



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ciencias Ambientales
Ingeniería Ambiental



ANTECEDENTES TÉCNICOS Y CIENTÍFICOS PARA LA FUTURA IMPLEMENTACIÓN DE UNA NORMA PRIMARIA DE CALIDAD DEL AIRE PARA EL ARSÉNICO EN CHILE.

Habilitación presentada para optar al título de

Ingeniera Ambiental

LAURA ROSA ARAVENA ZAPATA

Profesores Guía
Dra. Claudia Ulloa Tesser
Dr. Ricardo Barra Ríos

CONCEPCIÓN, Chile
2022

“ANTECEDES TÉCNICOS Y CIENTÍFICOS PARA LA FUTURA IMPLEMENTACIÓN DE UNA NORMA PRIMARIO DE CALIDAD DEL AIRE PARA EL ARSÉNICO EN CHILE”

Profesor Guía: Dra. Claudia Ulloa Tesser



Profesor Co-Guía: Dr. Ricardo Barra Ríos



Profesor Comisión: Dr. Mauricio Aguayo Arias



CONCEPTO: APROBADO CON DISTINCIÓN MÁXIMA

Conceptos que se indica en el Título

- ✓ Aprobado por Unanimidad : (En Escala de 4,0 a 4,9)
- ✓ Aprobado con Distinción (En Escala de 5,0 a 5,6)
- ✓ Aprobado con Distinción Máxima (En Escala de 5,7 a 7,0)

Concepción, enero 2022

Agradecimientos:

Quiero agradecer a mi mamá, tía y primos por su apoyo, los cuales fueron un pilar fundamental en mi paso por la universidad. Sus enseñanzas y consejos hicieron mi camino menos duro durante esta época.

También a mis amigas por aportarme siempre su conocimiento y ayuda incondicional en cada momento difícil; siempre las tendré en mi corazón, ya que son personas maravillosas y entusiastas que alegraron cada uno de mis días.

Agradezco a los profesores y trabajadores del EULA por sus palabras de aliento y conocimiento que me brindaron, por creer en mí y ayudarme a desarrollar como profesional.

Les deseo a cada uno que Dios los bendiga siempre.



Índice general

Resumen	v
1. Introducción	1
1.1. Pregunta de investigación	4
1.1.1. Objetivo general	4
1.1.2. Objetivos específicos.....	4
2. Antecedentes.....	5
2.1. Propiedades físicas y químicas.....	5
2.2. Fuentes de emisión y niveles ambientales.....	6
2.2.1. Fuentes naturales	6
2.2.2. Fuentes antropogénicas en Chile.....	6
2.2.3. Niveles ambientales de arsénico en el aire.....	10
3. Efectos en los seres humanos y en el ambiente	15
3.1. Ecotoxicidad.....	23
3.2. Persistencia.....	23
3.3. Investigaciones a nivel nacional.....	24
4. Metodología.....	26
5. Resultados.....	28
5.1. Objetivos y directrices de calidad del aire para el arsénico	28
5.2. Explicación de métodos	29
5.2.1. Enfoque 1: Límite de exposición ocupacional (OEL)	29
5.2.2. Enfoque 2: Evaluaciones cuantitativas del riesgo de cáncer	31
6. Directrices o normativas vigentes	35
6.1. Estados Unidos (Regulación Federal U.S. EPA).....	35
6.2. Agencias internacionales	36
6.3. Países Latinoamericanos.....	37
7. Métodos de muestreo y análisis del aire	39
7.1. Métodos NIOSH 7302 y 7306	39
7.2. Métodos de Muestreo	40
7.2.1. Muestreador de alto volumen.....	40
7.2.2. Muestreador dicotómico.....	41
7.2.3. Muestreador Partisol.....	41
7.3. Métodos analíticos	42
7.3.1. Plasma acoplado inductivamente/Espectroscopia Masa (ICP/MS)	42

7.3.2.	Espectroscopia de absorción atómica (AAS)	42
7.3.3.	Espectroscopia de fluorescencia de rayos X (XRF)	43
8.	Proyectos realizados en Chile.....	43
8.1.	Fondef: “Protección de la competitividad de los productos mineros de Chile: Antecedentes y criterios para la regulación ambiental del arsénico”.....	43
8.2.	Análisis costo beneficio.....	45
9.	Enfoques más adecuados a implementar en Chile	49
10.	Conclusiones.....	51
11.	Referencias	52
12.	Anexo.....	60

Índice de tablas

Tabla 1:	Estado de cumplimiento del límite máximo de emisión de arsénico (As) para el año 2019.....	9
Tabla 2:	Concentraciones medias de arsénico en el PM10 (ng/m ³)	12
Tabla 3:	Niveles de exposición significativos de arsénico inorgánico en el aire – Estudios en animales	21
Tabla 4:	Niveles de exposición significativos de arsénico inorgánico en el aire – Investigaciones en humanos.....	22
Tabla 5:	Estudios en Chile sobre el arsénico.....	25
Tabla 6:	Estimaciones del riesgo unitario ambiental para la US EPA (µg/m ³).....	33
Tabla 7:	Valores propuestos para los ECA sobre el arsénico.	37
Tabla 8:	Resumen de los objetivos y directrices de calidad del aire ambiente para el arsénico.	38
Tabla 9:	Incertidumbre en los niveles base natural para las zonas afectadas.....	45
Tabla 10:	Explicación del esquema de análisis riesgo - costo	47
Tabla 11:	Costos por muerte evitada para distintos valores de norma de calidad.....	48
Tabla 12:	Posibles valores a normar respecto a efectos cancerígenos y no cancerígenos.	49
Tabla 13:	Concentraciones de arsénico en el aire, principales zonas impactadas.....	50
Tabla 14:	Resumen de normativas internacionales (parte I)	60
Tabla 15:	Resumen de normativas internacionales (parte II)	61
Tabla 16:	Resumen de normativas internacionales (parte III)	62
Tabla 17:	Resumen normativas latinoamericanas	63

Índice de figuras

Figura 1: Emisiones de arsénico 2018 según rubro RETC.....	7
Figura 2: Emisiones de arsénico por región	8
Figura 3: Estaciones de PM10 en siete localidades rurales.....	12
Figura 4: Concentración promedio anual de arsénico para cada fundición (2017).....	14
Figura 5: Resumen Metodológico para cada objetivo específico.....	27
Figura 6: Enfoque de EHP.....	30
Figura 7: Cálculo de límites de aire ambiental (AAL).....	30
Figura 8: Relación lineal curva dosis respuesta	32
Figura 9: Ecuación de riesgo de cáncer	34
Figura 10: Cálculo de la concentración de arsénico, usando la unidad de riesgo de la OMS	34
Figura 11: Forma esquemática de las distintas etapas del análisis riesgo – costo	46



LISTADO DE ABREVIATURAS

Cal OEHHA	Oficina de Evaluación de Peligros para la Salud Ambiental de California (por sus siglas en inglés Cal OEHHA).
US EPA	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (por sus siglas en inglés US EPA).
IRIS	Sistema Integrado de Información sobre Riesgos.
WHO	Organización Mundial de la Salud (por sus siglas en inglés WHO).
CCOHS	Centro Canadiense de Salud y Seguridad Ocupacional (por sus siglas en inglés CCOHS).
ATSDR	Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (por sus siglas en inglés ATSDR).
DL50	Dosis letal 50, muerte del 50% de los expuestos.
CL50	Concentración letal 50, muerte del 50% de los expuestos.
LOAEL	Nivel más bajo con efectos adversos observados (por sus siglas en inglés LOAEL).
NOAEL	Nivel sin efecto adverso observado (por sus siglas en inglés NOAEL).
IARC	Agencia Internacional para la investigación del cáncer (por sus siglas en inglés IARC).
ACGIH	Conferencia Americana de Higienistas Industriales Gubernamentales (por sus siglas en inglés ACGIH).
ECHA	European Chemicals Agency (por sus siglas en inglés ECHA)

Resumen

El arsénico (As) en la actualidad se ha convertido en un problema recurrente en todo el mundo, ya que se puede encontrar de distintas formas en el ambiente, produciendo un daño a la salud el aumento de las concentraciones de este elemento y sus diferentes especies químicas. Chile se caracteriza por la exposición histórica a altos niveles de arsénico, sobre todo en la zona norte del país tanto de forma natural, como antropogenicamente (Industrias mineras, fundiciones de cobre), donde la población se ha visto afectada por gran variedad de afecciones, como: Cáncer de pulmón, Infartos, enfermedades respiratorias, lesiones cutáneas, entre otras.

Producto de su incidencia, el Ministerio de Salud ha solicitado al Ministerio del Medio Ambiente dar inicio al proceso de elaboración de una Norma Primaria de Calidad del Aire para Arsénico. Por lo tanto, el objetivo principal de este informe es proporcionar información científica y técnica básica para ayudar a evaluar la base y los antecedentes para la futura implementación de la norma de calidad del aire ambiente para el arsénico en Chile.

A través de los datos proporcionados por las fundiciones de cobre en Chile, se observaron altas concentraciones de As en el aire para el año 2017, del orden de 11-148 ng/m³, con un exceso en la comuna de Caletones (148 ng/m³) superando el valor límite de 6 ng/m³ de la Organización Mundial de la Salud (OMS). Por ende, se propone que, para determinar una normativa sobre el As, se debería usar un enfoque más ligado a las estimaciones cuantitativas del riesgo cancerígeno, en vez de un Límite de Exposición Ocupacional (OEL), producto de que el arsénico ha sido reconocido como una sustancia carcinógena comprobada en el ser humano, tanto por la Agencia Internacional para la investigación del cáncer (IARC), como por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA).

Llegando a la conclusión, de que un valor de 6 ng/m³ (OMS) sería apropiado para la normativa chilena, producto de que varios países (India, China, Unión Europea, Reino Unido) lo implementaron en su jurisdicción, entre ellos países con altos niveles de As (India, China), además que el valor se considera representativo de un riesgo mínimo para la salud humana. Asimismo, se recomienda hacer estudios sobre el nivel base natural que existe actualmente, ya que, si es mayor a 6 ng/m³, no sería apropiado el

valor de la OMS, pues la concentración resultante (límite propuesto) de As es la suma de este nivel base y el aporte respectivo de cada fuente.

1. Introducción

A lo largo de la historia, la salud del ser humano se ha visto afectada por las grandes emisiones de contaminantes atmosféricos generados de forma antrópica, cuyas partículas al ser de tamaño tan pequeño (micrómetro) penetran fácilmente al sistema respiratorio, provocando distinto tipo de enfermedades que pueden ser tan leves como una rinitis hasta graves como el cáncer (Valdez, 2016).

El arsénico (As) es un elemento químico que puede estar de forma natural en la superficie de las rocas, asociado a los minerales que contienen metales como el cobre y plomo, disipándose en el medio ambiente durante la extracción y fundición de estos minerales (ATSDR, 2007).

La ingestión o inhalación del arsénico es altamente dañina, provocando al organismo enfermedades cardiovasculares, neurológicas, a la piel y distintos tipos de cánceres, dependiendo de la dosis o el tiempo de exposición (Rahaman et al., 2021; Zhang et al., 2020; Singh et al., 2015; Duan y Tan, 2013). Asimismo, la Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer (IARC) lo clasifica dentro de las sustancias cancerígenas comprobadas (Grupo 1) por poseer evidencia suficiente de su carcinogenicidad en humanos. Del mismo modo, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA) lo categoriza dentro de los carcinógenos humanos (Grupo A), esta categorización tiene base en estudios donde la exposición por inhalación provocó un alza en la mortalidad por cáncer al pulmón en varias poblaciones (EPA, 2017; WHO, 2010; Cortes et al., 2004). Debido a esta problemática, se han desarrollado numerosas normativas y directrices alrededor del mundo para el arsénico en el aire, la mayoría determinadas a través de estimaciones cuantitativas del riesgo cancerígeno, usando las evaluaciones de riesgo de cáncer preexistentes realizadas por otros organismos como la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA), Agencia de Protección Ambiental de California (Cal. EPA) y la Organización Mundial de la Salud (OMS). Otras agencias utilizan como medida el límite de exposición ocupacional (OEL), el cual fue desarrollado por la Conferencia Americana de Higienistas Industriales Gubernamentales (ACGIH) y por el Instituto Nacional de Seguridad y Salud

Ocupacional (NIOSH) en los Estados Unidos (Meridian Environmental Inc, 2011). Utilizando los factores de seguridad o de ajuste para su cálculo.

En el caso de Chile, el arsénico ha sido un problema continuo, sobre todo en el norte del país, ya que esta zona posee elevados niveles naturales de arsénico, afectando el agua, el suelo y el aire (Silva et al., 2010). Un ejemplo claro de lo anterior fue lo ocurrido en los años (1958–1970) en la ciudad de Antofagasta, donde la población ingería diariamente a través del agua alrededor de 870 ug/L de arsénico, medida que sobrepasa largamente el actual límite de la OMS (10 ug/L). Posteriormente, se instaló una planta de tratamiento para abatir el arsénico solucionando la problemática. Aun así, lo ocurrido dejó graves consecuencias, aumentando el riesgo de cáncer de pulmón 3 veces más a diferencia de una zona libre de contaminación, extendiéndose el riesgo por más de 20 años (Castillo y Venegas, 2010; Icaza et al., 2007). A esto se suma las fundiciones de cobre, que históricamente han presentado en su entorno altos niveles de As en el aire, con concentraciones que superan el máximo recomendado por la OMS de 6 ng/m³, no sólo en el norte de Chile, sino también en la región de O'Higgins y Valparaíso acrecentando el problema para la salud de las personas y el medio ambiente (Resolución Exenta N°1136/2020; Fundación Terram, 2018; CONAMA, 2009). Si bien existe una Norma de Emisión Para Fundiciones de Cobre y Fuentes Emisoras de Arsénico (D.S. N° 28, del Ministerio del Medio Ambiente) la cual disminuye las emisiones, esta no asegura a las personas de que el aire que respiran es seguro para su salud. Por lo tanto, ha existido una preocupación continua por parte del gobierno y la población en general entorno a este tema.

En el año 1994 se elaboró la Norma Primaria de Calidad del Aire para el Arsénico (D.S. N°477, del Ministerio de Salud), con niveles máximos de 0,1 µg/m³ para el promedio de 24 horas y 0,05 µg/m³ para el promedio anual, la cual al cabo de tres meses fue derogada (D.S. N' 1.364 de 1994, del Ministerio de Salud), producto de que la normativa fue promulgada antes de la Ley N'19.300 (Bases Generales del Medio Ambiente) y no se ajustaba al procedimiento específico para la dictación de normas Primarias y Secundarias de Calidad Ambiental (Resolución Exenta N°1136/2020).

Posteriormente en el año 1999, se estableció la norma de emisión para la regulación del contaminante arsénico emitido al aire (D.S. N° 165, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia), la cual se aplica a nivel nacional a todas las fundiciones de cobre. La normativa está basada en los antecedentes del Ministerio de Salud y el proyecto FONDEF que lleva como título: "Protección de la competitividad de los productos mineros de Chile: Antecedentes y criterios para la regulación ambiental del arsénico" realizado por la Universidad de Chile, este último analizó si era prudente instaurar una norma de emisión o norma de calidad, llegando a la conclusión de que sería complejo calcular un valor límite en el caso de una norma de calidad, además del tiempo que se necesita para su implementación, ya que son varios años entre la dictación de una normativa primaria de calidad ambiental, la declaración de un distrito como latente y/o saturado y la dictación de un plan de prevención y/o descontaminación. A diferencia de una norma de emisión, considerada más sencilla de implementar, debido a que el arsénico tiene la característica de ser emitido por fuentes específicas, al contrario de otros contaminantes. Haciendo que este se pueda regular directamente en determinadas fuentes emisoras (en especial las fundiciones). Asimismo, se considera que es un instrumento importante dentro de los planes de descontaminación, ya que al fijar los límites de emisión se logra directamente el beneficio.

El D.S. N°165, de 1999, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia, establece en primera instancia límites de emisión máxicos para diferentes zonas, más tarde en el 2008, se modifica incorporando la obligación de medir el arsénico en las redes de calidad del aire cercanas a las fundiciones de cobre (D.S. N°75, de 2008, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia). Actualizándose en el 2013, donde se establece la "Norma de Emisión para Fundiciones de Cobre y Fuentes Emisoras de Arsénico" (D.S. N°28, de 2013, del Ministerio del Medio Ambiente), cuyo plazo máximo de incorporación fue de 5 años para las fundiciones de cobre y fuentes emisoras de arsénico, plazo que se cumplió en diciembre del año 2018, cuyo estado de cumplimiento fue solicitado por el Ministerio del Medio Ambiente en julio del 2020 (Of. Ord N° 202969, del 30 de julio de 2020, del Ministerio del Medio Ambiente) donde el periodo a analizar fue del año 2019 ya que cuenta con un periodo de datos completos. Así finalmente, en agosto del 2020 (Of. Ord. N° 3.450, de 21 de agosto de 2020, del Ministerio de Salud) se solicita al Ministerio del Medio Ambiente dar inicio al

proceso de elaboración de una Norma Primaria de Calidad del Aire para Arsénico, ya que a pesar de que ha disminuido el contenido de este contaminante, producto de la implementación de la norma de emisión, aún existe evidencia de niveles altos en comparación con referencias internacionales de calidad para el arsénico (Resolución Exenta N°1136/2020).

