

ORIGEN GEOLÓGICO Y ANTROPOGÉNICO DE LA CONTAMINACIÓN DEL POLVO SEDIMENTADO DE UNA CIUDAD PUERTO HISTÓRICAMENTE MINERA EN EL NORTE DE CHILE: IMPLICACIONES PARA LA SALUD

Joseline S. Tapia¹, Jorge Valdés^{2,3}, Rodrigo Orrego², Andrei Tchernitchin^{4,5}, Cristina Dorador^{6,7}, Aliro Bolados⁵ y Chris Harrod^{2,8}

¹Instituto de Ciencias de la Tierra, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile

²Instituto de Ciencias Naturales Alexander von Humboldt, Universidad de Antofagasta, Antofagasta, Chile

³Laboratorio de Sedimentología y Paleoambientes LASPAL, Universidad de Antofagasta, Antofagasta, Chile

⁴Laboratorio de Endicronología Experimental y Patología Ambiental ICBM, Facultad de Medicina, Universidad de Chile, Santiago, Chile

⁵Departamento de Medio Ambiente, Colegio Médico de Chile, Santiago, Chile

⁶Departamento de Biotecnología e Instituto Antofagasta, Universidad de Antofagasta, Antofagasta, Chile

⁷Centre for Biotechnology and Bioengineering (CeBiB), Antofagasta, Chile

⁸Núcleo Milenio INVASAL, Concepción, Chile

RESUMEN EJECUTIVO (Extracto de trabajo original)

Chile es el mayor productor de cobre a nivel mundial y los principales depósitos se encuentran en la Región de Antofagasta en el norte de Chile. Las actividades mineras han aumentado de manera significativa los ingresos y el empleo en la región, sin embargo, la evaluación de los impactos ambientales en los residentes ha sido muy limitada. El Puerto de Antofagasta, localizado 1430 km al norte de Santiago, la capital de Chile, funcionó como un acopio de minerales hasta 1988 y se ha utilizado como un almacén de concentrado de cobre desde el 2014. El 2014 y 2016 se colectaron muestras que mostraron concentraciones elevadas de As, Cu, Pb, y Zn en el polvo y en las muestras de sangre (Pb) y orina (As) de los residentes. Para interpretar y analizar la variabilidad espacial y las posibles fuentes de contaminación, se estudiaron datos existentes de la geoquímica de rocas del basamento y del suelo de la ciudad, así como también datos de polvo de dominio público. Adicionalmente, se realizó un ensayo de bioaccesibilidad del polvo y se calcularon el *consumo diario químico (chemical daily intake)* y el *índice de peligrosidad (hazard index)* en las cercanías del puerto.

Las principales conclusiones indican que las concentraciones de Ba, Co, Cr, Mn, Ni, y V registradas en el polvo de Antofagasta se podrían originar de rocas intrusivas, volcánicas, metamórficas, diques o suelos presentes en la ciudad. Sin embargo, las concentraciones elevadas de As, Cd, Cu, Mo, Pb, y Zn no se originan de estos afloramientos geológicos, y por lo tanto son considerados contaminantes antropogénicos. Las concentraciones promedio de As, Cu, y Zn son probablemente las más elevadas registradas hasta el momento en polvo y corresponden a 239, 10.821, y 11.869 mg·kg⁻¹, respectivamente. Adicionalmente, los contaminantes As, Pb, y Cu muestran las mayores bio-accesibilidades y los *índices de peligrosidad* preliminares muestran que As y Cu contribuyen a un riesgo elevado en niños y adultos expuestos de forma crónica al polvo de Antofagasta, en tanto, Pb se considera peligroso en cualquier concentración. Por lo tanto, se considera necesario una mayor conciencia ambiental y mejores medidas de protección en Antofagasta y en otras ciudades puerto con actividad minera en países en vías de desarrollo.

