de iAs en el

grano verde de café. A la vista de los resultados, los valores de iAs obtenidos en el presente estudio (0,41 - 0,87 mg/kg), se encuentran en el mismo orden de magnitud que los reportados por Guadalupe et al. (2023), quienes encontraron en el grano verde una concentración promedio de 0,77 mg/kg. Sin embargo, estos valores fueron superiores a los de Santato et al. (2012), Semen et al.(2017), y Vezzulli et al. (2023), quienes no detectaron iAs en las muestras analizadas (<LOD).



FIGURA 4. Comparativa de la concentración de iAs en grano verde con otros autores.

Las diferencias observadas entre estudios pueden atribuirse a varios factores relacionados con las propiedades fisicoquímicas de los metales, así como con las condiciones y especies de cultivo del cafeto (Rahimi et al. 2023; Wasserman, 2005). Las características del suelo (como el contenido orgánico y mineral, el estado de drenaje, el pH y el nivel de agua), clima, además de los fertilizantes y pesticidas utilizados durante el cultivo tienen una gran influencia en la concentración de metales (Al-Dalain et al. 2020; Martín et al. 1998; Rahimi et al. 2023). Los metales pesados disueltos en el suelo pueden ser absorbidos por las plantas, acumulándose en sus tejidos y, finalmente, trasladándose a los granos de café (Rahimi et al. 2023). Por lo que, de los estudios reportados se puede atribuir que las diferencias en las concentraciones en metales en el café se ven influenciadas por las características específicas de cada región de procedencia.

En el caso del Pb para este estudio, la concentración media del grano verde (0,877 mg/kg) fue parecida a los resultados publicados en otros estudios, como los valores encontrados por Santato et al. (2012), Vezzulli et al. (2023) y Semen et al. (2017), figura 5. En el caso opuesto, con valores mucho mayores se observa el trabajo de Khunlert et al. (2022). Valores inferiores al LOQ fueron determinados por Berego et al. (2023) y Getachew & Worku (2014); y por debajo del LOD fueron publicados por Ashu & Chandravanshi, (2011).

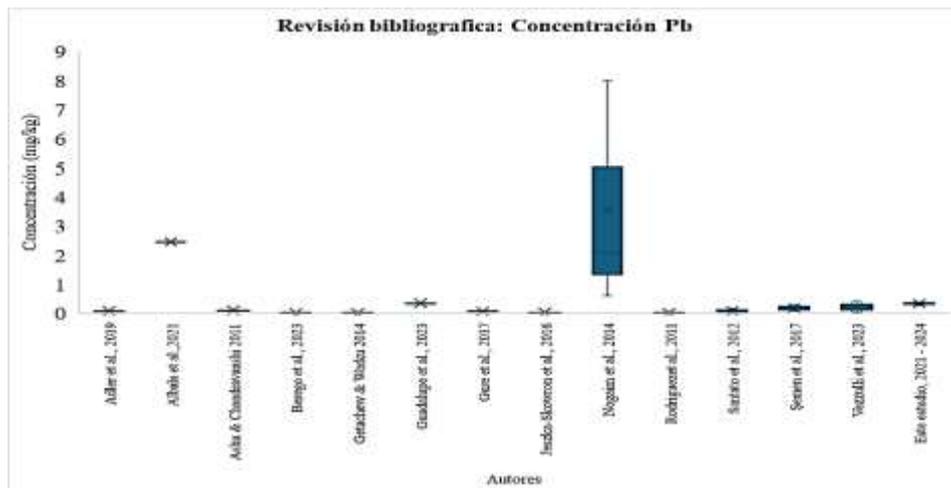


FIGURA 5. Comparativa de la concentración de Pb en grano verde

Rahimi et al. (2023) en un trabajo de revisión concluyó que la mayor concentración de Pb se encuentra en el continente asiático (0,742 mg/kg), mientras que la más baja, se halla en el africano (0,003 mg/kg). Por otra parte, considerando que el contenido de metales en los granos de café también es influenciado por procesos industriales como el secado, tostado, el contenido de metales en los granos de café también puede verse influenciado por los procesos industriales como el secado, tostado, quema y almacenamiento (Ashu & Chandravanshi, 2011). Sabrina et al. (2017) detectaron niveles elevados de plomo en el café brasileño, atribuibles a la contaminación del suelo en esa región. Malec & Borowski, (2017) señalaron que la variabilidad de los metales pesados en las plantas está influenciada por el tipo y origen de la contaminación del suelo.

3.2 Concentración de iAs y Pb después del tostado y en la infusión de café

La tabla 4 presenta los resultados obtenidos de concentración de iAs y Pb por región y año estudiado, tras la aplicación de los modelos predictivos de las etapas de tostado e infusión, publicados por varios autores (Guadalupe et al. 2023; Semen et al. 2017; Adler et al. 2019; Khunlert et al. 2021; Winiarska-Mieczan et al. 2021).

La concentración del iAs en la infusión, obtenidos con el modelo de Guadalupe et al. 2023, muestra valores inferiores (0,02-0,05mg/kg) en relación a los obtenidos con el modelo de Semen et al. 2017 (0,34-0,72mg/kg). Esto puede deberse a que el segundo autor calcula directamente la reducción en la lixiviación, siendo solo de un 37% (Semen et al. 2017).

TABLA 4. Concentración en grano tostado, infusión de iAs y Pb por modelo predictivo, región y año.

Metal	Modelo predictivo	Región	Año	Concentración (mg/kg)	
				Tostado	Infusión
iAs	Guadalupe et al. 2023	Amazonas	2021	0,36	0,02
			2024	0,57	0,03
		San Martín	2021	0,59	0,03
			2024	0,77	0,05
	Semen et al. 2017	Amazonas	2021	-	0,34
			2024	-	0,53
		San Martín	2021	-	0,55
			2024	-	0,72
Pb	Guadalupe et al. 2023	Amazonas	2021	0,26	0,05
			2024	0,27	0,05
		San Martín	2021	0,29	0,05
			2024	0,30	0,05
	Semen et al. 2017	Amazonas	2021	-	0,11
			2024	-	0,12
		San Martín	2021	-	0,13
			2024	-	0,13
	Adler et al. 2019	Amazonas	2021	0,26	0,02
			2024	0,27	0,02
		San Martín	2021	0,29	0,02
			2024	0,30	0,02
	Khunlert et al. 2021	Amazonas	2021	0,39	0,01
			2024	0,41	0,01
		San Martín	2021	0,44	0,01
			2024	0,45	0,01
	Winiarska-Mieczan et al. 2021	Amazonas	2021	0,26	0,25
			2024	0,27	0,25
		San Martín	2021	0,29	0,26
			2024	0,30	0,28

En relación al Pb, las concentraciones en el tostado van de 0,26-0,45 mg/kg, siendo los valores mayores correspondientes al modelo de Khunlert et al. (2021). La concentración en la infusión va de 0,01 a 0,28 mg/kg. Estas diferencias pueden ser resultado de las distintas metodologías utilizadas en cada estudio, así como de los procesos de tostado y lixiviación.

Los resultados obtenidos por simulación son parecidos al trabajo de Guadalupe et al. (2023), realizado en regiones productoras de café del Perú, quienes concluyeron que las concentraciones para granos de café tostado fueron de 0,68 mg/kg para el iAs y 0,29 mg/kg para el Pb. Además, en el café en taza los valores fueron de 0,4-0,43 mg/kg para el iAs y 0,17-0,36 mg/kg para el Pb.