Por lo tanto, el objetivo principal de este informe es proporcionar información científica y técnica básica para ayudar a evaluar la base y los antecedentes para la futura implementación de la norma de calidad del aire ambiente para el arsénico en Chile. Se examinan distintos aspectos como: fuentes de emisiones antropogénicas existentes, efectos sobre los seres humanos producto del As, directrices sobre el aire ambiente en agencias internacionales, como las bases para su elaboración, además de los monitoreos más usados.

1.1. Pregunta de investigación

¿Cuáles son los antecedentes científicos y técnicos básicos preliminares que deben existir para la futura implementación de una norma primaria de calidad del aire para el arsénico en Chile?

1.1.1. Objetivo general

Establecer antecedentes científicos y técnicos básicos preliminares, para la futura implementación de una norma primaria de calidad del aire para el arsénico en Chile.

1.1.2. Objetivos específicos

- Analizar el estado del arte, respecto a la normativa de calidad del aire para el arsénico en el mundo.
- Seleccionar las normativas con enfoques más adecuados para regular el arsénico en el aire en Chile.

- Proponer los antecedentes científicos y técnicos básicos preliminares, que deberían ser evaluados en el proceso de dictación de la norma primaria de calidad del aire para el arsénico en Chile

2. Antecedentes

2.1. Propiedades físicas y químicas

El arsénico (As) es un elemento químico que tiene como número atómico 33 y cuya masa atómica es de 74,92 g/mol (Valdez, 2016), encontrándolo en varios estados de oxidación: -3, 0, +3 o +5 (Meridian Environmental Inc., 2011), conocido comúnmente por ser un metaloide, debido a sus propiedades que lo llevan a comportarse como metal y no metal (Valdez, 2016). El arsénico puede encontrarse de forma natural en la corteza terrestre, en forma de sulfuros, arseniuros y sulfarsénidos (Valdez, 2016), ocupando el lugar número veinte en abundancia entre los elementos naturales del planeta (Meridian Environmental Inc., 2011; ATDSR, 2007).

Este metaloide es usado en muchos procesos industriales, entre ellos fabricación de vidrio, metalurgia, industria electrónica, industrias alimentarias (conservante), cristalería y algunas aplicaciones médicas. Asimismo, se puede encontrar de distintas formas, como: Trióxido de arsénico, arseniuro de galio, arseniato de cromo, arseniato de cobre, entre otros (Vishwakarma et al., 2021; Meridian Environmental Inc., 2011; ATSDR, 2007; WHO, 2000).

El arsénico en el ambiente se presenta en forma de partículas de arsénico inorgánico (combinación con oxígeno, cloro, azufre) y arsénico orgánico (combinado con carbono, hidrogeno). El inorgánico es una mezcla de formas trivalente (arsenito) y pentavalente (arseniato), siendo esta ultima la que más predomina y es termodinámicamente más estable (MINSAL, 2014; WHO, 2000). Por otro lado, el arsénico orgánico suele estar en productos marinos, siendo mucho menos toxico que el arsénico inorgánico, formando principalmente, compuestos de arsenobetaina y arsenocolina (ISP, 2015).

El arsénico inorgánico al encontrarse en el suelo y rocas de forma natural se asocia a diversos minerales, entre ellos cobre (Cu). Por ejemplo, este al ser extraído para su posterior procesamiento en las fundiciones, la mayor parte del arsénico sale por la chimenea, entrando en contacto con el aire en forma de un polvo fino (ATSDR, 2007).

Para el caso del transporte atmosférico del arsénico, este depende de las condiciones meteorológicas, además de las características de las fuentes industriales que las produzcan (velocidad de salida y altura de chimenea). Todo lo anterior se encuentra íntimamente ligado al tiempo de residencia, el cual varía aproximadamente de 7 a 9 días en el aire. Después de ser emitidos, tanto el arsénico, como las arcinas metálicas pueden intercambiar el estado de oxidación (en función de su potencial redox) formando arseniatos. (MINSAL, 2014; Meridian Environmental Inc, 2011)

2.2. Fuentes de emisión y niveles ambientales

2.2.1. Fuentes naturales

Naturalmente el arsénico se asocia a rocas ígneas y sedimentarias, encontrándose en más de 200 especies minerales, en su forma inorgánica. La meteorización de las rocas produce formación de polvo, el cual es volatilizado por el viento. Actualmente forma un tercio del flujo atmosférico. Asimismo, el arsénico está presente en procesos volcánicos, pulverizaciones de sal marina, volatilización de las metilarsinas del suelo y los incendios forestales (MINSAL, 2014; Meridian Environmental Inc, 2011).

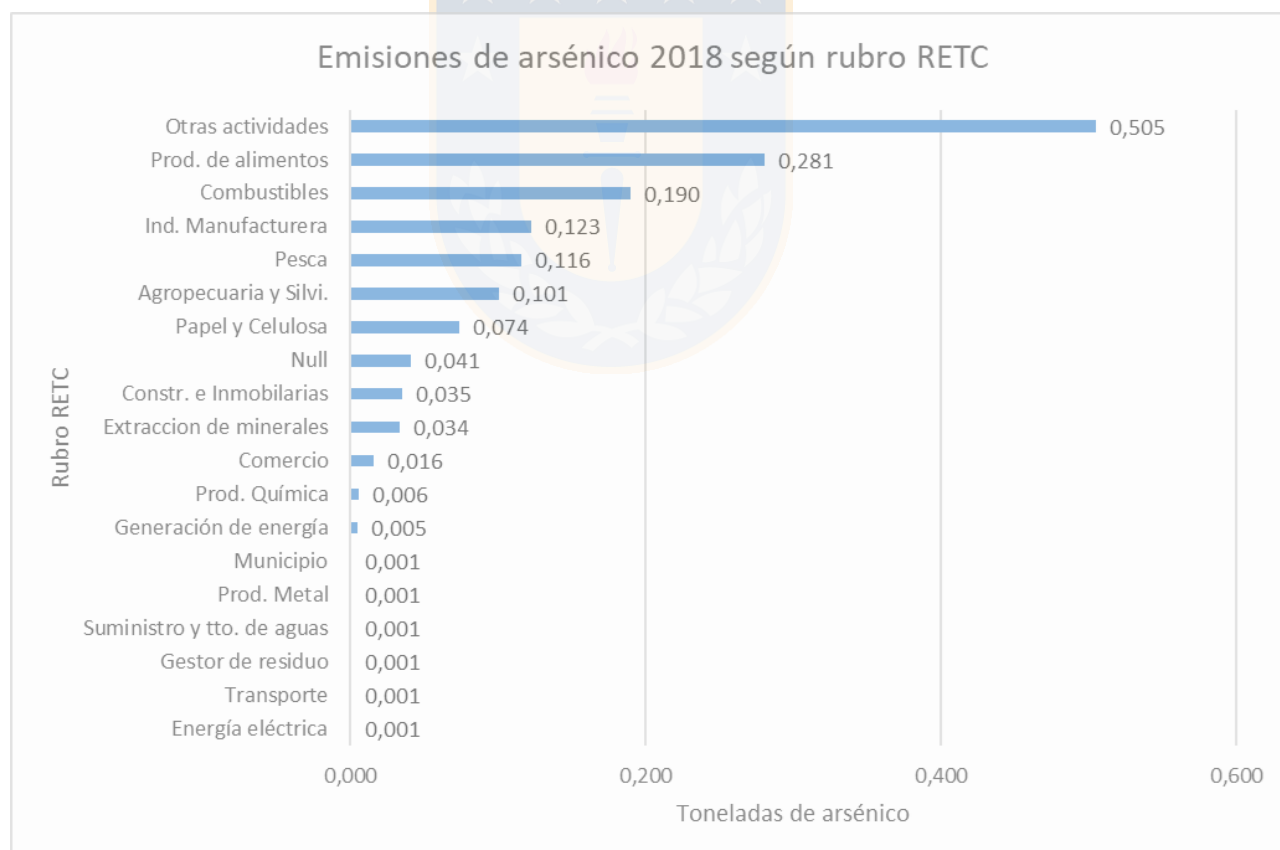
A nivel nacional, este elemento se encuentra mayoritariamente en la zona norte y es de origen geológico, produciendo contaminación en aguas, vegetales, además del aire, lo cual afecta de manera significativa las tasas de mortalidad en la población de esa zona (Sancha, A., 1997).

2.2.2. Fuentes antropogénicas en Chile

La mayor parte de arsénico, que se encuentra en el aire es debido a las actividades antropogénicas, como la: Fundición de metales, usos de pesticidas, conservantes de

madera y en menor medida la combustión (lignito de baja calidad). (Valdez, 2016; WHO, 2010).

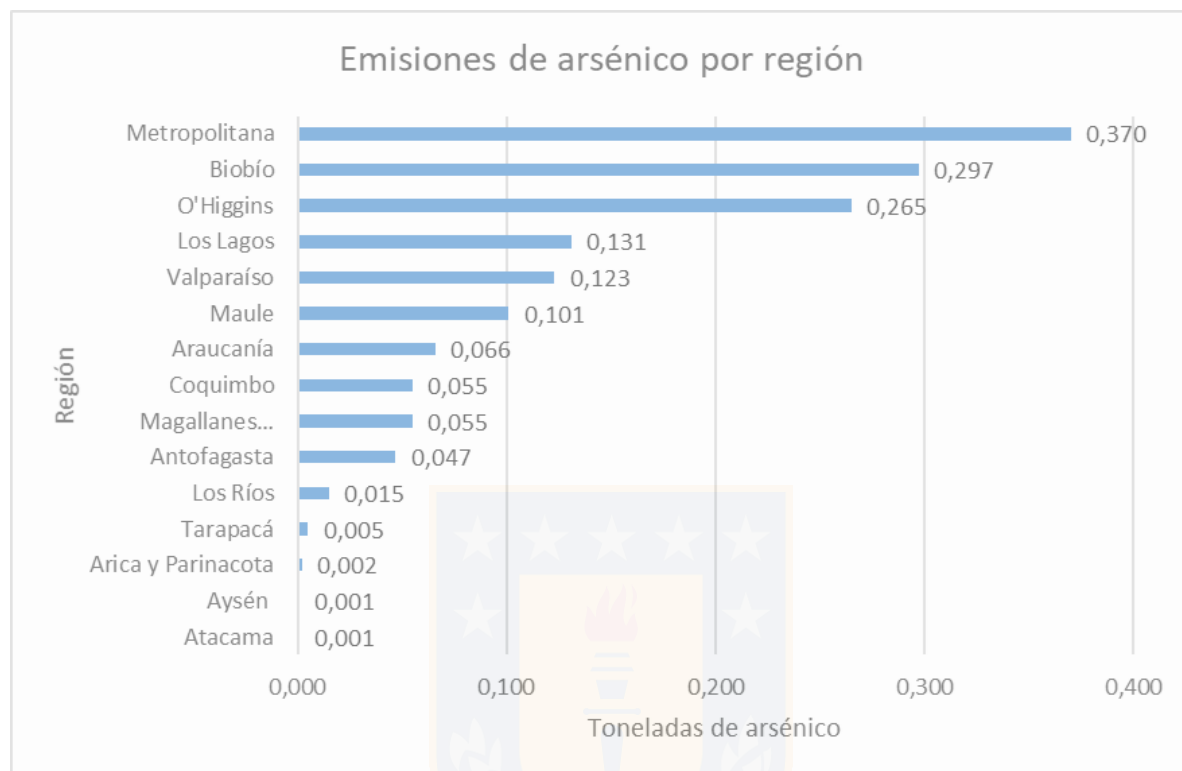
En Chile, existen distintos aportes directos de emisiones de arsénico al medio ambiente. Según el Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (RETC), en el año 2018 el “rubro” más alto de emisiones de fuentes puntuales corresponde a “Otras actividades” con 0,505 toneladas donde se incluyen emisiones de bancos, universidades, hogares, entre otros. Seguido del ítem “producción de alimentos” con 0,281 toneladas. y “combustibles” con 0,190 toneladas. Cabe destacar que en el ítem “Producción de metal” sólo se mencionan las industrias siderúrgicas y no las fundiciones de cobre, ya que las emisiones de estas últimas son calculadas mediante otra metodología y por lo tanto no se encuentran en el listado RETC. En la figura 1 se presentan todos los valores registrados en el año 2018 de emisiones de arsénico a la atmósfera a nivel nacional.



Fuente: Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes, 2018.

Figura 1: Emisiones de arsénico 2018 según rubro RETC.

En el ámbito regional (ver figura 2), se puede destacar que la Región Metropolitana es la que tiene mayores emisiones de arsénico en el aire con 0,370 toneladas, seguida de la región del Biobío con 0,297 toneladas y la región del Libertador General Bernardo O'Higgins con 0,265 toneladas.



Fuente: Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes, 2018.

Figura 2: Emisiones de arsénico por región

Entre las actividades antrópicas que más emiten arsénico a nivel nacional, se destacan las fundiciones de cobre, las cuales se encuentran a lo largo de Chile, específicamente en la zona centro y norte del país, donde 3 son refinerías y 2 plantas de ácido sulfúrico, entre ellas se encuentran: Chuquicamata, Potrerillos, Caletones y Ventanas (refinería y planta de ácido sulfúrico) que son de Codelco. Asimismo, están: Altonorte de Glencore, Chagres de Anglo American (planta de ácido sulfúrico) y Hernán Videla Lira de Enami.

Las cuales están reguladas por la "Norma de Emisión para Fundiciones de Cobre y Fuentes Emisoras de Arsénico" (D.S. N°28, de 2013, del Ministerio del Medio Ambiente), esto producto de una de las recomendaciones que realiza La Organización

para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) en el 2005, donde destaca el bajo impuesto verde de las emisiones de contaminantes atmosféricos locales (PM, NOx, SO2, CO2) para las fundiciones de cobre. Además de mencionar de que en Chile existen altos niveles de contaminación atmosférica, sobrepasando los límites fijados en las normas de calidad del aire, en especial cerca de industrias mineras y en las zonas urbanas. Destacando en reducir aún más la contaminación del aire respecto al SO₂ y arsénico (OCDE, 2016).

El estado de cumplimiento del D.S. N°28, de 2013, del Ministerio del Medio Ambiente, fue solicitado en julio del 2020 (Of. Ord N° 202969, del 30 de julio de 2020, del Ministerio del Medio Ambiente), donde el periodo a analizar fue del año 2019 (tabla 1), ya que ese año cuenta con un periodo de datos completos, esto debido a que el total de las fundiciones ya habían incorporado todas las tecnologías necesarias para el correcto cumplimiento de la normativa a fines del 2018 (Resolución Exenta N°1136/2020).

Tabla 1: Estado de cumplimiento del límite máximo de emisión de arsénico (As) para el año 2019.

Nombre fuente emisora	Emisión As (ton/año)	Límite emisión As (ton/año)	Límite de emisión As evaluación
Fundición Chuquicamata	32	476	Cumple
Fundición Potrerillos	50	157	Cumple
Fundición Ventanas	26	48	Cumple
Fundición Caletones	24	130	Cumple
Fundición Altonorte	114	126	Cumple
Fundición Hernán Videla Lira	-6	17	Sin evaluación
Fundición Chagres	33	35	Cumple

Fuente: Oficio Ord. N°2541, 2020

Nota: La emisión anual de cada fuente emisora de As es la suma de los resultados netos de los balances mensuales, menos el arsénico recuperado en las operaciones de mantención y/o limpieza. El balance mensual consiste en la diferencia entre la cantidad neta de As ingresada a la fuente emisora y la cantidad neta de As presente en todos los flujos de salida, menos la cantidad neta de As acumulado en ese periodo (D.S. N°165, de 1999, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia).

Como se observa en la tabla 1, todas las fundiciones cumplen con la norma de emisión (D.S. N°28, de 2013, del Ministerio del Medio Ambiente) menos la Fundición Hernán Videla Lira, que cuenta con un valor negativo que es producto de una formulación inadecuada de la metodología de balances de masas, como así también de aplicación de la misma en los reportes mensuales del 2019 (SMA, 2020).

En definitiva, a pesar de que ha existido una disminución en las emisiones de arsénico al aire, aun así, siguen existiendo altos niveles de contaminantes, sobre todo de (MP2.5) (superior a $35 \mu\text{g m}^{-3}$) en gran medida en zonas con actividades mineras o alta concentración de población. (OCDE, 2016).

2.2.3. Niveles ambientales de arsénico en el aire.

El arsénico es un contaminante caracterizado por encontrarse globalmente en el medio ambiente, pudiéndose transportar largas distancias en la atmósfera antes de ser depositadas en el suelo (Wai et al., 2016).

En busca de examinar el transporte global del arsénico en el aire, se hizo en el 2016 el primer inventario de emisiones cuadrículado global de arsénico, desarrollado por el equipo de Ka-Ming Wai, usando un modelo de transporte químico atmosférico global (Goddard Earth Observing System [GEOS] -Chem) este impulsado por campos meteorológicos asimilados de la Oficina de Asimilación y Modelado Global de la NASA (GMAO) el cual reproduce las concentraciones de arsénico observadas en el aire de la superficie en varios sitios alrededor del mundo, seleccionando como año base el 2005. Dando como resultado $30,7 \text{ Gg año}^{-1}$ de emisiones globales de arsénico, con $15,8 \text{ Gg año}^{-1}$ perteneciente a Asia Oriental y $4,4 \text{ Gg año}^{-1}$ de América del Sur, donde el principal aporte de emisiones es perteneciente a las fuentes antropogénicas, con un $28,6 \text{ Gg año}^{-1}$. Las más altas concentraciones promedio anuales de arsénico (10 ng m^{-3} o más) se hallan en el este de China y el norte de Chile, a diferencia de Europa y Estados Unidos (Wai et al., 2016). En EE. UU. estudios provenientes de la EPA y la IARC, en el periodo de 1977 – 1985, señalan que los niveles medios de arsénico en las zonas remotas oscilan entre <1 y 3 ng m^{-3} en el aire ambiente, aumentando en zonas urbanas de 20 a 30 ng/m^3 (ATSDR, 2007). En el caso de Canadá, la concentración media de arsénico en 11 ciudades esta entre el rango de

0,5 - 17 ng m⁻³ y por el lado de Inglaterra, la concentración ha sido de 5,4 ng m⁻³ durante el periodo 1957-1974 (WHO, 2000). Las concentraciones pueden variar si las ciudades se encuentran cerca de fundiciones de metales no ferrosos con niveles que pueden llegar a superar los 1000 ng m⁻³ (WHO, 2000).