CONSIDERACIONES Y RECOMENDACIONES

El polvo presente en las calles de Antofagasta probablemente presente las concentraciones más altas de As, Cu y Zn registradas para polvo de ciudad en todo el mundo. Este resultado no es sorprendente, dado que Chile es el productor más importante de Cu, además de otros minerales y concentrados, que actuarían como importante fuente de As, Mo y, en menor medida, Zn.

En Chile continúa un predominante desarrollo minero; por ejemplo, el Complejo Industrial La Negra ha crecido a 200 ha y 120 otras empresas, incluida una fundición de Cu. Estudios previos, como Ruiz-Rudolph et al. (2016), muestran que las comunas chilenas con este tipo de instalaciones sufren tasas de mortalidad más altas. Aunque el Puerto de Antofagasta es un importante empleador en la ciudad, el almacenamiento de concentrados de Cu y reservas polimetálicas por largos períodos de tiempo no es apropiado debido a la preocupación por salud. Estos materiales han causado enfermedades en niños en el pasado (Sepúlveda, Vega y Delgado, 2000) y continúan causando altas concentraciones de contaminantes en sangre y orina de niños (Vergara, 2015).

Los resultados indican que el polvo presente en las calles contiene concentraciones de contaminantes peligrosos que son lo suficientemente altos como para amenazar la salud de las personas (especialmente niños) que viven y trabajan en las proximidades del puerto de Antofagasta.

Una medida cautelar previamente adoptada a partir de 2010 para algunos concentrados almacenados en Portezuelo, fue su transporte en camiones herméticamente sellados y limpios (Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones (MTT), 2015). No obstante, una vez detenidos en Antofagasta, los concentrados podrían ser desplazados por el viento que se mueve preferentemente en la dirección SW; por lo tanto, se debe prestar especial atención a la dispersión de contaminantes de los concentrados y depósitos de minerales al NE, especialmente durante días ventosos.

Como se ha visto en el polvo resuspendido de la ciudad de Fushun (China), algunos elementos pueden ser altamente acumulados en polvo (por ejemplo, $\text{Cr } 5,334 \pm 10,667 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; Kong et al., 2011), especialmente cuando las superficies dejan de limpiarse por largos periodos de tiempo. Antofagasta se encuentra dentro del desierto más seco del mundo, y como tal, existe una muy baja probabilidad de que la lluvia remueva el polvo. Limpiar las superficies con trapeadores húmedos dos veces al mes y lavar frecuentemente las manos de los niños en lugares cerca del puerto son medidas de precaución a nivel individual que permitirían prevenir la ingestión del polvo, disminuyendo así los valores de Pb en la sangre (Charney et al., 1983).

Como un objetivo a largo plazo, el actual puerto y desarrollos futuros ubicados en su cercanía, deberían considerar el alto riesgo de contaminación asociado desarrollando estrategias relevantes que permitan minimizar la exposición al polvo contaminado. Las actuales operaciones dentro del puerto deberían ser modificadas (a través de regulaciones, pautas de seguridad y medidas prácticas). Además, debe ser prioridad para los gobiernos regionales y nacionales invertir en una atención médica adecuada (por ejemplo: la capacitación de especialistas y el desarrollo de instalaciones médicas adecuadas).

El futuro manejo y prevención de la contaminación en Antofagasta también debería ser fortalecido por la implementación de un laboratorio de geoquímica de alta calidad (local), que permita mediciones rápidas, eficientes y precisas de contaminantes y su especiación específica en distintas matrices ambientales de importancia. Considerando que la industria minera continuará siendo una empresa rentable en Chile, proporcionando empleos e ingresos a medida que se extiende la explotación de otros recursos en la región (ejemplo, Li), la implementación y gestión de un laboratorio de este tipo es necesario en esta creciente y altamente contaminada ciudad y región.