La figura 6 muestra una representación de los valores obtenidos con los distintos modelos de reducción durante el proceso de los distintos autores. A la vista de los resultados, el tostado tiene una ligera influencia en la reducción de los dos metales, pero es especialmente la etapa de infusión, en la que se observa un mayor descenso. Esto es debido al bajo porcentaje de extracción desde el

grano molido a la taza. Esto puede deberse a que el contenido en metales disminuye significativamente tras un periodo corto transfiriéndose de los granos al líquido (Lee et al. 2020). La única excepción se produce con el trabajo de Semen et al. (2017), en relación al iAs, por lo que no se ha tenido en cuenta para calcular el riesgo.

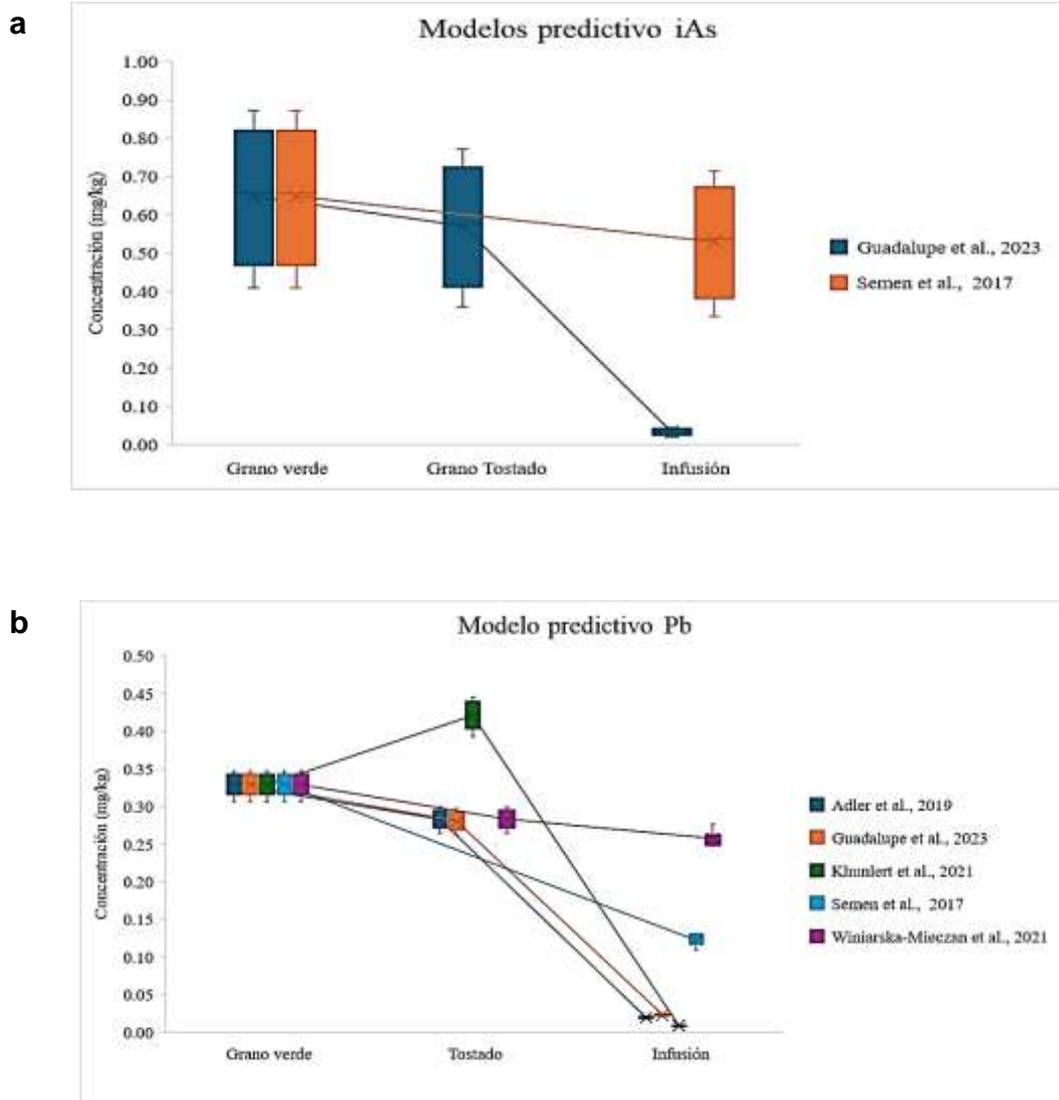


FIGURA 6. Concentración de iAs (a) y Pb (b) en grano verde, tostados e infusión según los modelos predictivos

Estas concentraciones sirven de base para calcular la exposición diaria a iAs y Pb ingeridos con el consumo de café. Los valores calculados se muestran en la tabla 2 del anexo.

Respecto a la Ingesta Diaria Estimada (EDI), en el estudio de Guadalupe et al. (2023), se observó que, en Amazonas, la media de la EDI de iAs fue de 4,79E-05

mg/kgBw/día en 2021 y para 2024, la media de EDI aumentó a $7,53E-05$ mg/kgBw/día. En San Martín, tanto en 2021 como en 2024, se observó un aumento similar en la media y la dispersión de la Ingesta Diaria Estimada. Por otro lado, el estudio de Semen et al. (2017) reportó valores de EDI significativamente más altos para Amazonas y San Martín en los años 2021 y 2024, con medias que varían entre $7,57E-04$ y $1,60E-03$.

En el caso del Pb, el estudio de Guadalupe et al. (2023) sobre la Ingesta Diaria Estimada (EDI), se encontraron medias de EDI en Amazonas y San Martín entre $4,78E-05$ y $5,43E-05$ para los años 2021 y 2024, con ligeras variaciones en la desviación estándar y los percentiles. Adler et al. (2019) reportó valores similares a los de Guadalupe et al. con medias. Winiarska-Mieczan et al. (2021) encontró valores de EDI notablemente más altos, con medias entre $5,55E-04$ y $6,28E-04$. Khunlert et al. (2021) reportó valores de EDI más bajos en comparación con otros estudios, con medias entre $1,75E-05$ y $1,97E-05$. Semen et al. (2017) mostró valores de EDI más altos que otros estudios, con medias que van desde $2,54E-04$ hasta $2,87E-04$.

En general, los datos indican un aumento en la exposición a plomo entre 2021 y 2024 y una notable variabilidad en los valores de EDI reportados por diferentes estudios, destacando la importancia de considerar múltiples fuentes y metodologías en el análisis de riesgo. Además, se observó que la región de San Martín tiene consistentemente valores de EDI más altos en comparación con Amazonas para ambos metales y en ambos años. Esto supone que las diferencias metodológicas y de enfoque entre los estudios pueden influir considerablemente en la estimación de la exposición diaria ya que el modelo de Semen et al. (2017) considero la evaluación directa de los granos de café verde en la infusión, notándose mayor prevalencia que en el café tostado que a su vez denota que gran parte de la concentración de metales es retenido en los posos de café. Además, se observa un incremento general de la EDI con el paso de los años en ambas regiones, lo cual podría reflejar cambios en las prácticas agrícolas o en las condiciones ambientales.

3.3 Caracterización del riesgo

3.3.1. Cuota de peligro

El margen de seguridad para los efectos no genotóxicos en iAs, se ha calculado con la cuota de peligrosidad (HQ). La figura 7 muestra los valores obtenidos por región y año. Los resultados en general, menores que 1 en todos los casos, indican que los efectos sobre la salud son de bajo nivel de

preocupación. No obstante, el valor de 1 para el percentil 95 de la región de San Martín y la campaña de 2024 indica que debería hacerse un estudio de las causas de la alta concentración y estudio de medidas de mitigación.