A nivel nacional, al poseer 7 fundiciones de cobre los niveles ambientales en el aire de arsénico son elevados, aumentando con el tiempo. Lo anterior se vislumbra claramente en el estudio de Lei Zhang, el cual desarrolló un inventario global mejorado de emisiones atmosféricas de arsénico en todo el mundo, para después conectarlo al modelo global (GEOS-Chem), reproduciendo la distribución espacial del arsénico atmosférico a nivel país, donde los resultados estimados para el año 2005 fueron de 8,34 ng m⁻³ de arsénico atmosférico en el aire a nivel nacional, aumentando un 4% para el año 2015 con una concentración en el aire de As de 8,68 ng m⁻³ (Zhang et al., 2020).

Gidnagen en el periodo de 1999 – 2000, realizó un estudio que consistió en un seguimiento y modelización del arsénico en distintas regiones de Chile en busca de cuantificar el impacto regional producido por las emisiones de las fundiciones, en donde se instalaron muestreadores de partículas de PM10 en siete localidades rurales en el centro y norte de Chile (figura 3). Estas estaciones fueron ubicadas cercanas a actividades industriales y a determinada distancia de las principales carreteras. Cuatro de las siete estaciones estaban ubicadas en el norte de Chile, específicamente en el desierto. La quinta estación estuvo situada entre dos zonas de transición (desierto y cultivos), mientras que las dos últimas estaciones se ubicaron más al sur, donde se encontraban áreas agrícolas (Gidnagen et al., 2002).



Fuente: Gidnagen et al., 2002.

Figura 3: Estaciones de PM10 en siete localidades rurales

Cuyos resultados medidos se muestran en la tabla 2, donde las concentraciones de arsénico atmosférico en el aire variaron de 2,4 ng m⁻³ siendo el valor más bajo, a 30,7 ng m⁻³ el valor más alto, de las siete estaciones rurales, las cuales se encuentran a decenas a cientos de kilómetros de las fundiciones de cobre. A excepción de la estación Quillota, que tiene a 30 km una fundición y a otros 40 km otra, además de estar a 1 km de la carretera principal, presentando una concentración promedio de arsénico de 30,7 ng m⁻³ que es un nivel bastante alto en comparación con zonas no contaminadas.

Tabla 2: Concentraciones medias de arsénico en el PM10 (ng/m³)

Concentración/ Estaciones	Pica	Quillagua	Toconao	D. de Almagro	Vallenar	Quillota	Linares
As	10,4	6,5	16,7	4,4	3,9	30,7	2,4

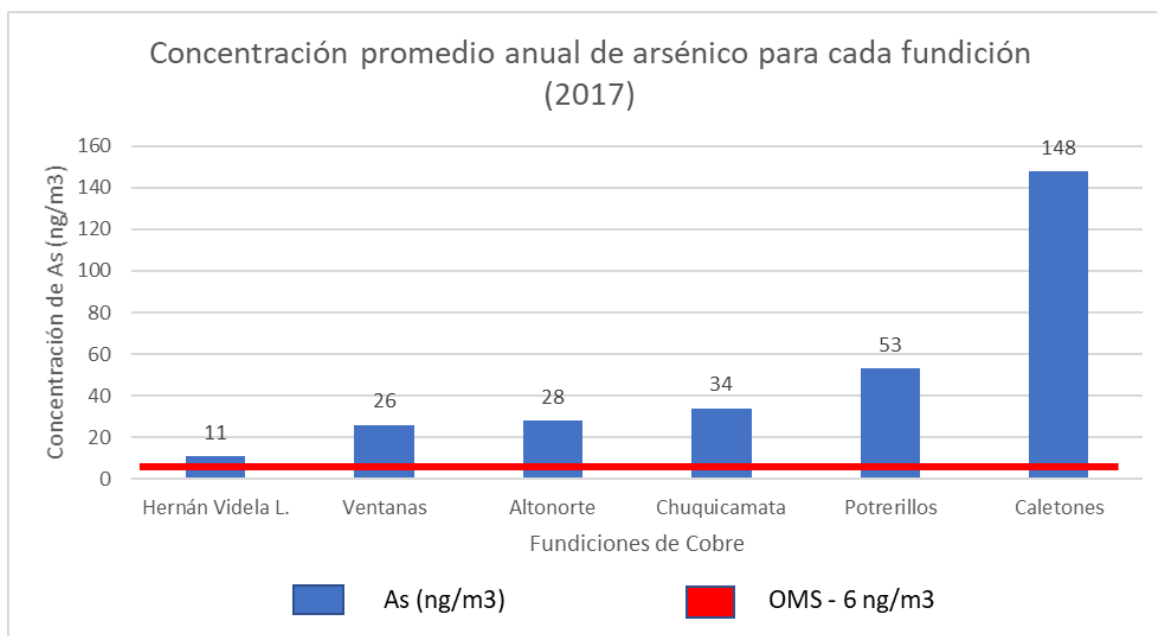
Fuente: Gidnagen et al., 2002.

El estudio anterior fue muy importante ya que menciona que existen altos niveles de arsénico en el PM10 no sólo cerca de las fundiciones de cobre, sino también a escala regional, cuyos mayores niveles de arsénico, posiblemente no son producto del polvo resuspendido del suelo, ya que el análisis de distribución de fuentes muestra que si se eliminaran las emisiones de las fundiciones, el polvo del suelo produciría niveles de arsénico en el aire que no excederían los 5 ng m^{-3} en las áreas estudiadas (Gidnagen et al., 2002).

Para tener una visión más actual de la problemática, esta investigación analizó el año 2017, porque contaba con más registros de monitoreo de calidad del aire. La información presentada en la figura 4 fue obtenida a partir de los informes entregados por los titulares de las fundiciones de cobre al Ministerio del Medio Ambiente según exigencias determinadas en las respectivas Resoluciones de Calificación Ambiental (Of. Ord N° 202969, del 30 de julio de 2020, del Ministerio del Medio Ambiente).

Con la información de las estaciones de monitoreo de PM10 se calculó la media anual para el arsénico, a partir de todos meses reportados para el año 2017 de cada estación de monitoreo, perteneciente a cada fundición, a excepción de la fundición Chagres donde no se encontraron datos.

Cabe destacar que las concentraciones de As obtenidas son solo valores referenciales para tener una perspectiva de la situación nacional, ya que pueden existir márgenes de errores, por la ausencia de valores de As para distintos meses del año.



Fuente: Elaboración propia, a partir de Oficio Ord. N°2541, 2020

Figura 4: Concentración promedio anual de arsénico para cada fundición (2017)

Como se puede ver en la figura 4 los niveles de arsénico sobrepasan el valor guía de la OMS (6 ng/m³), el cual es adoptado por la Unión Europea, además de encontrarse altos niveles de As en la fundición Caletones.

3. Efectos en los seres humanos y en el ambiente

El arsénico se encuentra altamente distribuido en todo el medio ambiente, presentándose en forma orgánica e inorgánica, siendo la exposición a esta última, la más reportada por casos de toxicidad inducida en los seres humanos (ATSDR, 2007). Asimismo, la Organización Mundial de la Salud (OMS) declara al arsénico como una de las sustancias más preocupantes para la salud pública, entre otras 10 (ISP, 2015).

Esta sección proporciona información sólo de los efectos que causa el arsénico por vía inhalatoria, ya que el objetivo de esta investigación es presentar antecedentes para una futura Norma Primaria de Calidad Ambiental en el aire. Los datos se presentan en función de tres períodos de exposición: agudo, intermedio y crónico. Además, del efecto (sistémico, cardíaco, neurológico, cáncer, etc) sobre la salud humana y en animales.

Para saber los efectos del arsénico sobre la salud humana, la mayoría de los investigadores han analizado los entornos laborales, como plantas químicas y fundiciones de cobre. Cuyas investigaciones pasadas tienen ciertas limitantes: Como el hecho de ser antiguas, donde los niveles de arsénico décadas atrás eran superiores a diferencia de la actualidad; asimismo, son de difícil acceso, por el periodo de tiempo (menor a 1999); además de existir la posibilidad de cierta coexposición entre sustancias alterando los resultados, ya que, en las plantas químicas, no solo existe un contaminante, sino varios. Por ende, estas investigaciones están sujetas a ciertas incertidumbres y limitaciones, como cualquier estudio epidemiológico (ATSDR, 2007).

La tabla 3 y 4 resumen los estudios cuantitativos más fiables sobre los efectos en los animales y en los seres humanos, expuestos al arsénico por vía inhalatoria.

Donde se mencionan distintas dosis determinadas experimentalmente, como el NOAEL (por las siglas de No Observed Adverse Effect Level, en inglés), el cual es una dosis de una sustancia química donde no se identifican efectos adversos en animales. Se pueden producir cambios en los individuos, pero sus efectos no se consideran dañinos. Por otro lado, existe la dosis más baja de una sustancia química en la cual, si se identifican efectos adversos en la salud de los animales, llamado

LOAEL (Lowest Observable Adverse Effect Level). Los posibles efectos pueden ser disminución en la fuerza o menor peso al nacer, entre otros (ATSDR, 2016).

La Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR) ha categorizado las dosis LOAEL, en efectos “menos graves” o “graves”. Los efectos “menos graves” son los que no se esperan que causen una falla importante en el organismo. En cambio, los efectos “graves”, connotan un fallo en el sistema biológico, provocando una enfermedad o la muerte (ATSDR, 2007).

Normalmente los umbrales LOAEL y NOAEL son utilizados mundialmente para establecer estándares de seguridad, en base a estudios que han sido considerados óptimos por un panel de científicos. En el caso de que existiesen varios NOAEL distintos para una misma sustancia y su efecto, se optará por seleccionar el valor más bajo. Por ende, si no existiese el anterior, se escogerá un valor de LOAEL mínimo (Ize et al., 2010).

➤ **Muerte**

Actualmente no hay casos de letalidad en humanos por la exposición al arsénico inorgánico en el aire a corto plazo, incluso a niveles de exposición elevados (1-100 mg/m³). En caso de los estudios con animales, solo existe una investigación de toxicología del desarrollo en ratas, donde cuatro de nueve especímenes murieron, tras 35 días de exposición al trióxido de arsénico (As₂O₃) a una concentración de 20 mg/m³ (Holson et al. 1999).

➤ **Efectos respiratorios**

Estudios en trabajadores de fundiciones, expuestos al polvo de arsénico en el aire continuo, han experimentado irritación nasal y de garganta, pudiendo provocar posteriormente: Una laringitis, bronquitis o rinitis. Si se presenta una exposición muy elevada puede haber una perforación del tabique nasal. Si bien, se sabe de los efectos irritantes del arsénico inorgánico, ha habido pocos estudios entre la asociación de éste, con el sistema respiratorio completo, un estudio transversal en 1948 analizó las

radiografías de tórax de los trabajadores expuestos y no expuestos al arsenito de sodio, preparado en una fábrica. Dando como resultado, ninguna diferencia significativa entre los dos grupos (expuestos y no expuestos). Asimismo, se determinó un NOAEL de 0,613 mg/m³ para los efectos respiratorios, señalado en la tabla 4.

Con respecto a las investigaciones que se hicieron hace décadas atrás en las fundiciones de cobre (Anaconda y Asarco en EE.UU.) se encontró un aumento en la mortalidad por enfermedades respiratorias (enfisema) en los trabajadores expuestos al trióxido de arsénico en el aire (ATSDR, 2007; Lubin et al. 2000; Welch et al. 1982).

➤ **Efectos sistémicos**

Todos los valores LOAEL y NOAEL más fiables, para los distintos efectos sistémicos por exposición a los arsenicales inorgánicos en animales y humanos, se mencionan en las tablas 3 y 4.

➤ **Efectos cardiovasculares.**

Los estudios en la fundición de cobre de Ronnskar en Suecia, indican efectos cardiovasculares en los trabajadores por la exposición a 0,36 mg/m³ de trióxido de arsénico, durante un promedio de 23 años. Los cuales presentaron una incidencia significativamente mayor en el fenómeno de Raynaud y en el aumento de la vasoespasticidad. Es decir, los trabajadores tenían espasmos en las arterias digitales y entumecimiento en los dedos, además de presentar una respuesta exagerada al frío con una vasoconstricción de los vasos sanguíneos (Lagerkvist et al. 1986). Posteriormente otro estudio en Dinamarca señala un aumento de la presión arterial sistólica (125 frente a 117 mmHg) y diastólica (77,9 frente a 74,7 mmHg) en trabajadores con una exposición variable y no cuantificada de arsénico.

➤ **Efectos gastrointestinales**

Se distingue la presencia de vómitos, náuseas y diarrea en los individuos expuestos al arsénico inhalado a corta duración y altas concentraciones (Meridian Environmental Inc, 2011; ATSDR, 2007). Los cuales son los típicos síntomas de envenenamiento agudo, asociado a la ingestión oral al arsénico (ISP, 2015; MINSAL, 2014).

Respuesta, del organismo que se da probablemente por el transporte mucociliar del polvo del arsénico desde los pulmones hacia el intestino (ATSDR, 2007).

El estudio de Holson et al. (1999) determinó un daño severo en los intestinos de ratas, al realizar la autopsia a cuatro de nueve individuos, tras una exposición de 35 días a la concentración de 20 mg/m³ de As.

➤ **Efectos dérmicos**

Los trabajadores de las industrias, que están altamente expuestos al arsénico inorgánico en el aire, tienen mayor frecuencia de presentar dermatitis (MINSAL, 2014). Existe una limitada información cuantitativa acerca de los niveles que producen dermatitis, además de poderse presentar, en los lugares laborales, una coexposición por vía dérmica en los trabajadores, dificultando el análisis dosis - respuesta. La investigación de Perry et al. (1948) en una industria que preparaba arsenito de sodio, determinó un aumento de la pigmentación con hiperqueratinización en la piel de trabajadores expuestos al arsénico en el aire a concentraciones de 0,613 mg/m³, además de producirse gran variedad de verrugas. En el caso de exposiciones menores (0,078 mg/m³) su afectación es mínima, pero, aun así, se sigue presentando queratosis pigmentaria (Lagerkvist et al., 1986). Los valores LOAEL se presentan en la tabla 4, no habiendo valores para el NOAEL para la irritación dérmica.

➤ **Efectos oculares**

Si bien existen estudios que señalan la aparición de conjuntivitis química, acompañada de inflamación, enrojecimiento, y dolor en algunos trabajadores. Estos, no mencionan los niveles de arsénico en el aire que causan estos efectos. (ATSDR, 2007)

➤ **Efecto sobre el peso corporal**

No se han encontrado estudios que señalan un aumento o disminución del peso en humanos, producto de la exposición al arsénico inorgánico en el aire. Por otro lado, en estudio con animales, se ha detectado que existe una marcada disminución en el peso de las ratas, expuestas a niveles de 20 mg/m³ de trióxido de arsénico en el aire y una disminución menor a 8 mg/m³ (Holson et al. 1999).

➤ **Efectos inmunológicos**

El estudio de Aranyi et al. (1985), menciona la exposición de ratones al aerosol de trióxido de arsénico, en un periodo de 3 horas, los cuales manifestaron un déficit en la actividad bactericida pulmonar y susceptibilidad a los patógenos bacterianos respiratorios. Los valores de LOAEL Y NOAEL se muestran en la tabla 3.

➤ **Efectos neurológicos**

Se han presentado efectos neurológicos en trabajadores de las fundiciones de cobre ASARCO (EE.UU.) y Ronnskar (Suecia), además de una central eléctrica en Eslovaquia, producto de la exposición al trióxido de arsénico. En la fundición ASARCO, los trabajadores (26 de 61) mostraron signos de neuropatía periférica (temblores, pérdida de reflejos, debilidad muscular, entumecimiento) (ATSDR, 2007). En el caso de la fundición Ronnskar, los trabajadores presentaron los mismos efectos neurológicos que la fundición ASARCO, con una exposición media de arsénico de 0,31 mg/m³ durante una media de 28 años, su LOAEL se muestra en la Tabla 4.

➤ **Efectos en la reproducción**

Actualmente no existen estudios que asocien efectos en la reproducción en humanos por la exposición al arsénico inorgánico inhalado. Por otro lado, en animales, se ha evaluado el rendimiento reproductivo en ratas expuestas a 0,2 - 8 mg/m³ de arsénico durante 6 horas diarias, desde el apareamiento (14 días antes) hasta el día de

gestación (día 19). No produciéndose cambios en el intervalo precoital, ni en el índice de fertilidad (Holson et al. 1999).

➤ **Efectos en el desarrollo**

Como se ha mencionado anteriormente los trabajadores de la fundición de cobre de Ronnskar, se vieron afectados por múltiples efectos dañinos en su organismo. En el caso de los efectos en el desarrollo se evaluó a las trabajadoras de aquel lugar, en comparación con una población del norte de Suecia, dando como resultado una incidencia mayor en abortos espontáneos en las trabajadoras, asimismo sus hijos presentaban una alta incidencia de malformaciones congénitas. Como también en el caso de las madres que vivían cerca de la fundición, sus hijos nacían con bajo peso (ATSDR, 2007).