Finalmente, es importante señalar que los problemas de contaminación aquí descritos probablemente no estén restringidos a Antofagasta, ni a Chile. Dondequiera que se extraigan, almacenen y transporten metales, existe el riesgo de que los trabajadores y las personas puedan estar expuestos a la contaminación, siendo importante que esto sea reconocido por todas las partes involucradas. Chile se está moviendo rápidamente hacia el estado de un país desarrollado, sin embargo, las medidas de protección ambiental no se han desarrollado al mismo ritmo que su creciente economía. Las regulaciones industriales deben garantizar niveles seguros de contaminantes como se encuentra definido en la Constitución de Chile, la cual establece que los ciudadanos chilenos: "Tienen el derecho a vivir en un ambiente libre de contaminación" (Gobierno de Chile, 1980).

CONCLUSIONES

Las principales conclusiones en relación a la contaminación del polvo de Antofagasta se resumen a continuación considerando la geología local, los riesgos en salud, y la bioaccesibilidad de los elementos contaminantes. Esto es seguido por potenciales recomendaciones y consideraciones de corto y largo plazo que podrían reducir los impactos en salud en los residentes de la ciudad de Antofagasta.

- El polvo de la ciudad de Antofagasta en el norte de Chile contiene Ba, Co, Cr, Mn, Ni, y V que se origina probablemente de rocas intrusivas, volcánicas, metamórficas, diques o suelo de la ciudad.
- El polvo de Antofagasta está contaminado con As, Cd, Cu, Mo, Pb, y Zn, y esta contaminación se origina probablemente en el Puerto de Antofagasta (una fuente antropogénica).
- Las concentraciones promedio de As ($239 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), Cu ($10.821 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), y Zn ($11.869 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) son probablemente las más elevadas del mundo en polvo de ciudad.
- Se encontró una mayor bioaccesibilidad en el polvo de Antofagasta para As, Cu, y Pb, indicando que mayor proporción de estos contaminantes podría ingresar al flujo sanguíneo humano.
- Los resultados de bioaccesibilidad e índices de peligro indican que As, Cu, y Pb en polvo representan un riesgo para la salud de niños o adultos expuestos crónicamente al polvo de Antofagasta.

Se proponen las siguientes recomendaciones potenciales y consideraciones:

Corto plazo

- Discusión con reguladores y grupos relevantes en la industria en relación al significado de los resultados en los ciudadanos. Los desarrollos potenciales y negocios en

proximidad al Puerto de Antofagasta debieran ser conscientes del riesgo de contaminación.

- Las casas y los niños viviendo cerca del Puerto de Antofagasta debieran ser limpiados constantemente para evitar el consumo de polvo.

Largo plazo

- Se debieran adoptar regulaciones más estrictas a nivel nacional o regional para reducir la contaminación de polvo. Además, negocios, escuelas, y desarrollos potenciales cercanos al puerto debieran implementar estrategias de largo plazo para minimizar la exposición a polvo contaminado.
- Acopios polimetálicos y concentrados de cobre no debieran permanecer en el Puerto de Antofagasta por un periodo prolongado.
- Se debiera invertir en entrenamiento médico e infraestructura para remediar apropiadamente los impactos en salud.
- Se debiera considerar la implementación de un programa de monitoreo en tiempo real y un laboratorio de geoquímica de buena calidad para mejorar la cuantificación de elementos contaminantes, su especiación y biodisponibilidad en el polvo de Antofagasta.