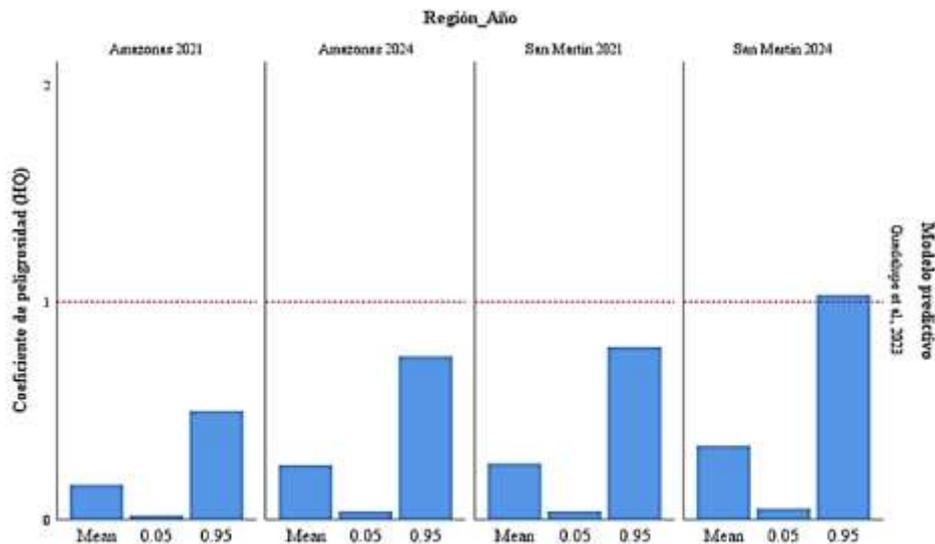


FIGURA 7. Cuota de Peligro (HQ) para el iAs

Guadalupe et al. (2023) concluyó que los valores de HQ para iAs, Cr, Cd y Hg, en el percentil 95, fueron menores a 1, obteniendo una probabilidad nula a los efectos indeseables. En relación al HI (efecto combinado de los metales), los menores valores se dieron en las regiones de Amazonas, Huánuco y San Martín y los más altos en Cajamarca y Cusco, confirmándose bajo el riesgo por el consumo de café. Taghizadeh et al. (2023) encontró en 87 muestras de café recolectadas en Irán, que HI era de $1E-02$. Del mismo modo, Kowalska, (2021) obtuvo un HQ para el Pb, entre $4,33E-03$ y $2,45E-02$, calculado para granos provenientes de mercados polacos. Por otro lado, los valores de HQ para Pb y Cd fueron de $6,70E-02$ y $2,33E-01$, respectivamente (Winiarska-Mieczan et al. 2021). Lo que evidenciaría que a esas concentraciones para estos metales no supone riesgo para la salud de los consumidores. Rahimi et al. (2023) presentó la evaluación del riesgo no cancerígeno por países en función al consumo de productos a base de café, siendo el HI, del consumo mayor en Brasil> Polonia> Arabia Saudita> Arabia> Inglaterra> Etiopía> Jordania> Filipinas> Indias> Pakistan, evidenciando diferentes patrones de consumo de café y sus subproductos. Los valores de HI menores a 1, indicaron un bajo riesgo al consumidor.

TABLA 5. Cuota de peligro (HQ) para el iAs, media, Desviación Estándar y percentiles para el iAs

Metal	Modelo	Región	Año	Métrica	Media	Desviación Estándar	5%	95%
iAs	Guadalupe et al. 2023	Amazonas	2021	HQ	1,60E-01	1,87E-01	1,76E-02	5,00E-01
			2024	HQ	2,51E-01	2,74E-01	3,72E-02	7,51E-01
		San Martin	2021	HQ	2,58E-01	2,82E-01	3,85E-02	7,93E-01
			2024	HQ	3,40E-01	3,67E-01	5,06E-02	1,03E+00

3.3.2. Margen de exposición

La caracterización del riesgo para los efectos de cáncer en iAs y neurotoxicidad del Pb se ha calculado con el margen de exposición (MOE). La figura 8 representa la media y los percentiles 5 y 95 para el iAs.

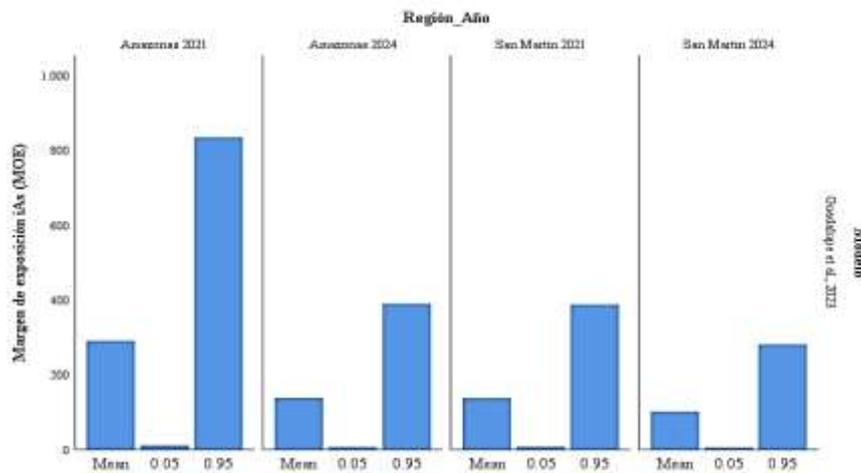


FIGURA 8. Margen de exposición (MOE) para el iAs

Los valores del Margen de Exposición (MOE) para el Pb de este estudio son mayores con los reportados por Guadalupe et al. (2023), quienes obtuvieron valores para el efecto cardiovascular y nefrotóxico no genotóxico del Pb del rango de 3,5 a $1,1 \times 10^2$. En concreto, para el MOE01 por Adler et al. (2019), Guadalupe et al. (2023), Khunlert et al. (2022) y Winiarska-Mieczan et al. (2021) los valores medios fueron $6,35 \times 10^1$; $7,30 \times 10^1$; $5,47 \times 10^0$; $1,70 \times 10^2$ y $1,22 \times 10^1$, respectivamente. Para el MOE10, los valores obtenidos fueron $2,67 \times 10^1$; $3,07 \times 10^1$; $2,30 \times 10^0$; $7,15 \times 10^1$; $5,13 \times 10^0$ de los cuatro modelos predictivos de Adler et al. (2019), Guadalupe et al. (2023), Khunlert et al. (2022) y Winiarska-Mieczan et al. (2021).

Tal como se observa en la figura 9 y 10 los valores de MOE obtenidos son inferiores a 10, 000, con lo que no se puede descartar el riesgo. No obstante, los valores de POE igual a cero, indican que la probabilidad de exceder el BMDL es nula y, por lo tanto, el riesgo podría considerarse muy bajo. La única excepción está con el trabajo de Winiarska-Mieczan et al. (2021). Si que el POE indica que hay riesgo de exceder el margen de seguridad y por lo tanto se debería estudiar el porqué de los altos valores obtenidos con estos modelos.

Comparando los resultados del presente trabajo con otros estudios, el margen de exposición para el iAs y efectos no genotóxicos son parecidos a los reportados por Guadalupe et al. (2024), quienes obtuvieron un margen de exposición para el café instantáneo entre $3,0$ y $3,5 \times 10^3$.