Los efectos en el desarrollo también se han producido en los animales de laboratorio, cuyas ratas expuestas a 22 mg/m^3 de (As_2O_3) en los días 9 - 12 de gestación, durante 4 horas, mostraron graves efectos en las crías (aumento en las malformaciones esqueléticas, retraso en el crecimiento, mortalidad), por el contrario, las ratas que fueron expuestas a $2,2 \text{ mg/m}^3$ de As tuvieron una disminución del 10% en el peso medio del feto y a $0,20 \text{ mg/m}^3$ de As no existían efectos. (Nagymajtényi et al. 1985).

➤ **Cáncer**

Existe bastante información epidemiológica sobre la exposición por inhalación al arsénico inorgánico, la cual aumenta el riesgo de cáncer de pulmón (ISP, 2015). La gran cantidad de estudios, han sido realizados desde fundiciones de cobre, donde los trabajadores están expuestos al polvo de trióxido de arsénico en el aire (Lubin et al. 2000; Enterline et al. 1987a, 1987b; Welch et al. 1982). Además de estudios en poblaciones aledañas a las ellas, así como también a las plantas químicas, donde sugieren un riesgo de presentar cáncer de pulmón (ATSDR, 2007; IRIS, 1995).

Las pruebas más categóricas sobre el riesgo existente del cáncer de pulmón son los estudios cuantitativos dosis - respuesta (relación con niveles específicos de

exposición al As, que pueden producir un riesgo de cáncer de pulmón). Donde, los datos fueron obtenidos a partir de estudios en trabajadores expuestos al arsénico en las fundiciones de cobre: ASARCO (Tacoma), Anaconda (Montana), Ronnskar (Suecia) y otras 8 fundiciones de Estados Unidos. Todos presentando limitaciones comunes, en relación con otras sustancias químicas presentes (dióxido de azufre, consumo de cigarrillos) (ATSDR, 2007).

Tabla 3: Niveles de exposición significativos de arsénico inorgánico en el aire – Estudios en animales

Especie	Exposición/ Duración /frecuencia	Sistema	NOAEL (mg/m ³)	LOAEL		Referencia
				Menos grave (mg/m ³)	Grave (mg/m ³)	
EXPOSICIÓN AGUDA (menor a 14 días)						
Inmunológico						
Ratón	3 hr		0,123	0,271 (aumento de la susceptibilidad a la infección estreptocócica)		Aranyi et al. 1985 As(+3)
Desarrollo						
Ratón	9-12 gestación 4 hr/día		0.2	2,2 (10% de disminución en el peso corporal del feto)	21,6 (aumento muertes al nacer, malformaciones esqueléticas y disminución en el crecimiento)	Nagymajten yi et al. 1985 As(+3)
EXPOSICIÓN INTERMEDIA (15-364 días)						
Muerte						
Ratón	19 gestación 7 días/seman a 6 hr/día				20 (5 muertos de 10)	Holson et al. 1999 As(+3)
Sistémico						
Ratón	19 gestación 7 días/seman a 6 hr/día	Respiratorio	2	8 (material rojo seco alrededor de la nariz)		Holson et al. 1999 As(+3)
		Peso corporal	2	8 (disminución peso corporal del feto)		

Fuente: ATSDR, 2007.

Tabla 4: Niveles de exposición significativos de arsénico inorgánico en el aire – Investigaciones en humanos

Especie	Exposición/Duración /frecuencia	Sistema	NOAEL (mg/m ³)	LOAEL		Referencia
				Menos grave (mg/m ³)	Grave (mg/m ³)	
EXPOSICIÓN CRÓNICA (365 días o más)						
Sistémico						
Humano	23 años (promedio laboral)	Cardiaco			0,36 (vasos circulatorios se tornan densos. Además de respuesta vascular exagerada al frio)	Lagerkvist et al. 1986 As(+3)
Humano	0,5 – 50 años (promedio laboral)	Respiratorio Dérmico	0,613	0,078 (pigmentación leve)	0,613 (En las zonas expuestas se produce una hiperqueratinización, además de la aparición de verrugas)	Perry et al. 1948 As(+3)
Neurológico						
Humano	28 años (promedio laboral)			0,31 (disminución de la velocidad de conducción nerviosa)		Lagerkvist and Zetterlund 1994 As(+3)
Cáncer						
Humano	30 años (laboral)				0,213 (nivel de efecto: Cáncer de pulmón)	Enterline et al. 1987a As(+3)
Humano	19,5 (promedio laboral)				0,069 (nivel de efecto: Cáncer de pulmón)	Enterline et al. 1987b As(+3)
Humano	14,8 (promedio laboral)				0,3 (nivel de efecto: Cáncer de pulmón)	Welch et al. 1982 As(+3)
Humano	> 25 años (laboral)				0,29 (nivel de efecto: Cáncer de pulmón)	Lubin et al. 2000As(+3)

Fuente: ATSDR, 2007.

3.1. Ecotoxicidad

a) Degradabilidad-Biotransformación en el ambiente

La toxicidad depende de la especie (arsenito o arseniato) de arsénico que se encuentre en la biota acuática y terrestre. Generalmente, el arsenito es más tóxico que el arseniato. El primero se deriva de su unión a los grupos sulfhídrico de las proteínas y en el caso del arseniato este afecta a la fosforilación oxidativa, ya que compite con el fosfato. Si las condiciones en el ambiente son altas en fosfato, la toxicidad del arseniato para la biota sería baja. Donde, el sistema de absorción y mecanismo de toxicidad del arseniato varía por cada organismo. Los individuos que viven en una concentración elevada de arsénico, deben adquirir el fósforo nutritivo, evitando la toxicidad del arsénico. Por ende, solo vivirían especies resistentes (MINSAL, 2014).

Los diferentes compuestos de arsénico provocan efectos agudos y crónicos tanto en las personas como en las comunidades, donde se puede presentar inhibición del crecimiento, de la fotosíntesis, reproducción, comportamiento, e incluso la muerte. En concentraciones que oscilan en unos microgramos y miligramos por litro, dependiendo del tiempo de exposición a la sustancia y del tipo de especie. Igualmente, si existiese una zona contaminada por As se destacaría de inmediato ya que habría poca diversidad y abundancia de especies (MINSAL, 2014).

3.2. Persistencia

El arsénico tiene un carácter persistente, a pesar de sufrir modificaciones químicas en el medio, por ende, no se elimina del ambiente (MINSAL, 2014).

b) Bioacumulación – Biomagnificación

Los organismos marinos suelen recibir las formas inorgánicas de As y tras su biogénesis, bioacumularse en forma de compuestos orgánicos que oscilan entre <1 y >100 mg/kg, tanto en macroalgas, como en peces e invertebrados. Aunque las concentraciones son más bajas en los peces de agua dulce a diferencia de los marinos.

Las plantas terrestres, pueden acumular As a través del suelo (absorción) o por medio del aire (adsorción), teniendo concentraciones más altas cerca de lugares industriales o zonas geotérmicas (MINSAL, 2014).

3.3. Investigaciones a nivel nacional

En Chile, el arsénico se puede encontrar de forma natural y antropogenicamente, en especial en la zona norte del país, donde existen varias actividades mineras, principalmente fundiciones de cobre (Ferrecio y Sancha, 2006).

El arsénico natural, se relaciona fuertemente con la actividad volcánica del Terciario y Cuaternario en la Cordillera de los Andes. Afectando el agua de la zona y así, las características químicas (alcalinidad, salinidad alta, pH elevado). (Tapia et al., 2019; Ferrecio y Sancha, 2006).

Producto de lo anterior se han descrito alteraciones en la salud de niños y adultos, como: Infartos, enfermedades respiratorias, lesiones cutáneas, cáncer de pulmón y de vejiga. (Ríos et al., 2020; Silva et al., 2010; Ferrecio y Sancha, 2006). Un ejemplo de esto es que en el periodo de 1976-1978 se describió el primer informe sobre un mayor riesgo de muerte por cáncer de pulmón, donde el índice de mortalidad estandarizado ((SMR) es de 503 para Antofagasta y 449 para Tocopilla, superando en cinco veces la media nacional (Ferrecio y Sancha, 2006).

A continuación, la tabla 5 describe los estudios más actuales y connotados a nivel nacional.

Tabla 5: Estudios en Chile sobre el arsénico

Estudio	Principal información sobre el As
Ríos et al., 2018	Estudio sobre la concentración de metales en la orina en personas que viven hace más de 5 años en Antofagasta. Destacando altas concentraciones de As en personas cuya residencia estaba a más de 500 metros de distancia de las fuentes contaminantes, presentando en la orina 17,2 ug/L de As y a 200 metros 8,4 ug/L de As.
Tapia et al., 2018	Las concentraciones medias de As ($239 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), además del Cu y Zn en Antofagasta son probablemente las más altas en polvo de las calles en todo el mundo.
Silva et al., 2010	La exposición crónica al As en la zona de Camarones ha causado en la población distinto tipo de afecciones dérmicas, como: Melanodermia, leucodermia o queratosis palmoplantar.
Cortes et al., 2004	El As está presente por medio de la ingestión de agua y dieta en la población de Antofagasta, con una media de $1,001 \pm 0,4 \text{ } \mu\text{g/Kg/día}$. Valor que sobrepasa en 3,3 veces la Dosis de Referencia (RDf) propuesta por la EPA ($0,3 \text{ } \mu\text{g/Kg/día}$). Donde los niveles de As en aire fluctúan entre $0,096 - 0,011 \text{ } \mu\text{g/m}^3$
Icaza et al., 2007	Las Comunas de Tocopilla y Antofagasta poseen altas tasas de mortalidad, por tumores malignos de tráquea y pulmón. Asimismo, existe un exceso de riesgo desde Iquique hasta Copiapó, producto la exposición crónica al arsénico, asociada de forma natural y por lo procesos mineros
Fundación Terram, 2018	Las mediciones de arsénico en Puchuncaví y Quintero superan en gran cantidad el máximo recomendado por la OMS de $0,006 \text{ } \mu\text{g/m}^3$. Por lo tanto, se recomienda crear una normativa primaria de calidad ambiental, basada en la OMS. Además de reiterar la recomendación de Egipto al Estado de Chile en el ciclo de la EPU (121.184 del A/HRC/26/5), respecto a “adoptar normas ambientales relativas a las emisiones de contaminantes por fundiciones”, si bien se dictó una norma el 2013, los habitantes siguen en contacto con estas emisiones que superan los valores guías de la OMS.
CONAMA, 2009	En el año 1998 se detecta As inorgánico en la orina, mayor a los $25 \text{ } \mu\text{g/L}$ indicados por la OMS en la población de Arica. Además de altos niveles de As en el aire, que sobrepasan el límite de la OMS ($0,006 \text{ } \mu\text{g/m}^3$), con $0,031 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ como promedio anual en PM10 y $0,009 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ en PM2.5.

Fuente: Elaboración propia.

4. Metodología

Se llevó a cabo una exhaustiva revisión de revistas científicas, universitarias y publicaciones gubernamentales a nivel nacional e internacional, incluyendo información estadística, política y planes regulatorios. La revisión de la normativa internacional fue sobre criterios y usos de las directrices para la calidad del aire ambiente sobre el arsénico. Además del tipo de monitoreo usado en cada país. También se Investigó la problemática que existe en Chile entorno al arsénico y su normativa vigente.

Las principales agencias utilizadas fueron: La Agencia Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA), Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR), ya que tienen un prestigio a nivel mundial sobre estudios toxicológicos. Al igual que la agencia del Medio Ambiente y Desarrollo de Recursos Sostenibles en Alberta (Canadá). Así también, los Ministerios del medio ambiente respectivos a cada región o país.

Las revistas fueron obtenidas de la base de datos: ScienceDirect y Google Scholar, tanto en inglés como en español. Donde se buscó temas principalmente relacionados con la salud y el efecto del arsénico inhalado en el ser humano. La búsqueda incluyo los siguientes términos en inglés (términos coincidentes en “todos los campos”): “arsénico en el aire” y "efecto sobre la salud" (cáncer, diabetes, enfermedad cardiovascular, enfermedad pulmonar).

A nivel nacional: Se obtuvo información del Ministerio del Medio Ambiente, Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (RETC) del año 2018, Ley Chile – Biblioteca del Congreso Nacional y el Ministerio de Salud.

El procedimiento metodológico resumido se señala en la figura 5, el cual está compuesto por un conjunto de actividades que se le asigna a cada objetivo específico.

Objetivo 1	Analizar el estado del arte respecto a la normativa de calidad del aire para el arsénico en el mundo	Actividades	<ol style="list-style-type: none"> 1. Enfoques metodológicos 2. Utilización de directrices o normas 3. Directrices o normativas vigentes 4. Monitoreos más usados 5. Proyectos nacionales
-------------------	--	--------------------	--



Objetivo 2	Seleccionar las normativas con enfoques más adecuados para regular el arsénico en el aire en Chile.	Actividades	<ol style="list-style-type: none"> 1. Enfoques más adecuados a implementar
-------------------	---	--------------------	---



Objetivo 3	Proponer los antecedentes científicos y técnicos básicos preliminares que deberían ser evaluados en el proceso de dictación de la norma primaria de calidad del aire para el arsénico en Chile		
-------------------	--	--	--

Fuente: Elaboración Propia

Figura 5: Resumen Metodológico para cada objetivo específico.

5. Resultados

5.1. Objetivos y directrices de calidad del aire para el arsénico

Antes de plantearse hacer un valor guía para cualquier contaminante en el aire, se debe tener claro que por lo general no hay tantos datos completos y concluyentes, ya que no suelen estar disponibles. Por ende, hay que investigar bastante sobre el tema y tener un conocimiento detallado de los efectos tóxicos provocados por el contaminante, si existen o no umbrales, las relaciones dosis – respuesta en los individuos, la sensibilidad y los niveles de exposición que existen dentro de la población. El objetivo es que la directriz o normativa no suponga ningún peligro para la población humana, que sería lo ideal. Sin embargo, existe la probabilidad de no ofrecer una seguridad absoluta y que haya un riesgo aceptable. Por ende, el juicio científico representa un papel relevante en el establecimiento de orientaciones que puedan usarse para formular los niveles aceptables de exposición en la comunidad (WHO, 2000).

A continuación, se presenta la revisión de directrices ambientales actuales y/o recomendadas de diferentes agencias internacionales. Los detalles sobre los objetivos o directrices que existen para cada agencia revisada se presentan en la tabla 8 y en el Anexo.

En general, la mayoría de las jurisdicciones tienen usos en común para sus directrices (Meridian Environmental Inc, 2011). Estos pueden ser:

- Revisar las solicitudes de permisos de las fuentes que emiten contaminantes a la atmósfera.
- Evaluar el potencial de los efectos en la salud de los productos químicos presentes en el aire ambiente.
- Determinar la aplicación de medidas temporales de control de las emisiones.

Existen dos enfoques principales en los que se basan los objetivos y las directrices sobre el arsénico en el aire:

- **Enfoque 1:** Usar un Límite de Exposición Ocupacional (OEL) y dividirlo por factores de seguridad o de ajuste. Este límite es elaborado por la Conferencia Americana de Higienistas Industriales Gubernamentales (ACGIH), o por el Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH) en los Estados Unidos. Los cuales utilizan terminología diferente para el OEL. La ACGIH utiliza "Valor límite de umbral" (TLV) y la NIOSH utiliza "límites de exposición recomendados" (REL) (CCOHS, 2017). El OEL más usado por las agencias internacionales es el valor límite umbral (TLV) de 8 horas de $10 \mu\text{g m}^{-3}$ el cual está basado en una semana laboral de 40 horas a la que se cree que los trabajadores pueden estar expuestos continuamente, durante una vida laboral sin que se le produzcan efectos adversos (Meridian Environmental Inc, 2011).
- **Enfoque 2:** Utilización de estimaciones cuantitativas del riesgo cancerígeno, usando las evaluaciones de riesgo de cáncer preexistentes realizadas por otros organismos (US EPA, Cal. EPA, WHO), para establecer niveles de aire exterior basados en niveles aceptables de riesgo de cáncer a lo largo de la vida, como 1 en 10.000 (10^{-4}), 1 en 100.000 (10^{-5}) o 1 en 1.000.000 (10^{-6}) (Meridian Environmental Inc, 2011).

5.2. Explicación de métodos

5.2.1. Enfoque 1: Límite de exposición ocupacional (OEL)

Tanto la ACGIH, como NIOSH han elaborado límites de exposición ocupacional, basados en la aplicación de factores de incertidumbre a una LOAEC para el cáncer de pulmón identificados a partir de estudios epidemiológicos. Este enfoque implica la existencia de un nivel umbral sobre la carcinogenicidad del arsénico (ECHA, 2013).