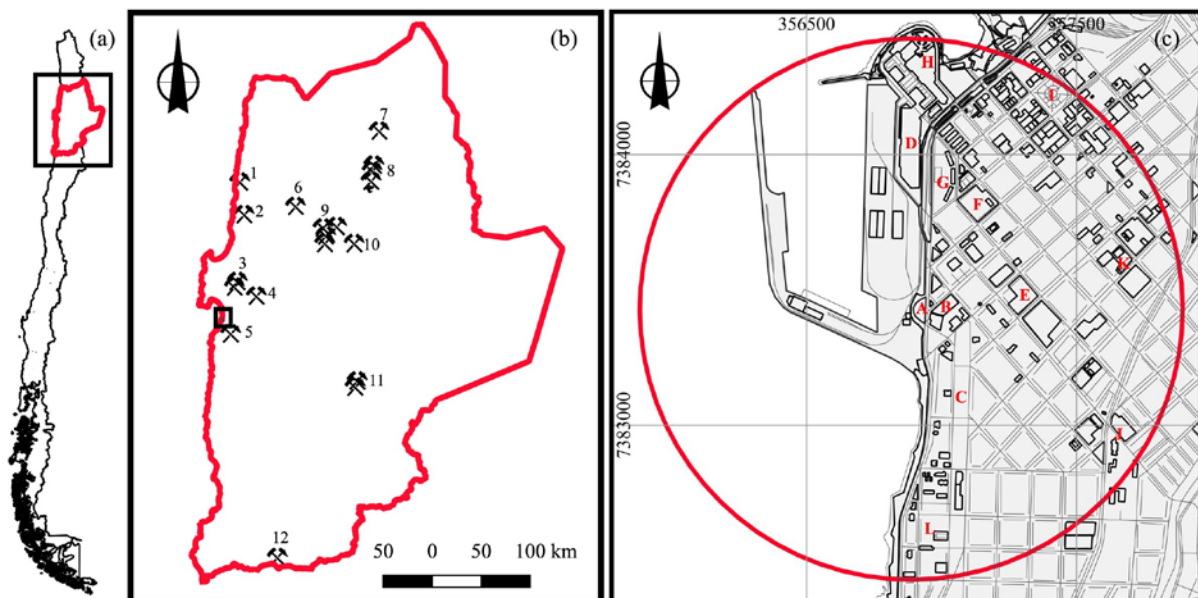


Figura 1: Zona de estudio. (A) indica la ubicación de la Región de Antofagasta en el norte de Chile; (B) muestra la ubicación de los depósitos y actividades de mineras en la Región de Antofagasta (1, Mantos de la Luna; 2, Michilla; 3, Juanita; 4, Mantos Blancos; 5, Complejo Industrial La Negra; 6, Pedro de Valdivia; 7, El Abra; 8, Radomiro Tomic, Chuquicamata, y Ministro Hales; 9, Faride, Spence, Sierra Gorda, y Planta de tratamiento Aconcagua; 10, Esperanza; 11, Zaldívar y La Escondida; 12, Francke). El rectángulo indica la ubicación de la ciudad de Antofagasta; (C) Muestra la zona céntrica de la ciudad de Antofagasta, alrededor del puerto. 1, Acceso al Puerto; 2, Clínica Antofagasta; 3, Parque Brasil (zona de juegos infantiles); 4, Centro Comercial; 5 y 6, Establecimientos educacionales (Liceo de Hombres y Liceo de Niñas, respectivamente); 7, Complejo habitacional; 8, Mall; 9, Municipalidad; 10,

Hospital; 11, Mercado municipal de frutas y vegetales, principalmente; 12, Supermercado. El círculo rojo representa una distancia de 1 Km alrededor del Acceso al Puerto.