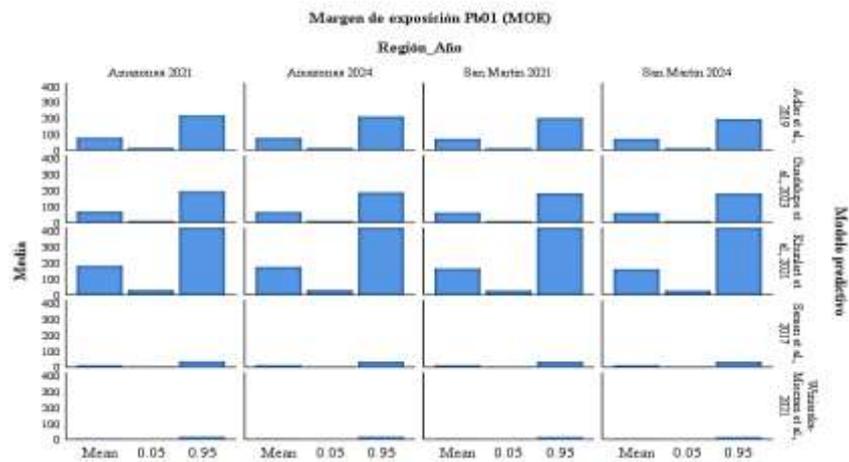


FIGURA 9. Margen de exposición (MOE) para el Pb. *MOE (BMDL01) = $1,50E-03$ mg/kg-Bw/day,

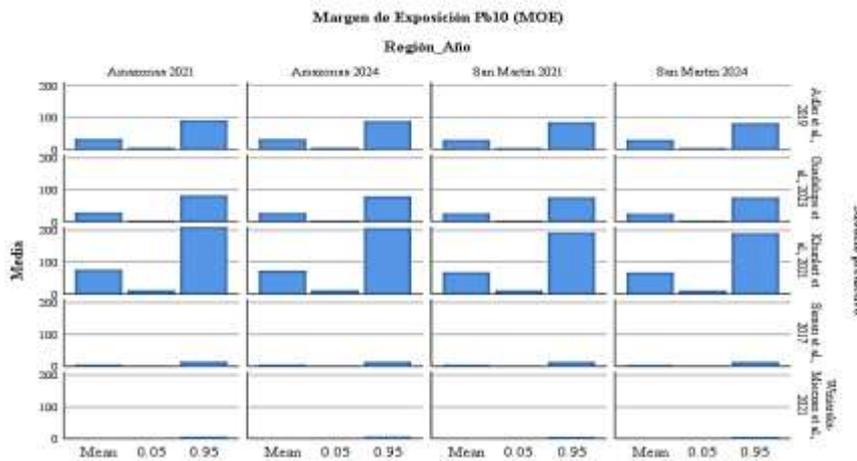


FIGURA 10. Margen de exposición (MOE) para el Pb ** MOE (BMDL10) = $6,30E-04$ mg/kg-Bw/day

Los valores del MOE para el Pb de este estudio (Tabla 3 del anexo), son mayores con los reportados por Guadalupe et al. (2023), quienes obtuvieron valores para el efecto cardiovascular y nefrotóxico del Pb de $3,5$ a $1,1 \times 10^2$ y $8,3$ a $2,7 \times 10^2$ respectivamente.

3.3.3. Probabilidad de cáncer

La probabilidad de padecer cáncer, se ha calculado con la formula del riesgo de cáncer (CR), incluida en tabla 2. La tabla 6 muestra, la media y los percentiles 5 y 95. A la vista de los resultados, y teniendo en cuenta que la probabilidad de cáncer inferior a 10^{-6} , se considera aceptable, entre 10^{-4} y 10^{-6} moderada y superiores a 10^{-4} no aceptables. Los valores obtenidos para el iAs se considerarían moderados e incluso necesitarían tomar medidas adicionales. En relación al plomo, el riesgo de cáncer se consideraría moderado o bajo para todos los modelos. Se observa los resultados de las diferentes métricas evaluadas en este estudio, de cara al resultado se tiene que el CR presentó un incremento en 2024 respecto a 2021 en ambas regiones, siendo más alto en San Martín para el iAs.

TABLA 6. Riesgo de cáncer (CR), media, percentiles y modelo probabilístico para el iAs y Pb

Metal	Modelo	Región	Año	Media	5%	95%
iAs	Guadalupe et al. 2023	Amazonas	2021	7,19E-05	7,94E-06	2,25E-04
		Amazonas	2024	1,13E-04	1,67E-05	3,38E-04
		San Martin	2021	1,16E-04	1,73E-05	3,57E-04
		San Martin	2024	1,53E-04	2,28E-05	4,65E-04
Pb	Adler et al. 2019	Amazonas	2021	3,50E-07	5,84E-08	1,04E-06
		Amazonas	2024	3,63E-07	6,00E-08	1,03E-06
		San Martin	2021	3,89E-07	6,28E-08	1,14E-06
		San Martin	2024	3,96E-07	6,50E-08	1,14E-06
	Guadalupe et al. 2023	Amazonas	2021	4,06E-07	6,46E-08	1,25E-06
		Amazonas	2024	4,21E-07	6,71E-08	1,29E-06
		San Martin	2021	4,53E-07	7,03E-08	1,36E-06
		San Martin	2024	4,62E-07	7,03E-08	1,38E-06
	Khunlert et al. 2021	Amazonas	2021	1,48E-07	2,50E-08	4,28E-07
		Amazonas	2024	1,53E-07	2,58E-08	4,30E-07
		San Martin	2021	1,65E-07	2,75E-08	4,70E-07
		San Martin	2024	1,68E-07	2,79E-08	4,89E-07
	Semen et al. 2017	Amazonas	2021	2,16E-06	3,52E-07	6,12E-06
		Amazonas	2024	2,23E-06	3,61E-07	6,63E-06
		San Martin	2021	2,40E-06	3,81E-07	6,94E-06
		San Martin	2024	2,44E-06	3,86E-07	7,13E-06
Winiarska-Mieczan et al. 2021	Amazonas	2021	4,72E-06	7,96E-07	1,35E-05	
	Amazonas	2024	4,90E-06	7,94E-07	1,41E-05	
	San Martin	2021	5,24E-06	8,45E-07	1,48E-05	
	San Martin	2024	5,34E-06	8,73E-07	1,50E-05	

Comparando nuestros resultados con los de otros autores, la probabilidad de cáncer se encuentra en la línea de Kowalska, (2021) quien determinó un valor máximo de CR de $1,29 \cdot 10^{-5}$ para el iAs. Por otro lado, Semen et al. (2017) mostró valores medios mucho más altos ($1,14 \cdot 10^{-3}$ a $2,40 \cdot 10^{-3}$) para iAs, siendo el riesgo inaceptable. Esto puede atribuirse que las diferencias metodológicas entre estudios pueden influir significativamente en las estimaciones de riesgo. Así mismo Taghizadeh et al. (2023) reportó un CR de $3,84 \cdot 10^{-6}$ para la presencia de iAs y $2,71 \cdot 10^{-8}$ de Pb, siendo estos valores inferiores a los calculados en este trabajo y de baja probabilidad de causar un daño en la salud del consumidor.

4. CONCLUSIONES

Las concentraciones de iAs en el grano verde de café muestran diferencias significativas entre las regiones de Amazonas y San Martín para las campañas de 2021 y 2024. En concreto, los valores fueron mayores en la campaña de 2024. En relación a la región los valores obtenidos en San Martín fueron superiores a los de Amazonas.