Un ejemplo de lo anterior es lo que hace el Departamento de Servicios Medioambientales de New Hampshire (DES), en su Programa de Salud Ambiental (EHP), donde revisa la bibliografía y evalúa los cambios realizados en la información sanitaria publicada por la US EPA, en el Sistema Integrado de Información sobre Riesgos (IRIS), así como también, los cambios en los niveles de exposición laboral adoptados por la ACGIH. En el caso de que no hubiera un límite de concentración de referencia (RfC) específico para un contaminante proveniente de la US EPA, se

adquiere un valor límite umbral (TLV) de la ACGIH del cual deriva el límite de aire ambiente (AAL) (Larson, 2020). A continuación, en la figura 6 se presenta un resumen del enfoque del EHP:

$$AAL_{\text{Anual}} = \frac{OEL}{(SF \times 4.2)} \qquad AAL_{24\text{-Hr}} = \frac{OEL}{(SF \times TAF)}$$

Donde:

OEL: Límite de exposición ocupacional ($\mu\text{g m}^{-3}$)

SF: Factor de seguridad por Env-A1407 (tóxico de clase I = 100)

TAF: Factor de tiempo ajustado (D = 2.8)

Donde: 4.2 (24hr por día/ 8hr por día de trabajo) * (7 días a la semana/ 5 días trabajados en la semana)

Fuente: Larson, 2020.

Figura 6: Enfoque de EHP

Los factores de seguridad o de ajuste tienen por objetivo considerar: Las diferencias entre exposición laboral (8 hr) y ambiental continua (24hr), la incertidumbre en el margen de seguridad previsto en el OEL, y la sensibilidad de algunas personas de la población general frente a un trabajador relativamente sano (Meridian Environmental Inc, 2011).

En la fórmula de la figura 7, se observa el factor de seguridad (SF), el cual tiene un valor de 100, ya que el arsénico es un contaminante atmosférico regulado de clase I (carcinógeno del grupo A). En el caso del factor de ajuste de tiempo (TAF), presenta un valor de 2,8, porque el compuesto presenta peligros para la salud, tanto agudos como acumulativos. (Larson, 2020).

Dando como resultado los siguientes Límites de aire ambiente:

$$AAL_{\text{Annual}} = \frac{10^{\mu\text{g}}/\text{m}^3}{100 \times 4.2} = 0.024 \mu\text{g}/\text{m}^3 \qquad AAL_{24\text{-Hr}} = \frac{10^{\mu\text{g}}/\text{m}^3}{(100 \times 2.8)} = 0.036 \mu\text{g}/\text{m}^3$$

Fuente: N.H. Code Admin. R. Env-A 1400

Figura 7: Cálculo de límites de aire ambiente (AAL)

5.2.2. Enfoque 2: Evaluaciones cuantitativas del riesgo de cáncer

Las evaluaciones cuantitativas de carcinogenicidad están basadas en estudios confiables en humanos (confianza aceptable y exceso de incidencia de cáncer estadísticamente significativo). Donde existe una descripción normalizada de los resultados en términos de riesgo, niveles y duración de la exposición. (WHO, 2000).

En las evaluaciones cuantitativas se usan distintos parámetros, como: El factor de pendiente, que es el resultado de la aplicación de un procedimiento de extrapolación de dosis bajas, representado como (mg/kg) /día; unidad de riesgo que es la estimación cuantitativa en términos de riesgo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$); y un exceso de riesgo potencial de cáncer a lo largo de la vida, que puede ser 1×10^4 (1 cáncer más por cada 10.000 personas), 1×10^5 (1 cáncer más por cada 100.000 personas) o 1×10^6 (1 cáncer más por cada 1.000.000 personas) (IRIS, 1995).

Mas adelante en el ítem “parámetros representativos” se explica cómo se determina cada uno.

5.2.2.1. Parámetros representativos

a) Riesgo incremental de cáncer a lo largo de la vida

Es la probabilidad incrementada de desarrollar cáncer debido a la exposición durante toda la vida. Indica cuantos casos adicionales de cáncer se esperaría en una población de un millón de personas expuestas a un determinado contaminante. Donde la decisión sobre la aceptabilidad de un riesgo debe ser tomada por los gobiernos, según su gestión de riesgos de acuerdo con su política (WHO, 2000).

Para las normativas industriales comúnmente se adopta una protección de hasta 10^{-3} (1 cáncer más por cada 1.000 personas) o superior (10^{-2}). Este mayor riesgo es aceptado por la industria, porque a menudo es económica y tecnológicamente inviable reducir las exposiciones para una compañía. En el caso de las normativas para la calidad del aire exterior, las agencias han usado una protección menor de 10^{-5} , ya que se considera un riesgo de cáncer esencialmente insignificante debido a la exposición no ocupacional (CAREX Canadá, 2011)

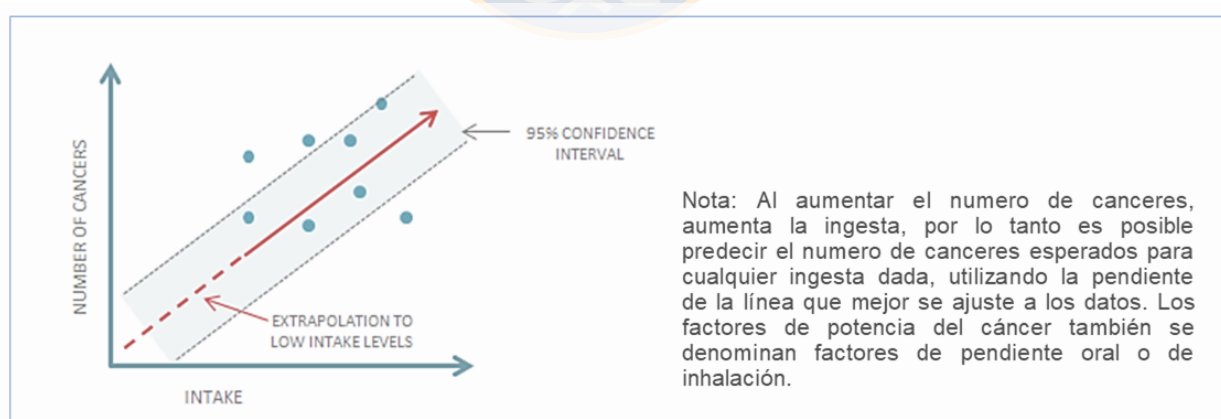
b) Concentración diaria a lo largo de la vida

Representa concentraciones medidas de carcinógenos a lo largo de la vida (70 años). La dosis media diaria se calcula para cada vía de exposición (aire exterior e interior, polvo interior, agua potable, alimentos y bebidas) en cada una de las cinco etapas de vida del ser humano (adulto, adolescente, etc.) de ingestión diaria, para posteriormente ponderarlas en función del tiempo en cada etapa de vida (CAREX Canadá, 2011).

c) Factor de pendiente

Se determina a través de la relación matemática que describe la proporción entre cantidad de un compuesto tóxico al que están expuestos los seres humanos y la incidencia de un efecto o respuesta. Como las sustancias cancerígenas causan efectos a dosis extremadamente bajas y no existe un grado seguro de exposición, normalmente se tiene que extrapolar las curvas dosis-respuesta a dosis bajas, en busca de un factor de potencia del cáncer o también llamado factor de pendiente (ver figura 8) (Ize et al., 2010).

Las organizaciones que suponen una relación lineal en los factores de potencia del cáncer son: La US EPA, Health Canadá y Cal. OEHHA (CAREX Canadá, 2011).



Fuente: CAREX Canadá, 2011.

Figura 8: Relación lineal curva dosis respuesta

d) Riesgo unitario

El riesgo unitario es el límite superior del exceso de riesgo de cáncer de por vida estimado, que resulta de la exposición continua a una sustancia toxica en una concentración de $1 \mu\text{g} / \text{m}^3$ en el aire. Por ejemplo, si el riesgo unitario fuera de 2×10^{-6} por $\mu\text{g} / \text{m}^3$, se esperaría que ocurran 2 casos de cáncer en exceso (estimación del límite superior) por cada 1.000.000 de personas, si se exponen todos los días durante toda la vida a $1 \mu\text{g}$ de la sustancia toxica por m^3 de aire (IRIS, 2011).

Distintas organizaciones han publicado unidades de riesgo para el arsénico, en base a la inhalación. Entre ellas se encuentran:

- US EPA ($4,3 \times 10^{-3} \mu\text{g} / \text{m}^3$)
- Cal. EPA ($3,3 \times 10^{-3} \mu\text{g} / \text{m}^3$ derivado en 1990 por CDHS)
- OMS ($1,5 \times 10^{-3} \mu\text{g} / \text{m}^3$ derivado en 1994 por Viren and Silver)

Las tres estimaciones tienen un factor de tres entre sí y se basan en estudios epidemiológicos de cáncer de pulmón en trabajadores de fundiciones de cobre (tabla 6). Cabe considerar que los estudios de cohorte de la OMS no mencionan si consideran el tabaquismo como medio de entrada del arsénico al organismo, a diferencia de las demás organizaciones (MassDEP,2011).

Tabla 6: Estimaciones del riesgo unitario ambiental para la US EPA ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Fundición	Estudio	Riesgo unitario	Media geométrica del riesgo unitario	Media geométrica del riesgo unitario final estimada
Anaconda	Brown and Chu	1,25E-3	2,56E-3	4,29E-3
	Lee-Feldstein	2,80E-3		
	Higgins et al.	4,90E-3		
ASARCO	Enterline & Marsh	6,81E-3 7,60E-3	7,19E-3	4,29E-3

Fuente: IRIS, 1995.

Donde finalmente (figura 9), la probabilidad de riesgo incremental de desarrollar cáncer se calculará a través de la multiplicación de la unidad de riesgo por inhalación (IUR) con la reducción de la sustancia a la que se ve expuesta la población. (Health Canada, 2010).

Riesgo cáncer = $IUR \times \Delta C$

Donde:

Riesgo cáncer: Probabilidad de riesgo incremental de desarrollar cáncer debido a la exposición de cierto contaminante.

IUR: Unidad de Riesgo por Inhalación, exceso de riesgo por la exposición a $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ del contaminante

ΔC : reducción sustancia ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) a la que se ve expuesta la población como resultado de la implementación de normativa

Fuente: MINAM, 2021

Figura 9: Ecuación de riesgo de cáncer

De la misma forma, si se quisiera obtener la concentración diaria a lo largo de la vida, con respecto a la OMS, solo bastaría dividir el Riesgo de cáncer que se quiere obtener (por ejemplo $=1 \times 10^{-6}$) con la Unidad de Riesgo por inhalación (OMS = $1,5 \times 10^{-3} \mu\text{g}/\text{m}^3$)

$$\begin{aligned} 1 \times 10^{-6} &= (1.5 \times 10^{-3} \mu\text{g} / \text{m}^3) \times \Delta C \\ \Delta C &= 6.66^{-4} = \mathbf{0.00066 \mu\text{g} / \text{m}^3} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 1 \times 10^{-5} &= (1.5 \times 10^{-3} \mu\text{g} / \text{m}^3) \times \Delta C \\ \Delta C &= 6.66^{-3} = \mathbf{0.0066 \mu\text{g} / \text{m}^3} \end{aligned}$$

Fuente: Elaboración propia

Figura 10: Cálculo de la concentración de arsénico, usando la unidad de riesgo de la OMS

6. Directrices o normativas vigentes

6.1. Estados Unidos (Regulación Federal U.S. EPA)

Estados Unidos posee una clasificación de contaminantes tóxicos o peligrosos, denominada HAP (Hazardous Air Pollutants), realizada a partir de evaluaciones de riesgo, considerando los efectos nocivos para la salud del ser humano y de los ecosistemas. En la actualidad no se ha establecido una normativa de calidad del aire para los HAP, pero si un enfoque regulatorio directamente en las emisiones de las industrias, aplicando nuevas tecnologías y desarrollando estándares más estrictos de emisión (MINAM, 2021).

Las agencias de EE. UU, han usado o derivado sus valores medios anuales del factor de riesgo de inhalación de $4,3 \times 10^{-3}$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de la US EPA. Entre ellas están: Massachusetts, Rhode Island, Michigan, Luisiana, Nueva Jersey, Carolina del Norte, Vermont y Washington. Mientras que cuatro agencias estatales: Texas, New Hampshire, Wisconsin y Ohio. Utilizan el valor límite umbral (TLV) de 8 horas correspondiente a $10 \mu\text{g m}^{-3}$ de la Conferencia Americana de Higienistas Industriales Gubernamentales (ACGIH) (Meridian Environmental Inc., 2011).

Por otro lado, el CDC de Maine implementó una directriz de aire ambiente de $0,003 \mu\text{g m}^{-3}$ fundada en el riesgo unitario de inhalación ($0,0033 \mu\text{g m}^{-3}$) de la Oficina de Evaluación de Peligros para la Salud Ambiental de California (CA-OEHHA) basado en un estudio de 1987, donde se menciona la incidencia de tumores en el pulmón a trabajadores expuestos arsénico inorgánico (Meridian Environmental Inc., 2011; CA-OEHHA, 2009). Esta organización también elaboro un REL crónico por inhalación de $0,015 \mu\text{g m}^{-3}$ para el arsénico inorgánico, basado en los efectos a nivel cardiovascular, nervioso, piel y de desarrollo en humanos (CA-OEHHA, 2008). Por otro lado, el REL agudo es de $0,20 \mu\text{g m}^{-3}$ y se basa en estudios con animales, observando un déficit en el desarrollo fetal en ratones. Además de efectos cardiovasculares y nerviosos (Meridian Environmental Inc., 2011; CA-OEHHA, 2008).

En el caso de la Agencia para Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades de los Estados Unidos (ATSDR) no expone criterios para el arsénico inorgánico u orgánico inhalado basado en la salud (ATSDR, 2021; Meridian Environmental Inc., 2011).

6.2. Agencias internacionales

La Unión Europea estableció un valor anual de $0,006 \mu\text{g m}^{-3}$ para el arsénico basado en la toxicidad por inhalación, el cual entró en vigor en diciembre del 2012, en todos los Estados miembros. Al superar este valor, se deben tomar medidas sobre las fuentes emisoras predominantes del contaminante, hasta alcanzar el valor indicado (MINAM, 2021). Como país miembro, Francia también asumió el valor objetivo analizado en el PM10. En su política ambiental señalan que todas las zonas urbanas (más de 250.000 habitantes) deben aplicar políticas públicas con el fin de limitar la contaminación atmosférica y cumplir todas las normas establecidas por el gobierno (The Law Library of Congress. 2018). Asimismo, la India, propone el mismo valor en sus Normas Nacionales de Calidad del Aire Ambiente (NAAQS) para el arsénico desde el 2009, en concentraciones de aire ambiente (MoEFCC, 2019).

En el caso del Ministerio de Medio Ambiente de Nueva Zelanda ha establecido un valor basado en la salud de $0,0055 \mu\text{g m}^{-3}$ como media anual, mencionado en las directrices de calidad del aire ambiente (AAQG).

En el caso de Canadá, aún no se han definidos normativas de calidad del aire en torno al arsénico. Pero si cuenta con lineamientos para este, a través del “Código de Prácticas Ambientales” la cual establece guías y practicas referente a las emisiones de aire, suelo y agua destinada para las fundiciones y refinerías. Además, de existir una autonomía regulatoria para sus provincias, en el caso de Ontario, establece criterios de calidad ambiental para el arsénico y sus componentes de $0,3 \mu\text{g m}^{-3}$ para las 24hr, basada en los efectos adversos para la salud producto de una inhalación aguda. Cabe destacar que es un valor deseable y no expresamente normativo, puede ser usado en estudios de calidad del aire exterior y en evaluaciones ambientales (MINAM, 2021; BURSCO, 2016).

Por otro lado, el Reino Unido determinó un pseudo umbral de $0,004$ a $0,013 \mu\text{g m}^{-3}$ basado en estudios LOAEL con aumento significativo de cáncer al pulmón desde dos fundiciones (Anaconda y Rönnskär), para posteriormente determinar un nivel de $0,006 \mu\text{g m}^{-3}$ de régimen anual para el As (GOV.UK., 2021).

6.3. Países Latinoamericanos

En el caso de los países latinoamericanos, solo Bolivia y Perú poseen una normativa en torno al arsénico en el aire. Bolivia a través de su Reglamento en Materia de Contaminación Atmosférica del año 1995, menciona criterios para ciertos contaminantes específicos, estableciendo una concentración límite permisible de calidad del aire para el arsénico de $0,05 \mu\text{g m}^{-3}$ como media aritmética anual (DS 24176/1995).

Perú en el año 2021 propuso el “Proyecto del Decreto Supremo que aprueba los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire para cadmio, arsénico y cromo en material particulado menor a diez micras (PM10)”. Propuesta dividida en dos fases (tabla 7). Lo anterior debido a las recomendaciones de la OCDE sobre ampliar las medidas de los planes de acción, para mejorar la calidad del aire (MINAM, 2021). Además de solicitar hacer medidas más eficaces, por medio de estudios económico del tipo costo – beneficio o coste – eficacia (OECD, 2016).

Tabla 7: Valores propuestos para los ECA sobre el arsénico.

Parámetro	Periodo	Valor ($\mu\text{g m}^{-3}$) Fase 1*	Valor ($\mu\text{g m}^{-3}$) Fase 2 **	Criterio de evaluación	Método de análisis
Arsénico en PM10	24 horas	0,3	0,3	Media aritmética de valores mensuales	Determinación de metales en material particulado mediante espectroscopia de fluorescencia de rayos X (XRF)
	Anual	0,05	0,012	Media aritmética anual	

Nota:

* Fase 1: Valores Intermedios de ECA (Desde el 2022)

** Fase 2: Valores objetivo de ECA (A partir del 2025)

Fuente: MINAM, 2021

En el caso de los demás países, como México, Colombia y Nicaragua, estos no cuentan con una normativa de calidad del aire ambiente para el arsénico, solo para los contaminantes criterio (ozono, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, monóxido de carbono y material particulado) (Calidad de aire, 2021; Resolución N°2254 de 2017; NTON 05 012-02).

Tabla 8: Resumen de los objetivos y directrices de calidad del aire ambiente para el arsénico.