Las concentraciones de Pb no muestran diferencias significativas por campaña, pero sí lo son por región, siendo de nuevo la región de San Martín la que presentó los valores más altos.

Los resultados de la simulación del proceso con los valores obtenidos de otros autores han permitido conocer la exposición en la infusión. Esta información es esencial como pre-estudio para realizar futuros análisis y reducir el campo de experimentación.

La caracterización del riesgo para los efectos no genotóxicos del iAs ha permitido concluir que el riesgo es muy bajo. En el caso del margen de exposición, calculado para el plomo, el riesgo es descartable para la mayoría de modelos predictivos. Por otra parte, los valores de probabilidad de padecer cáncer, por la ingesta de iAs y Pb presentes en el café, fue en general bajo. La única excepción se presentó en el arsénico, para el percentil 95, cuyo riesgo puede considerarse alto. Para este metal, se deberían proponer medidas de gestión capaces de aumentar la seguridad de los consumidores.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Adler, Grażyna, Nędzarek, Arkadiusz and Tórz, Agnieszka. "Concentrations of selected metals (Na, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, Al, Ni, Pb, Cd) in coffee" *Slovenian Journal of Public Health*, vol.58, no.4, 2019, pp.187-193. <https://doi.org/10.2478/sjph-2019-0024>

- Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA). [en línea]. IRIS. Dirección URL: <<https://iris.epa.gov/AdvancedSearch/>>. [Consulta: 08 may. 2024].
- Agencia para el Registro de Sustancias Tóxicas y Enfermedades (ATSDR). [en línea]. Cálculo de cocientes de peligro y estimaciones de riesgo de cáncer. Dirección URL: <https://www.atsdr.cdc.gov/pha-guidance/conducting_scientific_evaluaciones/epcs_and_exposure_calculations/hazardquotients_cancerrisk.html>. [Consulta: 15 may. 2024]
- Al-Dalain SY, Haddad MA, Parisi S, Al-Tarawneh MA, Qaralleh H. 2020. Determinación de macroelementos, elementos de transición y contenidos aniónicos del café tostado molido comercial disponible en los mercados jordanos. *Beverages*, 6(1):16. <https://doi.org/10.3390/beverages6010016>
- Albals, D., Al-Momani, I. F., Issa, R., & Yehya, A. 2021. Multi-element determination of essential and toxic metals in green and roasted coffee beans: A comparative study among different origins using ICP-MS. *Science Progress*, 104(2), 1–17. <https://doi.org/10.1177/00368504211026162>
- Ashu, R., & Chandravanshi, B. S. 2011. Concentration levels of metals in commercially available ethiopian roasted coffee powders and their infusions. *Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia*, 25(1), 11–24. <https://doi.org/10.4314/bcse.v25i1.63356>
- Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) 2023 [en línea]. Evaluación de pesticidas: herramientas. Dirección URL: <<https://www.efsa.europa.eu/en/applications/pesticides/tools>>. [Consulta: 08 may 2024]
- Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA), Arcella D , Casio C y Gómez Ruiz JÁ, 2021. Informe científico sobre la exposición alimentaria crónica al arsénico inorgánico . Revista EFSA 2021;19(1):6380, 50 págs. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2021.6380>
- Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA). [en línea]. Ingestas dietéticas de referencia. Dirección URL: <<https://www.efsa.europa.eu/es/topics/topic/valores-dietéticos-de-referencia>> [Consulta: 15 may. 2024]
- Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria , 2014. Exposición dietética al arsénico inorgánico en la población europea . Revista EFSA 2014; 12 (3):3597, 68 págs. doi: 10.2903/j.efsa.2014.3597
- Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) EFSA, (2023). Manual de orientación para la evaluación de la salud pública Cálculo de cocientes de peligro y estimaciones de riesgo de cáncer Common Cancer Risk Values Used by ATSDR. [en línea]. Dirección URL: <<https://www.efsa.europa.eu/es/glossary/reference-intake-range-ri>>. [Consulta: 06 may. 2024].
- Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) [en línea] Ingestas dietéticas de referencia. Dirección URL: <<https://www.efsa.europa.eu/es/topics/topic/valores-dietéticos-de-referencia>>. [Consulta: 08 may. 2024]
- Berego, Y. S., Sota, S. S., Ulsido, M., & Beyene, E. M. 2023. The contents of essential and toxic metals in coffee beans and soil in Dale Woreda, Sidama Regional State, *Southern Ethiopia*. *PeerJ*, 11, 1–16. <https://doi.org/10.7717/peerj.14789>

- Corazon-Guivin, M. A., Romero-Cachique, G., Del Aguila, K. M., Padilla-Domínguez, A., Hernández-Amasifuen, A. D., Cerna-Mendoza, A., Coyne, D., & Oehl, F. 2023. Rhizoglyphus variabile and Nanoglomus plukenetiae, Native to Peru, Promote Coffee Growth in Western Amazonia. *Microorganisms*, 11(12). <https://doi.org/10.3390/microorganisms11122883>
- EFSA Panel CONTAM (Panel EFSA sobre Contaminantes en la Cadena Alimentaria), 2014. Dictamen Científico sobre los riesgos para la salud humana y animal relacionados con la presencia de beauvericina y enniatinas en alimentos y piensos. *Revista EFSA* 2014; 12 (8):3802, 174 págs. doi: 10.2903/j.efsa.2014.3802
- Di Maso, M., Boffetta, P., Negri, E., La Vecchia, C., & Bravi, F. 2021. Caffeinated Coffee Consumption and Health Outcomes in the US Population: A Dose-Response Meta-Analysis and Estimation of Disease Cases and Deaths Avoided. *Advances in Nutrition*, 12(4), 1160–1176. <https://doi.org/10.1093/advances/nmaa177>
- Doménech, E., & Martorell, S. 2017. Assessment of safety margins of exposure to non-genotoxic chemical substances in food. *Food Control*, 79, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.03.018>
- Doménech, E., & Martorell, S. 2021. Formulation and application of the probability of exceedance metric for risk characterization of non-threshold chemical hazards in food. *Food Control*, 124(June 2020). <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.107910>
- Doménech, E., & Martorell, S. 2024. Review of the Terminology, Approaches, and Formulations Used in the Guidelines on Quantitative Risk Assessment of Chemical Hazards in Food. *Foods*, 13(5). <https://doi.org/10.3390/foods13050714>
- Freitas, V. V., Borges, L. L. R., Vidigal, M. C. T. R., dos Santos, M. H., & Stringheta, P. C. 2024. Coffee: A comprehensive overview of origin, market, and the quality process. *Trends in Food Science and Technology*, 146(October 2023). <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104411>
- Getachew, T., & Worku, N. (2014). Determination of Essentials and Toxic Metals in Raw and Roasted Coffee in Bule Hora Woreda, Borena Zone, Ethiopia. *International Journal of Research*, 1(11). 2348-6848
- Guadalupe, G. A., Chavez, S. G., Arellanos, E., & Doménech, E. 2023. Probabilistic Risk Characterization of Heavy Metals in Peruvian Coffee: Implications of Variety, Region and Processing. *Foods*, 12(17), 1–13. <https://doi.org/10.3390/foods12173254>
- Guadalupe, G. A., Grandez-Yoplac, D. E., Arellanos, E., & Doménech, E. 2024. Probabilistic Risk Assessment of Metals, Acrylamide and Ochratoxin A in Instant Coffee from Brazil, Colombia, Mexico and Peru. *Foods*, 13(5). <https://doi.org/10.3390/foods13050726>
- Guo, G., Zhang, D., & Wang, Y. 2019. Probabilistic human health risk assessment of heavy metal intake via vegetable consumption around Pb/Zn smelters in Southwest China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(18). <https://doi.org/10.3390/ijerph16183267>
- Hou, C., Zeng, Y., Chen, W., Han, X., Yang, H., Ying, Z., Hu, Y., Sun, Y., Qu, Y., Fang, F., & Song, H. 2022. Medical conditions associated with coffee consumption: Disease-trajectory and comorbidity network analyses of a prospective cohort study in UK Biobank. *American Journal of Clinical Nutrition*, 116(3), 730–740. <https://doi.org/10.1093/ajcn/nqac148>
- International Agency for Research on Cancer (IARC) [en línea]. Agents classified by the IARC monographs. Igarss 2024. Dirección URL: <<https://monographs.iarc.who.int/agents-classified-by-the-iarc/>>. [Consulta: 08 may. 2024].

- Khunlert, P., Imsilp, K., Poapolathep, A., Poapolathep, S., & Tanhan, P. 2022. Pyrethroid and Heavy Metal Residues in Different Coffee Bean Preparation Processes and Human Health Risk Assessments via Consumption. *EnvironmentAsia*, 15(1), 94–108. <https://doi.org/10.14456/ea.2022.9>
- Kim, S. A., Tan, L. J., & Shin, S. 2021. Coffee Consumption and the Risk of All-Cause and Cause-Specific Mortality in the Korean Population. *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics*, 121(11), 2221–2232.e4. <https://doi.org/10.1016/j.jand.2021.03.014>
- Kowalska, G. 2021. The safety assessment of toxic metals in commonly used herbs, spices, tea, and coffee in Poland. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(11). <https://doi.org/10.3390/ijerph18115779>
- Lee, J. G., Hwang, J. Y., Lee, H. E., Choi, J. D., & Kang, G. J. 2020. Comparative analysis of lead content during food processing. *Food Science and Biotechnology*, 29(8), 1063–1069. <https://doi.org/10.1007/s10068-020-00756-0>
- Malec, A., & Borowski, G. 2017. Assessment of Soil Contamination in the Lubelskie Province Based on Monitoring Studies. *Inżynieria Ekologiczna*, 18(5), 135–146. <https://doi.org/10.12912/23920629/76781>
- Martín, M. J., Pablos, F., & González, A. G. 1998. Characterization of green coffee varieties according to their metal content. *Analytica Chimica Acta*, 358(2), 177–183. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(97\)00610-7](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(97)00610-7)
- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI). [en línea]. Commodities Café ene-mar 2024. Dirección URL: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/4922530/Commodities_Café%3A_ene-mar_2023.pdf?v=1690861297>. [Consulta: 06 may. 2024]
- Organización internacional del Café (OIC). [en línea]. Afiliación a la organización internacional del café. Dirección URL: <https://www.ico.org/ico_meetings.asp?section=Meetings_and_Documents>. [Consulta: 06 de may. 2024]
- Organización Internacional del Café (OIC). [en línea]. ICO April Report. Dirección URL: <<https://www.icocoffee.org/documents/cy2023-24/cmr-0424-e.pdf>>. [Consulta: 06 may. 2024]
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y Organización Mundial de la Salud (FAO/OMS). [en línea]. Análisis de riesgos de inocuidad de los alimentos, manual general y marco. 2005. Dirección URL: <https://www.fsc.go.jp/sonota/foodsafety_riskanalysis.pdf>. [Consulta: 14 may. 2024]
- Panel de la EFSA sobre contaminantes en la cadena alimentaria (CONTAM); Opinión científica sobre el plomo en los alimentos. *Revista EFSA* 2010; 8 (4):1570. [151 pp.]. doi: 10.2903/j.efsa.2010.1570
- Pigozzi, M. T., Passos, F. R., & Mendes, F. Q. 2018. Quality of Commercial Coffees: Heavy Metal and Ash Contents. *Journal of Food Quality*. <https://doi.org/10.1155/2018/5908463>
- Quintanilla, P., Doménech, E., Escriche, I., Carmen Beltrán, M., & Pilar Molina, M. 2019. Food safety margin assessment of antibiotics: Pasteurized goat's milk and fresh cheese. *Journal of Food Protection*, 82(9), 1553–1559. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-18-434>

- Rahimi, A., Talebi-Ghane, E., Heshmati, A., Ranjbar, A., & Mehri, F. 2023. Content of potentially toxic elements (PTEs) in coffee and coffee-based products: a meta-analysis study, Systematic review, and health risk assessment. *Drug and Chemical Toxicology*, 47(3), 356–364. <https://doi.org/10.1080/01480545.2023.2193354>
- Roychowdhury, T., Tokunaga, H., & Ando, M. 2003. Survey of arsenic and other heavy metals in food composites and drinking water and estimation of dietary intake by the villagers from an arsenic-affected area of West Bengal, India. *Science of the Total Environment*, 308(1–3), 15–35. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(02\)00612-5](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00612-5)
- Sabrina, A. da S., Fabrícia, Q. M., Marcelo, R. R., Flavia, R. P., Andre, M. X. de C., Katia, R. de O. R., & Frederico, G. P. 2017. Determination of heavy metals in the roasted and ground coffee beans and brew. *African Journal of Agricultural Research*, 12(4), 221–228. <https://doi.org/10.5897/ajar2016.11832>
- Santato, A., Bertoldi, D., Perini, M., Camin, F., & Larcher, R. 2012. Using elemental profiles and stable isotopes to trace the origin of green coffee beans on the global market. *Journal of Mass Spectrometry*, 47(9), 1132–1140. <https://doi.org/10.1002/jms.3018>
- Schmidt, C. A. P., Miglioranza, É., Nagashima, G., & Grecco, F. 2009. Concentrações de metais pesados em grãos de café produzidos em lavouras sobre solos originados do basalto e do arenito Caiuá. *Ciencia Rural*, 39(5), 1590–1593. <https://doi.org/10.1590/s0103-84782009005000100>
- Şemen, S., Mercan, S., Yayla, M., & Açıkkol, M. (2017). Elemental composition of green coffee and its contribution to dietary intake. *Food Chemistry*, 215, 92–100. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.07.176>
- Taghizadeh, S. F., Azizi, M., Hassanpourfard, G., Rezaee, R., & Karimi, G. 2023. Assessment of Carcinogenic and Non-carcinogenic Risk of Exposure to Metals via Consumption of Coffee, Tea, and Herbal Tea in Iranians. *Biological Trace Element Research*, 201(3), 1520–1537. <https://doi.org/10.1007/s12011-022-03239-x>
- Tripathy, V., Basak, B. B., Varghese, T. S., & Saha, A. 2015. Residues and contaminants in medicinal herbs - A review. *Phytochemistry Letters*, 14, 67–78. <https://doi.org/10.1016/j.phytol.2015.09.003>
- Vezzulli, F., Fontanella, M. C., Lambri, M., & Beone, G. M. 2023. Specialty and high-quality coffee: discrimination through elemental characterization via ICP-OES, ICP-MS, and ICP-MS/MS of origin, species, and variety. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103(9), 4303–4316. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12490>
- Wasserman, M. A. M. 2005. Soil-to-plant transfer of ¹³⁷Cs related to its geochemical partitioning in Oxisols of tropical areas. *Environmental Geochemistry in the Tropics*, 17–28. <https://doi.org/10.1007/bfb0010903>
- Winiarska-Mieczan, A., Kwiatkowska, K., Kwiecień, M., & Zaricka, E. 2021. Assessment of the risk of exposure to cadmium and lead as a result of the consumption of coffee infusions. *Biological Trace Element Research*, 199(6), 2420–2428. <https://doi.org/10.1007/s12011-020-02332-3>