Agencia	Objetivo Título	Tiempo ($\mu\text{g m}^{-3}$)	
		24 horas	Anual
Ontario (OME).	Criterio de calidad del aire ambiente (AAQC)	0,3	-
Alberta	Objetivo de calidad del aire ambiente	-	0,01
Québec DDEP	Valor limite	-	0,003
California EPA/OEHHA	Nivel de exposición de referencia	0,015 [8 horas]	0,015 [crónica]
DEQ de Luisiana	Norma de aire ambiente	0,24 [8 horas]	0,02
CDC de Maine	Directrices sobre el aire ambiente	-	0,0023
DEP de Massachusetts	Efectos del umbral Límite de exposición	0,003	-
	Límite ambiental admisible	-	0,0003
New Hampshire DES	Límite de aire ambiente	0,036	0,024
Carolina del Norte DENR	Nivel ambiental aceptable	-	0,00023
Rhode Island DEM	Nivel ambiental aceptable	-	0,0002
Vermont ANR	Norma de aire ambiente peligroso	-	0,00023
MOE de Nueva Zelanda	Directrices sobre el aire	-	0,0055
Unión Europea	Valor objetivo	-	0,006
Ministerio de Transición Ecológica Francia	Normas del Código Ambiental	-	0,006
Ministerio de Medio Ambiente, Bosques y Cambio Climático de la India	Normas nacionales de calidad del aire ambiente	-	0,006
China	límite de calidad del aire	-	0,006
Ministerio de Medio Ambiente y Agua Bolivia	Concentración límite permisible	-	0,05
Ministerio del Medio Ambiente (Perú)	Estándares de Calidad Ambiental	Fase 1	0,3
		Fase 2	0,3
			0,05
			0,012

Fuente: Elaboración propia en base a Meridian Environmental Inc., 2011. Actualizada al 2021.

7. Métodos de muestreo y análisis del aire

El arsénico es capaz de estar presente en el aire ambiente en forma gaseosa y en forma de partículas asociadas a otros compuestos en suspensión. Por ende, en la actualidad no es posible medirlo de forma directa (Vishwakarma et al., 2021). Pero si, por medio del conjunto de metales traza. Existen tres (US EPA, NIOSH, OSHA) organizaciones que describieron metodologías documentadas y analizadas para la determinación de estos metales, tanto en el aire exterior, como interior (Meridian Environmental Inc, 2011). A continuación, se describen los métodos más usados para la determinación de la concentración del arsénico en el aire.

7.1. Métodos NIOSH 7302 y 7306

En Canadá, específicamente en Alberta, son utilizados los métodos de NIOSH para el muestreo de aire ambiente, usando filtros de éster de celulosa mixtos o muestreadores de Partisol para la recolección de muestras (Meridian Environmental Inc, 2011).

NIOSH 7302: Este método utiliza la digestión por microondas, haciendo un análisis elemental simultaneo, analiza el polvo metálico y no metálico recogido de los filtros que poseen una membrana de éster de celulosa mixta (MCE) de 37mm de diámetro, con tamaño de poro de 0,8 μm (NIOSH, 2014).

NIOSH 7306: La técnica en este método es simultanea para todos los compuestos, por ende, no es de un elemento en específico. Utiliza capsulas internas unida a un filtro de MCE, alojado dentro de un cassette de 2 piezas de 37mm de diámetro. El rango que trabaja abarca desde $4 \times 10^{-5} \text{ mg/m}^3$ a 10 mg/m^3 para cada elemento en una muestra de aire con volumen de 500 L. Hay que tener especial cuidado, en que los tipos de compuestos en las muestras sean solubles con el procedimiento de disolución seleccionado. Además, algunos compuestos pueden requerir tratamiento especial de la muestra (NIOSH, 2015).

7.2. Métodos de Muestreo

Los métodos de muestreos son usados para determinar la concentración media de partículas en el ambiente, además de analizar el material recogido en busca de metales inorgánicos u otros componentes. Antes de seleccionar un buen sistema de muestreo hay que determinar el rango de tamaño de partículas a controlar, el método de análisis y que metal traza es de interés. Cabe mencionar que todos tienen sus ventajas y desventajas. Además, solo algunos métodos de análisis son compatibles con cada sistema de muestreo. Entre los métodos más documentados se encuentran los muestreadores de gran volumen para recoger TSP (partículas totales en suspensión con diámetros aerodinámicos inferiores a 100 μm), y los muestreadores de bajo volumen (dicotómicos y de Partisol) para recoger PM10 (<10 μm) y PM2.5 (< 2,5 μm) (Vishwakarma et al., 2021; Meridian Environmental Inc, 2011).

7.2.1. Muestreador de alto volumen

Es uno de los más usados para tomar muestras de material particulado en un volumen de aire ambiente con el objetivo de identificar y cuantificar los metales inorgánicos presentes. Asimismo, es recomendado por la mayoría de las agencias de calidad del aire, incluida la US EPA y Environment Canadá. El sistema consiste en la incorporación de un filtro de fibra de vidrio (recolección 100 μm o menos) o de cuarzo (recolección 10 μm o menos) por donde atraviesa el aire, que mediante un soplador de velocidad 1,13 – 1,70 $\text{m}^3 \text{min}^{-1}$ acumula el MP en la superficie del filtro (Meridian Environmental Inc, 2011). Una de sus características principales son sus velocidades de flujo más altas, recolectando más materiales. Esto puede traer distintas consecuencias ya que recoge todo tipo de compuestos u objetos extraños (aerosoles líquidos, gases, insectos), lo que puede causar interferencias con algunos tipos de filtros. Si el medio filtrante y la técnica de análisis son idénticos, se pueden detectar concentraciones más bajas de compuestos inorgánicos en el exterior. Para poder determinar la concentración en masa de las partículas en suspensión, primero se mide la masa de las partículas recogidas, seguido del volumen del aire recolectado. Una vez hecho esto, el filtro se extrae y se determina la concentración de metales, a través de métodos analíticos que se explicaran más adelante (Meridian Environmental Inc, 2011).

A nivel nacional el DS 477/1994 del Ministerio de Salud, propuso utilizar muestreadores de alto volumen del PM10, para posteriormente hacer uso de espectrofotometría de absorción atómica (AAS), o cualquier derivado (MINSAL, 1994).

7.2.2. Muestreador dicotómico

Los muestreadores dicotómicos poseen dos filtros, uno de recolección central para partículas gruesas (2,5 a 10 μm) y un segundo filtro para partículas finas (<2,5 μm). Por ende, se puede obtener información de ambas o de una de las fracciones. Posee un caudal bajo de recolección de aire ambiente de 1 $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$. Pudiendo usar cualquier tipo de filtros, ya que algunos de estos se obstruyen fácilmente con caudales altos. El límite de detección depende, tanto del volumen de aire muestreado, como de la sensibilidad de la balanza analítica. Esta última usada para la determinación gravimétrica, con la cual se determina la concentración en masa de las partículas presentes en el aire. Las partículas son recogidas en filtros de teflón, para posteriormente ser analizadas por técnicas de espectrometría de fluorescencia de rayos X (XRF), entre otros (Meridian Environmental Inc, 2011).

7.2.3. Muestreador Partisol

Es un tipo de muestreador manual, controlado por un microprocesador, que realiza la selección del tamaño de partículas. Absorbe un bajo volumen de 16,7 L min^{-1} de PM10 o PM2,5 y utiliza un filtro de cuarzo, además de un vidrio recubierto por teflón. El sistema posee sensores que van midiendo la temperatura y la presión ambiental. A través de esta información se mantiene el flujo volumétrico prescrito, también presenta un sistema de control de flujo másico. Para determinar la composición de las partículas del filtro (47mm), se pueden usar las técnicas de espectrometría de fluorescencia de rayos X (XRF), entre otras. (Meridian Environmental Inc., 2011).

7.3. Métodos analíticos

Como el arsénico es considerado un metal traza, se pueden usar métodos analíticos especiales en la estimación de concentración de metales traza. Existe una gran variedad de métodos con distintos atributos, especificidades, ventajas y desventajas (Meridian Environmental Inc., 2011). Entre los más significativos se encuentran: El plasma acoplado inductivamente (ICP), la espectrometría de absorción atómica (AAS) y la espectrometría de fluorescencia de rayos X (XRF) (Vishwakarma et al., 2021).

7.3.1. Plasma acoplado inductivamente/Espectroscopia Masa (ICP/MS)

El análisis de ICP/MS es el más popular en Canadá usado en conjunto con muestreadores de gran volumen e involucra la interacción de partículas con una corriente de gas argón formando un plasma acoplado por ionización, generando iones elementales que se separan e identifican por el espectrofotómetro de masas (Vishwakarma et al., 2021). Se destaca por distinguir simultáneamente más de sesenta elementos e isotopos, pero requiere gran cantidad de tiempo ya que las muestras deben ser extraídas, además de ser un análisis destructivo y costoso (Meridian Environmental Inc., 2011).

7.3.2. Espectroscopia de absorción atómica (AAS)

En este método los metales traza de una muestra de material particulado, se extraen por ácido caliente o por microondas en una solución, para después ser vaporizados en una llama ionizante, pasando por un haz de luz con el objetivo de registrar la absorción de la luz, determinando la cantidad de metal presente (Vishwakarma et al., 2021). Existen dos tipos: La espectroscopia de absorción atómica de llama (FAA) y la espectroscopia de absorción atómica en horno de grafito (GFAA). Las cuales tienen similares principios de medición, difiriendo en la forma de introducir la muestra en el instrumento. En la primera después de atomizar la muestra se introduce en el haz óptico por medio de una llama (aire/acetileno u óxido nitroso/acetileno), en cambio en la GFAA se utiliza un atomizador electrotérmico de horno de grafito. Esta última suele tener dos órdenes de magnitud en el límite de detección, lo cual la hace mejor que la FAA (Meridian Environmental Inc., 2011).

7.3.3. Espectroscopia de fluorescencia de rayos X (XRF)

En esta técnica, se usa un espectrómetro que capta los rayos X, emitidos desde cada elemento de la muestra. De esta manera se identifica el elemento y se cuantifica su concentración. Pudiéndose determinar simultáneamente varios elementos, con pesos atómicos que van desde el sodio (11) hasta el uranio (92). Esta técnica posee grandes ventajas, ya que es rápida, de carácter no destructivo, requiriendo una preparación mínima de la muestra, además de ser un equipo de bajo costo. Sin embargo, requiere un depósito de recogida fina (10 a 50 $\mu\text{g cm}^{-2}$), trayendo consigo complejas correcciones de matriz.

Este método es óptimo en muestreadores dicotómicos o en los de Partisol que usan filtros de teflón o nylon (Meridian Environmental Inc., 2011). En el caso del arsénico, el límite de detección típico encontrado fue de 100 ng cm^{-2} durante los primeros 10 minutos, experimento realizado por Harrison (1986) usando el análisis de dispersión de energía (Vishwakarma et al., 2021).

8. Proyectos realizados en Chile

8.1. Fondef: “Protección de la competitividad de los productos mineros de Chile: Antecedentes y criterios para la regulación ambiental del arsénico”

Este proyecto incluyó la elaboración de un programa de muestreo en terreno, análisis de laboratorio y estandarización de metodologías analíticas para la determinación del arsénico. Además de entregar antecedentes para hacer una evaluación riesgo-costos, considerando las emisiones de las fundiciones de cobre, las cuales se encuentran en la II Región (Chuquicamata y La Negra), III Región (Paipote y Potrerillos), V Región (Chagres y Ventanas) y VI Región (Caletones).

Para la línea base de alimentos y agua se muestrearon todas las regiones y para aire se muestreo desde la primera a octava región. El muestreo de aire se hizo por medio de 11 estaciones ya establecidas en las fundiciones a lo largo del país. La concentración natural de las zonas impactadas por estas últimas se calculó de manera indirecta a través de supuestos que relacionan las condiciones geológicas y

la dirección del viento en zonas de condiciones similares a las que se ubican las fundiciones. En el caso del monitoreo de las zonas pobladas, fue a través de estaciones instaladas por el proyecto, ubicadas en Iquique, Antofagasta, Viña del Mar, Santiago, Rancagua, Talca y Concepción (Sancha, A., 1997).

Los resultados fueron presentados en 1997 los cuales recomiendan realizar una norma de emisión eficiente, por el hecho de que esta normativa permite llegar a mayores reducciones en las tasas de mortalidad (Pudiendo evitar entre 3,2 a 3,7 muertes anualmente), además de ser un instrumento de menor costo a diferencia de una norma de calidad. Por ejemplo, para una norma de calidad de concentraciones entre 0,2 y 0,08 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ tiene costos de US\$36 millones y US\$ 65 millones, respectivamente. En cambio, con una norma de emisión eficiente que logre una reducción de mortalidad, pero que posea una mayor flexibilidad, los costos sería de US\$5 millones a US\$ 65 millones (Sancha, A., 1997). Asimismo, se señala que, si se instaurara una norma de calidad primaria, de límite 0,07 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ la mayoría de las fundiciones deberían cerrar, ya que el precio de cumplir con esta normativa con lleva un alto costo en tecnología, el cual no sería rentable para la empresa. A esto se le suma el problema presente en el norte del país, el cual tiene altos niveles de arsénico de origen natural, presentando un nivel base natural de 0,08 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de arsénico, por ende, ninguna fundición de ese sector cumpliría con la normativa, a diferencia de las demás fundiciones (Chagres, Caletones, Las Ventanas) que se encuentran en zonas con bajo nivel natural de arsénico (0,01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), las cuales podrían cumplir con la normativa e incluso con costos relativamente bajos (Díaz, M & Oryan, R., 1998).

En el estudio anterior también se realizó un análisis de sensibilidad, ya que existe alta incertidumbre con respecto al nivel base natural de concentraciones en arsénico, específicamente en el norte del país. Por ende, se definieron tres casos (ver tabla 9) respecto al nivel base natural: Caso base, mejor caso (menor nivel base natural), peor caso (mayor nivel base natural).

Tabla 9: Incertidumbre en los niveles base natural para las zonas afectadas

Fundición	Caso Base ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Mejor Caso ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Peor Caso ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Fundición 1	0,10	0,08	0,12
Fundición 2	0,08	0,05	0,10
Zona norte			
Fundición 3	0,01	0,008	0,015
Fundición 4	0,08	0,05	0,10
Zona norte			
Fundición 5	0,01	0,008	0,015
Fundición 6	0,01	0,008	0,015
Fundición 7	0,08	0,05	0,10
Zona norte			

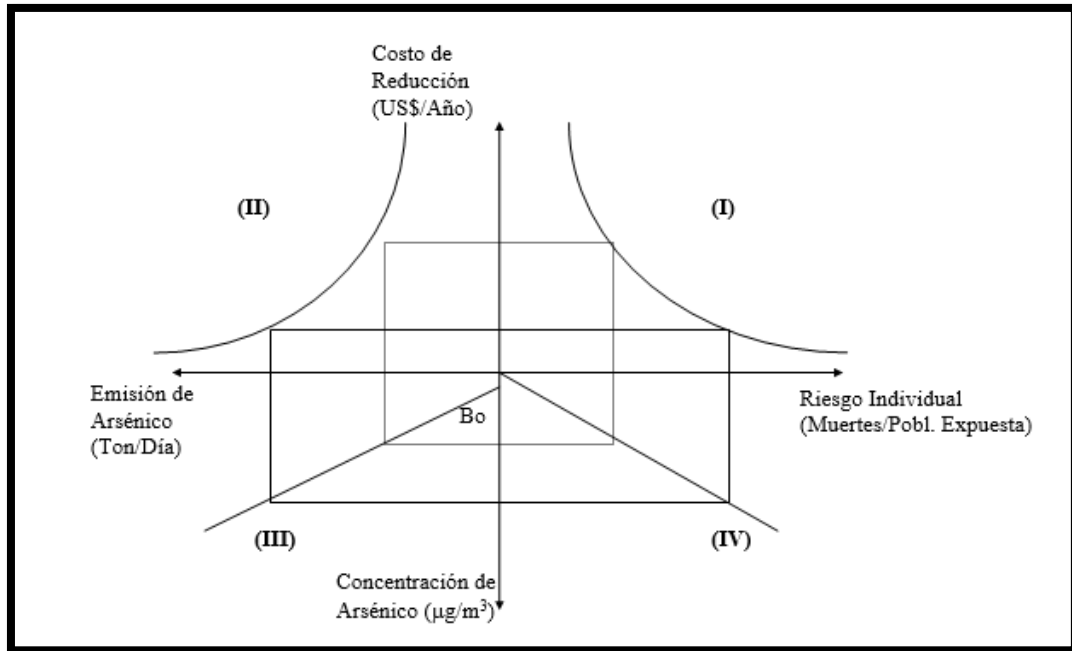
Fuente: Díaz, M & Oryan, R., 1998.

Utilizando los valores anteriores se realizó una sensibilización de los costos y se desarrolló una tasa de reducción de mortalidad.

8.2. Análisis costo beneficio

A nivel nacional se hace un Análisis General del Impacto Económico y Social (AGIES), para dictar normas de calidad ambiental y de emisión, además de los planes de prevención y descontaminación. La cual presenta un análisis costo beneficio, donde se dispone de elementos estimativos, en búsqueda de determinar que opción de política es más adecuada en términos económicos (MINAM, 2021; Guzmán, 2019).