ANEXO

TABLA 1. Valores de la Concentración, media, desviación estándar y percentiles y modelo probabilístico para el iAs y Pb

Metal	Modelo	Región	Año	Métrica	Media	Desviación Estándar	5%	95%	
As	Guadalupe et al., 2023	Amazonas	2021	Concentración	2,14E-02	9,17E-03	7,05E-03	3,72E-02	
		Amazonas	2024	Concentración	3,37E-02	8,92E-03	2,40E-02	4,61E-02	
		San Martín	2021	Concentración	3,48E-02	1,03E-02	2,13E-02	5,01E-02	
		San Martín	2024	Concentración	4,56E-02	1,19E-02	3,37E-02	6,09E-02	
		Amazonas	2021	Concentración	4,09E-01	1,46E-01	1,66E-01	6,59E-01	
		Amazonas	2024	Concentración	6,44E-01	6,54E-02	5,47E-01	7,62E-01	
		San Martín	2021	Concentración	6,65E-01	1,17E-01	4,80E-01	8,55E-01	
		San Martín	2024	Concentración	8,72E-01	6,69E-02	7,77E-01	9,92E-01	
	Semen et al., 2017	Amazonas	2021	Concentración	3,35E-01	1,19E-01	1,37E-01	5,47E-01	
		Amazonas	2024	Concentración	5,28E-01	5,29E-02	4,44E-01	6,19E-01	
		San Martín	2021	Concentración	5,45E-01	9,80E-02	3,88E-01	7,07E-01	
		San Martín	2024	Concentración	7,15E-01	5,37E-02	6,39E-01	8,11E-01	
		Amazonas	2021	Concentración	4,09E-01	1,45E-01	1,68E-01	6,66E-01	
		Amazonas	2024	Concentración	6,44E-01	6,46E-02	5,42E-01	7,55E-01	
		San Martín	2021	Concentración	6,65E-01	1,20E-01	4,73E-01	8,63E-01	
		San Martín	2024	Concentración	8,72E-01	6,55E-02	7,80E-01	9,89E-01	
	Pb	Adler et al. 2019	Amazonas	2021	Concentración	1,85E-02	1,57E-03	1,61E-02	2,11E-02
			Amazonas	2024	Concentración	1,92E-02	1,47E-03	1,69E-02	2,16E-02
			San Martín	2021	Concentración	2,06E-02	1,88E-03	1,72E-02	2,34E-02
			San Martín	2024	Concentración	2,09E-02	1,92E-03	1,79E-02	2,44E-02
			Amazonas	2021	Concentración	3,07E-01	2,60E-02	2,68E-01	3,51E-01
			Amazonas	2024	Concentración	3,18E-01	2,44E-02	2,81E-01	3,59E-01
			San Martín	2021	Concentración	3,42E-01	3,13E-02	2,86E-01	3,89E-01
			San Martín	2024	Concentración	3,48E-01	3,19E-02	2,98E-01	4,06E-01
Khunlert et al., 2021		Amazonas	2021	Concentración	7,86E-03	6,93E-04	6,76E-03	9,07E-03	
		Amazonas	2024	Concentración	8,15E-03	6,29E-04	7,20E-03	9,20E-03	
		San Martín	2021	Concentración	8,74E-03	7,81E-04	7,41E-03	1,00E-02	
		San Martín	2024	Concentración	8,90E-03	8,11E-04	7,57E-03	1,03E-02	
		Amazonas	2021	Concentración	3,07E-01	2,71E-02	2,64E-01	3,54E-01	
		Amazonas	2024	Concentración	3,18E-01	2,46E-02	2,81E-01	3,59E-01	
		San Martín	2021	Concentración	3,42E-01	3,05E-02	2,89E-01	3,92E-01	
		San Martín	2024	Concentración	3,48E-01	3,17E-02	2,96E-01	4,03E-01	
Guadalupe et al., 2023		Amazonas	2021	Concentración	2,14E-02	2,01E-03	1,81E-02	2,48E-02	
		Amazonas	2024	Concentración	2,21E-02	1,93E-03	1,92E-02	2,55E-02	
		San Martín	2021	Concentración	2,38E-02	2,42E-03	1,98E-02	2,78E-02	
		San Martín	2024	Concentración	2,42E-02	2,54E-03	2,02E-02	2,87E-02	
		Amazonas	2021	Concentración	3,07E-01	2,57E-02	2,67E-01	3,47E-01	
		Amazonas	2024	Concentración	3,18E-01	2,38E-02	2,83E-01	3,59E-01	
		San Martín	2021	Concentración	3,42E-01	3,15E-02	2,89E-01	3,93E-01	
		San Martín	2024	Concentración	3,48E-01	3,33E-02	2,94E-01	4,06E-01	
Semen et al., 2017		Amazonas	2021	Concentración	1,14E-01	9,65E-03	9,83E-02	1,29E-01	
		Amazonas	2024	Concentración	1,18E-01	8,85E-03	1,04E-01	1,33E-01	
		San Martín	2021	Concentración	1,26E-01	1,18E-02	1,07E-01	1,46E-01	
		San Martín	2024	Concentración	1,29E-01	1,20E-02	1,09E-01	1,50E-01	
		Amazonas	2021	Concentración	3,07E-01	2,61E-02	2,66E-01	3,49E-01	
		Amazonas	2024	Concentración	3,18E-01	2,39E-02	2,82E-01	3,59E-01	
		San Martín	2021	Concentración	3,42E-01	3,19E-02	2,88E-01	3,93E-01	
		San Martín	2024	Concentración	3,48E-01	3,24E-02	2,94E-01	4,04E-01	
Winiarska-Mieczan et al., 2021		Amazonas	2021	Concentración	2,48E-01	2,13E-02	2,14E-01	2,83E-01	
		Amazonas	2024	Concentración	2,57E-01	1,96E-02	2,26E-01	2,91E-01	
		San Martín	2021	Concentración	2,76E-01	2,61E-02	2,33E-01	3,19E-01	
		San Martín	2024	Concentración	2,81E-01	2,63E-02	2,40E-01	3,28E-01	
		Amazonas	2021	Concentración	3,07E-01	2,64E-02	2,65E-01	3,50E-01	
		Amazonas	2024	Concentración	3,18E-01	2,42E-02	2,80E-01	3,61E-01	
		San Martín	2021	Concentración	3,42E-01	3,23E-02	2,89E-01	3,94E-01	
		San Martín	2024	Concentración	3,48E-01	3,26E-02	2,97E-01	4,05E-01	

TABLA 2. Valores de la Ingesta Diaria Estimada, media, desviación estándar y percentiles y modelo probabilístico para el iAs y Pb

Metal	Modelo	Región	Año	Métrica	Media	Desviación Estándar	5%	95%
iAs	Guadalupe et al., 2023	Amazonas	2021	EDI	4,79E-05	5,61E-05	5,29E-06	1,50E-04
		Amazonas	2024	EDI	7,53E-05	8,21E-05	1,11E-05	2,25E-04
		San Martin	2021	EDI	7,73E-05	8,45E-05	1,16E-05	2,38E-04
		San Martin	2024	EDI	1,02E-04	1,10E-04	1,52E-05	3,10E-04
	Semen et al., 2017	Amazonas	2021	EDI	7,57E-04	9,73E-04	9,05E-05	2,25E-03
		Amazonas	2024	EDI	1,18E-03	1,28E-03	1,95E-04	3,46E-03
		San Martin	2021	EDI	1,22E-03	1,39E-03	1,92E-04	3,47E-03
		San Martin	2024	EDI	1,60E-03	1,75E-03	2,61E-04	4,81E-03
Pb	Guadalupe et al., 2023	Amazonas	2021	EDI	4,78E-05	5,03E-05	7,60E-06	1,47E-04
		Amazonas	2024	EDI	4,96E-05	5,19E-05	7,90E-06	1,52E-04
		San Martin	2021	EDI	5,33E-05	5,62E-05	8,27E-06	1,59E-04
		San Martin	2024	EDI	5,43E-05	5,77E-05	8,27E-06	1,62E-04
	Adler et al., 2019	Amazonas	2021	EDI	4,12E-05	4,39E-05	6,87E-06	1,22E-04
		Amazonas	2021	EDI	4,27E-05	4,52E-05	7,06E-06	1,21E-04
		San Martin	2024	EDI	4,58E-05	4,85E-05	7,39E-06	1,34E-04
		San Martin	2024	EDI	4,66E-05	4,88E-05	7,65E-06	1,34E-04
	Winiarska-Mieczan et al., 2021	Amazonas	2021	EDI	5,55E-04	5,87E-04	9,36E-05	1,59E-03
		Amazonas	2021	EDI	5,76E-04	6,15E-04	9,34E-05	1,66E-03
		San Martin	2024	EDI	6,16E-04	6,47E-04	9,94E-05	1,74E-03
		San Martin	2024	EDI	6,28E-04	6,59E-04	1,03E-04	1,76E-03
	Khunlert et al., 2021	Amazonas	2021	EDI	1,75E-05	1,84E-05	2,94E-06	5,04E-05
		Amazonas	2021	EDI	1,80E-05	1,87E-05	3,03E-06	5,06E-05
		San Martin	2024	EDI	1,94E-05	2,02E-05	3,23E-06	5,53E-05
		San Martin	2024	EDI	1,97E-05	2,04E-05	3,28E-06	5,75E-05
	Semen et al., 2017	Amazonas	2021	EDI	2,54E-04	2,71E-04	4,15E-05	7,20E-04
		Amazonas	2024	EDI	2,63E-04	2,79E-04	4,24E-05	7,80E-04
		San Martin	2021	EDI	2,83E-04	3,10E-04	4,49E-05	8,17E-04
		San Martin	2024	EDI	2,87E-04	3,02E-04	4,54E-05	8,39E-04

TABLA 3. Valores del Margen de Exposición, media, desviación estándar y percentiles y modelo probabilístico para el iAs y Pb

Metal	Modelo	Región	Año	Métrica	Media	Desviación Estándar	5%	95%
iAs	Semen et al., 2017	Amazonas	2021	MOE	1,50E+01	2,79E+01	8,08E-01	4,92E+01
		Amazonas	2021	MOE	7,65E+00	1,22E+01	4,98E-01	2,47E+01
		San Martin	2024	MOE	7,55E+00	1,22E+01	5,06E-01	2,37E+01
		San Martin	2024	MOE	5,63E+00	9,17E+00	3,92E-01	1,74E+01
Pb	Guadalupe et al., 2023	Amazonas	2021	MOE01	6,76E+01	6,95E+01	1,02E+01	1,95E+02
		Amazonas	2021	MOE01	6,54E+01	6,86E+01	9,81E+00	1,89E+02
		Amazonas	2024	MOE01	6,11E+01	6,35E+01	9,39E+00	1,81E+02
		Amazonas	2024	MOE01	5,98E+01	6,13E+01	9,14E+00	1,80E+02
		San Martin	2021	MOE10	2,84E+01	2,92E+01	4,27E+00	8,21E+01
		San Martin	2021	MOE10	2,75E+01	2,88E+01	4,12E+00	7,93E+01
		San Martin	2024	MOE10	2,57E+01	2,67E+01	3,95E+00	7,61E+01
		San Martin	2024	MOE10	2,51E+01	2,58E+01	3,84E+00	7,58E+01
	Adler et al., 2019	Amazonas	2021	MOE01	7,78E+01	8,09E+01	1,22E+01	2,18E+02
		Amazonas	2021	MOE01	7,51E+01	7,76E+01	1,21E+01	2,11E+02
		San Martin	2024	MOE01	7,02E+01	7,39E+01	1,11E+01	2,02E+02
		San Martin	2024	MOE01	6,91E+01	7,23E+01	1,09E+01	1,95E+02
		Amazonas	2021	MOE10	3,27E+01	3,40E+01	5,14E+00	9,15E+01
		Amazonas	2021	MOE10	3,15E+01	3,26E+01	5,07E+00	8,87E+01
		San Martin	2024	MOE10	2,95E+01	3,10E+01	4,68E+00	8,48E+01
		San Martin	2024	MOE10	2,90E+01	3,04E+01	4,58E+00	8,19E+01
	Winiarska-Mieczan et al., 2021	Amazonas	2021	MOE01	5,84E+00	6,50E+00	9,42E-01	1,59E+01
		Amazonas	2021	MOE01	5,63E+00	6,19E+00	9,02E-01	1,60E+01
		San Martin	2024	MOE01	5,26E+00	5,89E+00	8,59E-01	1,47E+01
		San Martin	2024	MOE01	5,17E+00	5,63E+00	8,50E-01	1,46E+01
		Amazonas	2021	MOE10	2,45E+00	2,73E+00	3,96E-01	6,67E+00
		Amazonas	2021	MOE10	2,36E+00	2,60E+00	3,79E-01	6,72E+00
		San Martin	2024	MOE10	2,21E+00	2,47E+00	3,61E-01	6,19E+00
		San Martin	2024	MOE10	2,17E+00	2,36E+00	3,57E-01	6,11E+00
	Khunlert et al., 2021	Amazonas	2021	MOE01	1,82E+02	1,82E+02	2,97E+01	5,03E+02
		Amazonas	2021	MOE01	1,75E+02	1,75E+02	2,93E+01	4,94E+02
		San Martin	2024	MOE01	1,64E+02	1,68E+02	2,70E+01	4,61E+02
		San Martin	2024	MOE01	1,61E+02	1,65E+02	2,59E+01	4,54E+02
Amazonas		2021	MOE10	7,62E+01	7,66E+01	1,25E+01	2,11E+02	
Amazonas		2021	MOE10	7,33E+01	7,37E+01	1,23E+01	2,08E+02	
San Martin		2024	MOE10	6,88E+01	7,06E+01	1,13E+01	1,94E+02	
San Martin		2024	MOE10	6,76E+01	6,91E+01	1,09E+01	1,91E+02	
Semen et al., 2017	Amazonas	2021	MOE01	1,31E+01	1,97E+01	2,06E+00	3,60E+01	
	Amazonas	2021	MOE01	1,26E+01	1,90E+01	1,92E+00	3,52E+01	
	San Martin	2024	MOE01	1,17E+01	1,61E+01	1,82E+00	3,32E+01	
	San Martin	2024	MOE01	1,15E+01	1,66E+01	1,76E+00	3,30E+01	
	Amazonas	2021	MOE10	5,49E+00	8,27E+00	8,63E-01	1,51E+01	
	Amazonas	2021	MOE10	5,29E+00	7,98E+00	8,06E-01	1,48E+01	
	San Martin	2024	MOE10	4,91E+00	6,78E+00	7,65E-01	1,39E+01	
	San Martin	2024	MOE10	4,83E+00	6,97E+00	7,40E-01	1,39E+01	