En palabras simples la evaluación (ver figura 11) parte desde un rango de valores posibles para la normativa de calidad, donde se relaciona cada fuente (chimenea o fugitivas) a un cierto nivel de emisión, calculado a través de un modelo de dispersión. Para que finalmente se obtenga una meta de calidad (concentración de As en el ambiente + concentración base natural), un riesgo implícito, muertes evitadas por localidad respecto de la situación base y un costo asociado para cada fundición (Díaz, M & Oryan, R., 1998.)



Fuente: Díaz, M & Oryan, R., 1998.

Figura 11: Forma esquemática de las distintas etapas del análisis riesgo – costo

A continuación, la tabla 10 explica el proceso de riesgo – costo, partiendo desde el cuadrante 2.

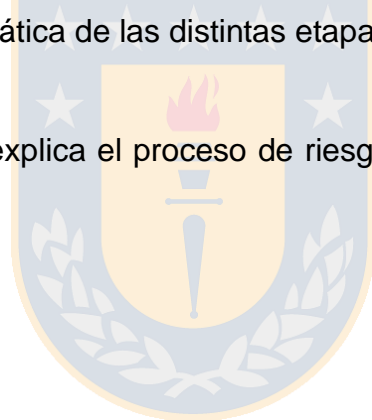


Tabla 10: Explicación del esquema de análisis riesgo - costo

Cuadrantes	Descripción
<p>Cuadrante 2: X: Emisión de arsénico (ton/día) Y: Costo de reducción (US\$ / AÑO)</p>	<p>Es la relación entre las reducciones de emisiones de As, con los costos que tendría cada reducción para cada una de las fundiciones (incluye niveles actuales y futuros)</p>
<p>Cuadrante 3: X: Emisión de arsénico (ton/día) Y: concentración de arsénico (ug/m3)</p>	<p>Relaciona las emisiones de cada fundición con la concentración (es decir, como se dispersa el contaminante en la localidad desde las fundiciones) que se genera en las localidades</p>
<p>Cuadrante 4: X: Riesgo individual (muertes / población expuesta) Y: concentración de arsénico (ug/m3)</p>	<p>Relaciona la concentración de As en el ambiente y el riesgo individual (se considera el cáncer al pulmón, ya que esta mayormente descrito y es el único que cuenta con valores de riesgo unitario) de la población que allí habita (localidades a una distancia menor de 30km de las fuentes)</p>
<p>Cuadrante 1: X: Riesgo individual (muertes / población expuesta) Y: Costo de reducción (US\$ / AÑO)</p>	<p>Una vez ya calculado el cuadrante 4 se relaciona el riesgo individual al cual están sometidas las personas y el costo de reducción a ese nivel de riesgo.</p>

Fuente: Díaz, M & Oryan, R., 1998.

Del cuarto cuadrante es posible extrapolar el valor de riesgo, y así poderlo aplicar a cada población, obteniendo un número de muertes asociado a la exposición, así como las muertes evitadas y su costo asociado (ver tabla 11). En base a esto, se desprende que si se impone una normativa de calidad primaria para el arsénico de $0,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sería muy beneficioso para tres fundiciones, ya que al modificar sus emisiones existiría una recuperación del ácido y menores costos de producción. Por otro lado, si

se instaurara una normativa de calidad de $0,05 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el As, existiría un costo anual de US\$ 90 millones la cual evita casi la misma cantidad de muertes que una normativa de $0,15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con la diferencia de que esta última, posee un costo menor (US\$ 38 millones) (Díaz, M & Oryan, R., 1998).

Tabla 11: Costos por muerte evitada para distintos valores de norma de calidad

Norma de Calidad	Muertes Evitadas	Costos de Reducción	Costos por Muerte Evitada
$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Muertes/Año	MUS\$/Año	MUS\$/Muerte
2,5	1,82	-12,8	-7,0
1	2,95	-12,4	-4,2
0,7	3,21	-8,6	-2,7
0,5	3,26	-6,7	-2,0
0,3	3,32	-0,2	0,0
0,2	3,42	35,6	10,4
0,15	3,52	38,3	10,9
0,1	3,70	52,2	14,1
0,09	3,81	64,2	16,9
0,08	3,81	64,8	17,0
0,07	3,82	80,7	21,1
0,05	3,84	90,3	23,5
0,025	3,87	146,2	37,8

Fuente: Díaz, M & Oryan, R., 1998.

9. Enfoques más adecuados a implementar en Chile

A continuación, se presentan distintos valores que podrían ser considerados para una posible normativa primaria de calidad del aire sobre el arsénico, basados en los efectos sobre el ser humano.

Tabla 12: Posibles valores a normar respecto a efectos cancerígenos y no cancerígenos.

Agencia	Valor límite	Valor anual [ng/m ³]	Descripción
Unión Europea	Valor límite (basado en efectos no cancerígenos)	100	A partir de ese valor se puede esperar efectos sobre el sistema cardiovascular, neuropatía periférica e irritación de tracto respiratorio superior.
Reino Unido	Valor límite basado en el cáncer	6	En base a efectos de riesgo de cáncer al pulmón en trabajadores, adaptado a la población en general, donde no se esperan riesgos significativos para la salud humana.
Organización Mundial de la Salud	Valor límite basado en el cáncer, enfoque de riesgo unitario	60	Asociada a un riesgo de
		6	1 en 10.000 = 0,066 ug/m ³ (60 ng/m ³)
		0,6	1 en 100.000 = 0,0066 ug/m ³ (6 ng/m ³) 1 en 1.000.000 = 0,00066 ug/m ³ (0,6 ng/m ³)
Instituto Holandés de Salud Pública y Medio Ambiente	Valor límite basado en el cáncer y no cáncer, enfoque de umbral	50	Valor proveniente de lugares de trabajo adaptado a la población general.

Fuente: European Communities, 2001.

Sobre la base anterior, el valor límite de 100 ng/m³ no se encuentra adecuado para una posible normativa, ya que no proporcionaría una protección suficiente con respecto al cáncer. En el caso del valor de la OMS de 0,6 ng/m³, es probable que sobreestime el verdadero riesgo, aunque no se sabría esto a ciencia exacta, ya que el arsénico al ser una sustancia cancerígena no posee umbral (GOV.UK., 2021).

En cambio, el valor límite de la OMS de 6 ng/m³ se considera representativo de un riesgo mínimo para la salud humana (GOV.UK., 2021; IRIS, 1995). Asimismo, este valor ha sido seleccionado por China, la India y Reino Unido, como así también lo

propone La Unión Europea, que integra 28 países en su organización (Wang, et al., 2020; WHO, 2000; DIRECTIVE, 2004/107/EC).

Como Chile presenta altas concentraciones de arsénico en el aire (tabla13), similares a las altas concentraciones de la India y China. Esta investigación propone un valor límite de arsénico en el aire de 6 ng/m³ como medida anual al igual que lo han hecho los demás países afectados.

Tabla 13:Concentraciones de arsénico en el aire, principales zonas impactadas

Lugar	Concentración en el aire [ng/m ³]	Año
Agra, India	5-35	2018
Quillota, Chile	31	1999-2000
Shanghái, China	27	2004-2005
Beijing, China	18	2005
Quillagua, Chile	6,5	1999-2000
Sichuan, China	6,1	2006
Reino Unido	5-7	2000
Unión Europea	0,5-3	2001

Fuente: Vishwakarma et al., 2021; Sah, et al., 2019; European Communities. 2001; Department of the Environment, Transport and the Regions, 2000

Cabe destacar que este valor propuesto solo serviría si el nivel base natural de arsénico es menor, por ende, se necesitan mas estudios respecto al nivel base sobre todo en el norte del país. ya que la concentración resultante (limite propuesto) de As es la suma de este nivel base y el aporte respectivo de cada fuente (Díaz, M & Oryan, R., 1998).

10. Conclusiones

Este estudio investigó acerca del estado del arte, respecto a la normativa sobre arsénico en el aire, dando a conocer estudios técnicos y científicos básicos para una futura Norma Primaria de Calidad del Aire para el arsénico en Chile. Debido a la preocupante situación que presenta Chile al contar con altos niveles de arsénico en el aire, producidos principalmente por emisiones desde las fundiciones de cobre, problemática que ha permanecido durante décadas, afectando la salud de la población. A esto se le suma los niveles naturales de As que posee la zona norte del país.

Investigaciones anteriores, sobre zonas afectadas por el arsénico, han ayudado a comprender mejor este problema en particular. Siendo de gran ayuda el proyecto FONDEF (Protección de la competitividad de los productos mineros de Chile: Antecedentes y criterios para la regulación ambiental del arsénico), presentado en 1997 donde menciona los niveles base naturales de arsénico en Chile (0,08 ug/m³ en el norte y 0,01 ug/m³ en el sur), dando una perspectiva sobre el país. Sin embargo, es un estudio bastante antiguo y es necesario de que existan investigaciones más actuales, para determinar el correcto nivel basal del arsénico, ya que probablemente este nivel haya cambiado con el tiempo. Como así también, estudios que evalúen la exposición al arsénico en la población, en especial en las zonas donde están las fuentes puntuales. (áreas mineras y rurales).

El presente estudio propone el valor de la OMS (6 ng/m³), como valor objetivo para el arsénico en Chile, producto de que países con altos contenido de arsénico en el aire al igual que Chile, acogieron la misma normativa, además de la Unión Europea.

En definitiva, gracias a estos estudios es posible dar los primeros indicios sobre cómo instaurar una normativa de calidad ambiental para el arsénico en el aire a nivel nacional y es de esperar que sirva de ayuda a los distintos ministerios y organizaciones de salud.

11. Referencias

1. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (2021). Minimal risk levels (MRLs). U.S. Department of Health & Human Services. [Microsoft Word - ATSDR MRLs - May 2021 - H - PFAS and back to old TSP URLs.docx \(cdc.gov\)](#)
2. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (31 de mayo de 2016). *Step 2.3 Evaluating Exposures for Possible Health Effects*. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. https://www.atsdr.cdc.gov/training/pha_professional2/html/module3/sv13.1.html
3. Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2009). Minimal Risk Levels (MRLs) for Hazardous Substances. ATSDR, Public Health Service, US Department of Health and Human Services. Atlanta, GA. Available at: <http://www.atsdr.cdc.gov/mrls.html>
4. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (2007). Toxicological Profile for Arsenic. U.S. Department of Health and Human Services. Agosto 2007. <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp2.pdf>
5. Aranyi C, Bradof JN, O'Shea WJ, et al. (1985). Effects of arsenic trioxide inhalation exposure on pulmonary antibacterial defenses in mice. *J Toxicol Environ Health* 15:163-172.
6. Asamblea Nacional de la República de Nicaragua. (2002). NTON 05 012-02. Norma técnica obligatoria nicaragüense de calidad del aire. Publicada en La Gaceta N° 211, del 06 de Noviembre del 2002. Nicaragua. [http://legislacion.asamblea.gob.ni/normaweb.nsf/\(\\$All\)/A7D9462EF09F1931062571320055ED61?OpenDocument](http://legislacion.asamblea.gob.ni/normaweb.nsf/($All)/A7D9462EF09F1931062571320055ED61?OpenDocument)
7. BURNGO. (2016). *Air Screening*. Golder Associates Ltd. <https://www.acee-ceaa.gc.ca/050/documents/p54754/115270E.pdf>
8. Calidad de aire. El monitoreo de la calidad del aire: Normatividad. Consultado el 25 de mayo de 2021. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhtml=%27&dc=Yw==>
9. California Office of Environmental Health Hazard Assessment. (2009). Air Toxics Hot Spots Program Technical Support Document for Cancer Potencies.

Appendix B. OEHHA., Cal EPA. Oakland, CA. Appendix B with 2011 approved TEFs (ca.gov)

10. California Office of Environmental Health Hazard Assessment. (2008). Technical Support Document for Noncancer RELs, Appendix D1. OEHHA. Cal EPA. Oakland, CA.
11. California Environmental Protection Agency (Cal EPA). (1999). Determination of Acute Reference Exposure Levels for Airborne Toxicants. Office of Environmental Health Hazard Assessment, Air Toxicology and Epidemiology Section, Cal EPA. Oakland, CA. March 1999.
12. CAREX Canadá. (2011). Methods for Lifetime Excess Cancer Risk Estimates Environmental Exposures. Canadian Partnership Against Cancer. Canada. https://www.carexcanada.ca/LECR%20Methods_Final.pdf
13. Castillo, H. & Venegas, G. (2010). Impacto y consecuencias del Arsénico en la salud y el medio ambiente en el Norte de Chile. Revista Interamericana de Ambiente y Turismo, 6(1), 53-60. <https://riat.utralca.cl/index.php/test/article/viewFile/65/56>
14. Centro Canadiense de Salud y Seguridad Ocupacional. (2017, 15 de febrero). Higiene ocupacional - Límites de exposición ocupacional. https://www.ccohs.ca/oshanswers/hsprograms/occ_hygiene/occ_exposure_limits.html
15. CONAMA (2009) Plan Maestro de Intervención Zonas con Presencia de Polimetales en Arica. Comisión Nacional del Medio Ambiente. Arica y Parinacota. Gobierno de Chile. <http://www.fima.cl/site/wp-content/uploads/2009/10/Plan-Maestro-Contaminacion-Arica.pdf>
16. Contreras, C. G. (2014). *Problemas de salud en Ventanas: ¿Por qué existen si la Zona Cumple con la Normativa Ambiental? Oportunidad para Mejores Regulaciones Ambientales a partir de Directrices OCDE*. Tesis para optar al Grado de Magíster en Políticas Públicas Universidad de Chile. <http://www.repositorio.uchile.cl/handle/2250/129893>
17. Cortes, S., Pino, P., Atalah, E., Silva, C. & Jara, M. (2004). Exposición a arsénico ambiental en niños de Antofagasta, II región, Chile. https://www.researchgate.net/publication/306239665_EXPOSICION_A_ARSE_NICO_AMBIENTAL_EN_NINOS_DE_ANTOFAGASTA_II_REGION_CHILE

18. Department of the Environment United Kingdom (2000). A Review of Arsenic in Ambient Air in the UK. Scottish Executive. The National Assembly for Wales. <https://uk-air.defra.gov.uk/assets/documents/reports/empire/arsenic00/arsenic.htm>
19. Díaz, M. & Oryan, R. (1998). Análisis riesgo - costo para la regulación de sustancias tóxicas emitidas a la atmósfera en un contexto de desarrollo: El caso del arsénico en Chile. Serie Economía. Universidad de Chile, no.31.36 p. <http://dii.uchile.cl/progea/publicaciones/ere%20espanol.doc>
20. D.5. No. 28 de 2013 [Ministerio del Medio Ambiente]. Establece Norma de Emisión para Fundiciones de Cobre y Fuentes Emisoras de Arsénico. 30 de julio de 2013. D.O. 12.12.2013.
21. D.S. No. 75, de 2008 [Ministerio Secretaría General de la Presidencia]. Modifica Norma de Emisión para la Regulación del Contaminante Arsénico Emitido al Aire Contenida en el DS. N° 165 de 1999, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República. 22 de julio de 2008. D.O. 26.12.2008.
22. D. S. No. 165 de 1999 [Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República]. Establece Norma de Emisión para la Regulación del Contaminante Arsénico Emitido al Aire. 27 de octubre de 1998. D.O. 02.06.1999.
23. D.S. No. 477 de 1994 [Ministerio de Salud]. Establece Norma Primaria de Calidad del Aire para Arsénico. 28 de enero de 1994. D.O. 18.04.1994.
24. D.S. No. 1.364 de 1994 [Ministerio de Salud]. Deroga Decreto N° 477, de 1994. 06 de mayo de 1994. D.O. 14.06.1994
25. Duan, J., Tan, J. (2013). Atmospheric heavy metals and Arsenic in China: Situation, sources and control policies, Atmospheric Environment, 74, 93-101. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1352231013002070>
26. Enterline E., Henderson L., Marsh M. (1987a). Exposure to arsenic and respiratory cancer: A reanalysis. Am J Epidemiol 125(6):929-938.

27. Enterline E., Marsh M., Esmen A.. (1987b). Some effects of cigarette smoking, arsenic, and SO₂ on mortality among U.S. copper smelter workers. *J Occup Med* 29(10):831-838.
28. European Chemicals Agency. (2013). *Services to Support the Assessment of Remaining Cancer Risks Related to the Use of Chromium- and Arsenic-Containing Substances in Applications of Authorisation: Final Report for Cr VI*. Finland, Helsinki.
https://echa.europa.eu/documents/10162/13641/asernic_nov13_en.pdf/c144cc3e-bf48-d6d6-cb6a-b90ece3e4ba5
29. European Communities. (2001). Ambient air pollution by AS, CD and NI compounds. Position Paper Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.
https://ec.europa.eu/environment/archives/air/pdf/pp_as_cd_ni.pdf
30. European Union. (2004). Directive 2004/107/EC of the European parliament and of the Council of 15 December 2004 relating to arsenic, cadmium, mercury, nickel and polycyclic aromatic hydrocarbons in ambient air. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2005:023:0003:0016:EN:PDF>
31. Ferreccio C. & Sancha A. (2006). Arsenic exposure and its impact on health in Chile. *Journal Of Health Population And Nutrition*, 24(2), 164-175. URI: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/124860>
32. Fundación Terram. (2018). Termoelectricidad a carbón y las precarias normativas de emisión y calidad del aire en Chile. Comunicación para el Examen Periódico Universal, (EPU) Chile.
https://www.terram.cl/descargar/documentos_enalianza/Informe-EPU-Termoelectricidad-a-carbon-y-las-precarias-normativas-de-emision-y-calidad-del-aire-en-Chile-Julio-2018-PDF.pdf
33. Gerardo Guzmán. (2019). Arsénico, institucionalidad ambiental y el valor de la Vida. *Cuadernos Médicos Sociales (Chile)*, 59 (1): 39-46.
https://defensoriaambiental.org/wp-content/uploads/Cuadernos-Medicos-Sociales_2019_Vol_59_N1.pdf
34. Gidhagen L., Kahelin H., Schmidt-Thomé P., Johansson, C. (2002). Anthropogenic and natural levels of arsenic in PM₁₀ in Central and Northern

Chile. Atmospheric Environment. Volume 36. Issue 23. Pages 3803-3817.
[https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00284-4](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00284-4).

35. GOV.UK. (3 de septiembre de 2021). Consultation response document: new EALs for emissions to air.
<https://www.gov.uk/government/consultations/environmental-assessment-levels-eals-used-in-air-emissions-risk-assessments/public-feedback/consultation-response-document-new-eals-for-emissions-to-air#references>
36. Health Canada. (2010). Part 1: Guidance on Human Health Preliminary Quantitative Risk Assessment (PQRA), Version 2.0. Federal Contaminated Site Risk Assessment in Canada.
https://publications.gc.ca/collections/collection_2018/sc-hc/H128-1-11-632-eng.pdf
37. Holson JF, Stump DG, Ulrich CE. (1999). Absence of prenatal developmental toxicity from inhaled arsenic trioxide in rats. *Toxicol Sci* 51:87-97.
38. Icaza, G., Núñez L., Torres, F., Díaz, N. & Várela, D. (2007). Distribución geográfica de mortalidad por tumores malignos de estómago, tráquea, bronquios y pulmón, Chile 1997-2004. *Revista médica de Chile*, 135(11), 1397-1405. <https://dx.doi.org/10.4067/S0034-98872007001100005>
39. Integrated Risk Information System. (2011). *Integrated Risk Information System (IRIS) Glossary*.
https://sor.epa.gov/sor_internet/registry/termreg/searchandretrieve/glossariesandkeywordlists/search.do?details=&vocabName=IRIS%20Glossary
40. Integrated Risk Information System. (1995). *Chemical Assessment Summary: Arsenic, inorganic; CASRN 7440-38-2*. U.S. Environmental Protection Agency.
https://iris.epa.gov/static/pdfs/0278_summary.pdf
41. Instituto de Salud Pública de Chile. (2015). Exposición Laboral a Arsénico. Departamento Salud Ocupacional.
<https://www.ispch.cl/sites/default/files/NotaT%C3%A9cnica%20N%C2%B0%20024%20Exposici%C3%B3n%20Laboral%20a%20Ars%C3%A9nico.pdf>
42. Ize, I., Zuk, M., Rojas, L. (Eds.). (2010). *Introducción al análisis de riesgos ambientales*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología.

[https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/E50951BDD32362E005257D4D0074F7D1/\\$FILE/Introducci%C3%B3nAlAn%C3%A1lisisDeRiesgosAmbientales.pdf](https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/E50951BDD32362E005257D4D0074F7D1/$FILE/Introducci%C3%B3nAlAn%C3%A1lisisDeRiesgosAmbientales.pdf)

43. Larson, D. (2020). Review of Hydrogen Fluoride. Department of Environmental Services Air Resources Division. The Environmental Health Program. State of New Hampshire. <https://www4.des.state.nh.us/nh-pfas-investigation/wp-content/uploads/330110016518-0227TypeLetter6.pdf>
44. Lagerkvist BJ, Zetterlund B. (1994). Assessment of exposure to arsenic among smelter workers: A five-year follow-up. *Am J Ind Med* 25(4):477-488.
45. Lagerkvist B, Linderholm H, Nordberg GF. (1986). Vasospastic tendency and Raynaud's phenomenon in smelter workers exposed to arsenic. *Environ Res* 39:465-474.
46. Lewis, AS; Reid, KR; Pollock, MC; Campleman, SL. (2012). "Speciated arsenic in air: Measurement methodology and risk assessment considerations." *J. Air Waste Manage. Assoc.* 62(1):2-17. DOI: [10.1080/10473289.2011.608620](https://doi.org/10.1080/10473289.2011.608620)
47. Lubin H., Fraumeni F. (2000). Estimates of the annual number of clinically recognized pregnancies in the United States, 1981-1991. *Am J Epidemiol* 152(3):297-293.
48. Louisiana Department of Environmental Quality. (2007). Advanced DRAFT Revisions to Toxic AIR Pollutant Ambient Air Standards. Log# AQ281. <http://www.deq.louisiana.gov/portal/portals/0/planning/regs/pdf/0704Pot1.pdf>
49. Mardones Fuentes, C. A. (2005). *Factores claves en la relación investigación y políticas públicas en Chile (análisis del modelo matemático de licitación para Junaeb y el proyecto Fondef de estimación de riesgos y costos de reducción del arsénico en el aire para el diseño de una normativa)* [grado de Magíster en Gestión y Políticas Públicas, Universidad de Chile]. Estudios de Caso N°88 - Universidad de Chile. <http://www.mgpp.cl/wp-content/uploads/2017/04/CASO88.pdf>
50. Massachusetts Department of Environmental Protection. (2021). *MassDEP Ambient Air Toxics Guidelines*. <https://www.mass.gov/service-details/massdep-ambient-air-toxics-guidelines>

51. Massachusetts Department of Environmental Protection. (2011). Supporting Documentation for MassDEP Air Guidelines: Arsenic. Office of Research and Standards. <https://www.mass.gov/doc/massdep-air-guidelines-for-arsenic/download>
52. Maine Center for Disease Control and Prevention. (2019). Chronic Ambient Air Guidelines (2019). <https://www.maine.gov/dep/air/monitoring/docs/2019-ME-DEP-aag-list.pdf>
53. Meridian Environmental Inc. (2011). Assessment Report on Arsenic for Developing Ambient Air Quality Objectives - Update 2011. Alberta Environment and Sustainable Resource Development. [Assessment Report on Arsenic for Developing Ambient Air Quality Objectives \(alberta.ca\)](https://www.alberta.ca/assessment-report-on-arsenic-for-developing-ambient-air-quality-objectives)
54. MINAM. (2021). Proyecto de Decreto Supremo que Aprueba los Estándares de Calidad Ambiental para Aire de los Parámetros Cadmio, Arsénico y Cromo en Material Particulado Menor de Diez Micras (PM10) y su Exposición de Motivos. Dirección General de Calidad Ambiental. Perú. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1977529/PROYECTO%20DECRETO%20SUPREMO%20Y%20EXPOSICION%20DE%20MOTIVOS%20APRUEBA%20ESTANDARES%20DE%20CALIDAD%20AMBIENTAL%20%28E%20CA%29%20PARA%20METALES.pdf.pdf>
55. Ministry of Environment, Forest & Climate Change. (2019). National Clean Air Programme (NCAP). Shri Nikunja K Sundaray and Dr. Shruti Rai Bhardwaj. http://moef.gov.in/wp-content/uploads/2019/05/NCAP_Report.pdf
56. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). Resolución N°2254 de 2017. Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones. Publicada en Diario Oficial No. 50.415 de 12 de noviembre de 2017. Bogotá. <https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/96-res%202254%20de%202017.pdf>
57. Ministerio De Salud. (2014). Guía Clínica: Vigilancia Biológica de la Población Expuesta a Arsénico en la Comuna de Arica. Santiago: MINSAL. [Guía Clínica Vigilancia de Arsénico \(studylib.es\)](https://www.studylib.es/doc/100000000/guia-clinica-vigilancia-biologica-de-la-poblacion-expuesta-a-arsenico-en-la-comuna-de-arica)
58. Ministerio de desarrollo sostenible y medio ambiente (1995). DS 24176 de 08/12/1995. Reglamento en Materia de Contaminación Atmosférica. Publicado en La Gaceta 1914, 1995-12-08, Decreto Supremo. Bolivia. [https://bolivia.infoleyes.com/norma/2227/reglamento-en-materia-de-](https://bolivia.infoleyes.com/norma/2227/reglamento-en-materia-de)

[contaminaci%C3%B3n-atmosf%C3%A9rica-rmca](#)

59. Ministerio De Salud. (1994). Decreto 477 [Derogado]. Establece Norma Primaria De Calidad Del Aire Para Arsénico. Publicado en Diario Oficial de la República de Chile. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?i=13672&f=1994-06-14&p=>
60. Ministerio de Salud. (24 de agosto de 2020). Solicita dar inicio al proceso de elaboración de una norma de calidad primaria para Arsénico en aire. Ord. N° 3.450. Diario Oficial de la República de Chile N° 42.794. Chile. https://planesynormas.mma.gob.cl/archivos/2020/proyectos/ORD_3450_Arsenico_Minsal.pdf



12. Anexo

Tabla 14: Resumen de normativas internacionales (parte I)

Agencia	Criterio de calidad del aire ambiente	Descripción	Referencia
Ministerio de Medio Ambiente de Ontario (OME).	Criterio de calidad del aire ambiente (AAQC) = 0,3 $\mu\text{g m}^{-3}$ en 24hr	Limite basado en la salud.	Ontario Ministry of the Environment. (2008).
Agencia de Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades de los Estados Unidos (ATSDR).	La ATSDR no tiene una directriz sobre el aire ambiente para el arsénico	-	ATSDR. (2009)
Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA).	No tiene una directriz, pero si proporciona concentraciones específicas de riesgo (RsC) correspondiente a un riesgo de: 1 en 10.000 = 0,02 $\mu\text{g m}^{-3}$ 1 en 100.000 = 0,002 $\mu\text{g m}^{-3}$ 1 en 1.000.000 = 0,0002 $\mu\text{g m}^{-3}$	Los niveles de riesgo especificados se derivan a partir de los datos de la evidencia de cáncer de pulmón en varones expuestos en el lugar de trabajo (fundición Anaconda y Asarco), usando un factor de riesgo de unidad de inhalación de $4,3\text{E}^{-03} \mu\text{g m}^{-3}$.	IRIS. (1995)
Agencia de Protección Ambiental de California (Cal EPA).	Nivel de exposición de referencia agudo (REL) = 0,2 $\mu\text{g m}^{-3}$ (4 horas). Nivel de exposición de referencia (REL) = 0,015 $\mu\text{g m}^{-3}$ (8 horas) Nivel de exposición de referencia crónico (REL) = 0,015 $\mu\text{g m}^{-3}$ (exposición continua diaria)	La base para el REL agudo fueron estudios de laboratorio en animales, observaron una disminución del peso del feto en ratones expuestos por 4 horas en los días de gestación. Para los niveles de exposición de referencia de 8 horas y crónica, estos fueron basados en estudios de ingestión de agua potable contaminada por arsénico y convertida a una concentración inhalada equivalente. Se observaron cambios importantes a nivel intelectual en niños de 10 años.	Agencia de Protección Ambiental de California (1999)

Fuente: Meridian Environmental Inc., 2011.

Tabla 15: Resumen de normativas internacionales (parte II)

Agencia	Criterio de calidad del aire ambiente	Descripción	Referencia
Departamento de Calidad Ambiental de Luisiana (DEQ).	Norma anual de aire ambiente para contaminantes tóxicos del aire = $0,02 \mu\text{g m}^{-3}$ Norma de aire ambiente media de 8 horas para contaminantes tóxicos del aire = $0,24 \mu\text{g m}^{-3}$	El valor de $0,02 \mu\text{g m}^{-3}$ representa una concentración específica de riesgo (RsC) correspondiente a riesgo de 1 en 10.000	Louisiana Department of Environmental Quality. (2007)
Departamento de Protección Ambiental de Massachusetts (DEP).	Límite de exposición a los efectos del umbral (TEL) = $0,003 \mu\text{g m}^{-3}$ [24 horas]. Límite ambiental admisible (AAL) = $0,0003 \mu\text{g m}^{-3}$ [media anual].	TEL: Basado en efectos adversos para la salud durante toda una vida de exposición continua. AAL: Basado en exceso de riesgo de cáncer de por vida de 1 en 1.000.000, cuyo valor se divide con la UR de CalEPA (2009) de $3,3 \times 10^{-3}$ por $\mu\text{g/m}^3$	MassDEP. (2021)
CDC de Maine	Directriz del aire ambiente (AAG) = $0,0023 \mu\text{g m}^{-3}$ [Anual]	Basado en el riesgo unitario de un estudio de 1987 utilizado por CA_OEHHA	Maine CDC. (2019)
Departamento de Servicios Medioambientales de New Hampshire (DES).	Límite de aire ambiente de 24 horas (AAL) = $0,036 \mu\text{g m}^{-3}$ Límite anual del aire ambiente (AAL) = $0,024 \mu\text{g m}^{-3}$	Límite de aire ambiente de 24 horas y anual, están basados en el límite de exposición profesional (OEL) de ACGIH.	Env-A 1400
Departamento de Medio Ambiente y Recursos Naturales de Carolina del Norte (DENR).	Nivel ambiental aceptable (AAL) = $0,00023 \mu\text{g m}^{-3}$ [anual]	Es probable que el AAL se haya obtenido utilizando un riesgo de cáncer de 1 en 1.000.000 y el factor de riesgo de la unidad de inhalación $4,3\text{E}^{-03}$ por $\mu\text{g m}^{-3}$ (EPA de EE.UU).	North Carolina Administrative Code (2015)
Quebec Desarrollo Sostenible, Medio Ambiente y Parques.	Valor limite = $0,003 \mu\text{g m}^{-3}$	Se establece una concentración de fondo (concentración inicial) para el arsénico de $0,002 \mu\text{g m}^{-3}$. Para cumplir con la directriz, una nueva fuente tendría que sumar sus emisiones y la concentración inicial. De tal forma que siempre de un resultado inferior al de la directriz.	Québec (2010)

Fuente: Meridian Environmental Inc., 2011.

Tabla 16: Resumen de normativas internacionales (parte III)

Agencia	Criterio de calidad del aire ambiente	Descripción	Referencia
Departamento de Gestión Ambiental de Rhode Island (DEM).	Nivel ambiental aceptable (AAL) de 1 hora = $0,2 \mu\text{g m}^{-3}$ Nivel ambiental aceptable (AAL) anual = $0,0002 \mu\text{g m}^{-3}$	El AAL de 1 hora para el arsénico se basó en el REL de inhalación aguda de la CalEPA. El nivel ambiental aceptable anual se basó en el riesgo de cáncer de 1×10^{-6} , derivado del factor de potencia de cáncer por inhalación para el arsénico.	Rhode Island Department of Environmental Management. (2008)
Agencia de Recursos Naturales de Vermont (ANR).	Norma de aire ambiente peligroso (HAAS) = $0,00023 \mu\text{g m}^{-3}$ [anual]	Basado en el factor de riesgo de 1 en 1.000.000. Además de utilizar el factor de riesgo de la unidad de inhalación de la US EPA de $4,3 \times 10^{-3}$ por $\mu\text{g m}^{-3}$	Vermont Air Pollution Control Regulations. (2007)
Unión Europea	Valor objetivo para el arsénico = $0,006 \mu\text{g m}^{-3}$	El valor objetivo se basa en la toxicidad del arsénico por inhalación.	Directive 2004/107/EC
Ministerio de Medio Ambiente y Sanidad de Nueva Zelanda.	Directriz del aire para la protección de la salud y el bienestar humanos = $0,0055 \mu\text{g m}^{-3}$ [anual]	El valor de la directriz ambiental para el arsénico inorgánico se basa en un valor de riesgo aceptable de 1 en 100.000 para un carcinógeno de alta potencia (entre la OMS y la EPA de EE. UU.).	New Zealand Ministry for the Environment and Ministry of Health. (2002)
Organización Mundial de la Salud (OMS)	1 en 10.000 = $0,066 \mu\text{g m}^{-3}$ 1 en 100.000 = $0,0066 \mu\text{g m}^{-3}$ 1 en 1.000.000 = $0,00066 \mu\text{g m}^{-3}$	El valor del aumento del riesgo de cáncer de 1 en 100.000 se basó de un estudio sobre trabajadores de fundiciones. Utilizando el factor de riesgo unitario de inhalación de $1,51 \times 10^{-3}$ por $\mu\text{g m}^{-3}$.	WHO. (2000)
Ministerio de Transición Ecológica de Francia	Valor objetivo de $0,006 \mu\text{g m}^{-3}$ [anual]	Basada en las normas establecidas por la Unión Europea.	The Law Library of Congress. (2018)
Ministerio de Medio Ambiente, Bosques y Cambio Climático de la India	Normas nacionales de calidad del aire ambiente (NAAQS)= $0,006 \mu\text{g m}^{-3}$	Usada para la concentración en el aire ambiente Industrial, residencial y rural.	Ministry of Environment, Forest & Climate Change. (2019)

Fuente: Meridian Environmental Inc., 2011.

Tabla 17: Resumen normativas latinoamericanas

Agencia	Criterio de calidad del aire ambiente	Descripción	Referencia
Ministerio de Medio Ambiente y Agua Bolivia	Límites Permisibles de Calidad del Aire para Contaminantes Específicos: 0,05 $\mu\text{g m}^{-3}$ [anual]	-	Ministerio de desarrollo sostenible y medio ambiente (1995)
Ministerio del Medio Ambiente (Perú)	Fase 1: 0,3 $\mu\text{g m}^{-3}$ (24hr) 0,05 $\mu\text{g m}^{-3}$ (Anual) Fase 2: 0,3 $\mu\text{g m}^{-3}$ (24hr) 0,012 $\mu\text{g m}^{-3}$ (Anual)	Enfoque de implementación gradual, que consiste en dos fases. La primera comienza en el 2022 y la segunda en el 2025.	MINAM (2021)

Fuente: Elaboración propia