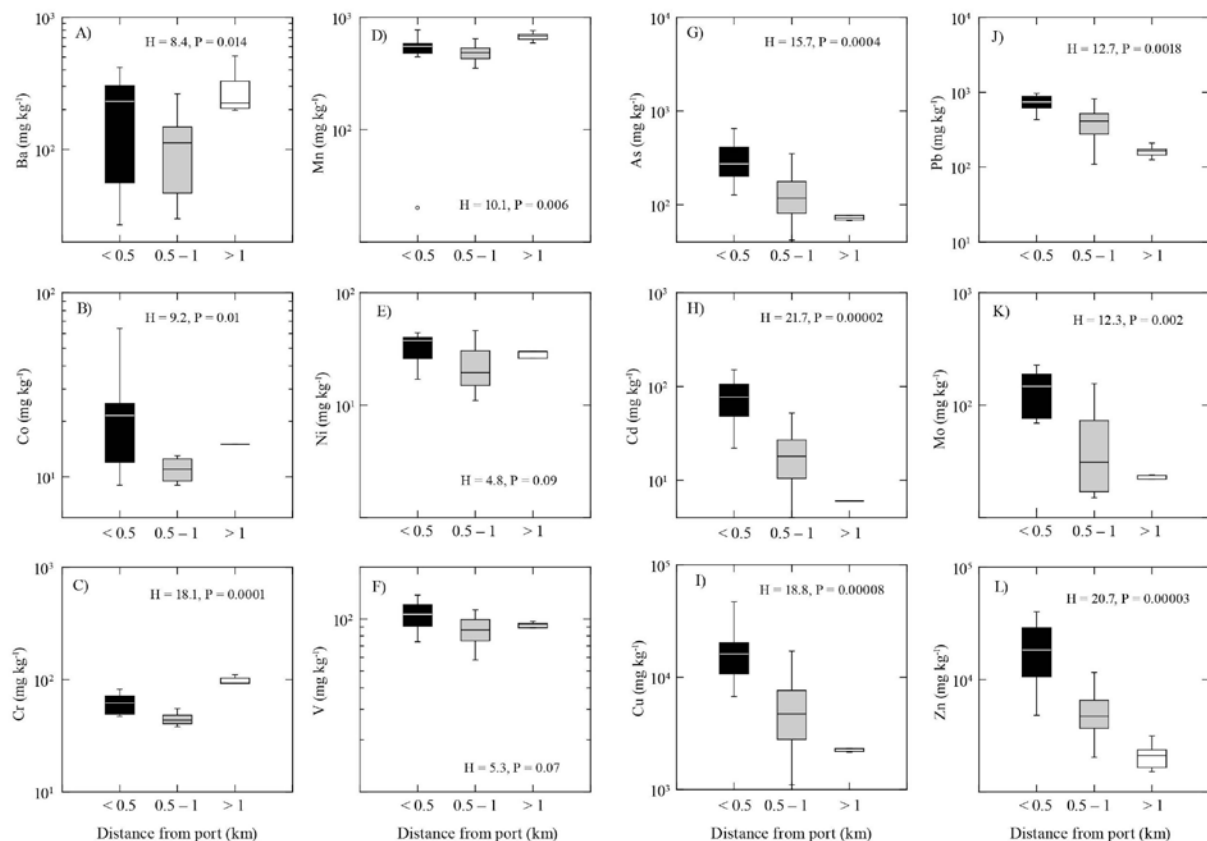


Figura 3: Concentración de metales (eje y) en muestras de polvo de la ciudad de Antofagasta, en función de la distancia desde Puerto Antofagasta (eje x; ver distribución de los puntos de muestreo en Fig. 2 trabajo original). Los rectángulos dentro de cada gráfico muestran la dispersión de los valores de concentración alrededor de la mediana (el valor de concentración que corresponde al punto medio de todos los valores medidos para cada metal). (A) Bario; (B) Cobalto; (C) Cromo; (D) Manganeso; (E) Níquel; (F) Vanadio; (G) Arsénico; (H) Cadmio; (I) Cobre; (J) Plomo; (K) Molibdeno; (L) Zinc. Metales como el Arsénico, Cadmio, Plomo, Cobre y Zinc muestran una notoria tendencia de incremento de sus concentraciones hacia la zona más cercana al Puerto Antofagasta.

Referencia:

Tapia, JS., Valdés, J., Orrego, R., Tchernitchin, A., Dorador, C., Bolados, A., Harrod, C. (2018) Geologic and anthropogenic sources of contamination in settled dust of a historic mining port city in northern Chile: health risk implications. PeerJ 6:e4699; DOI 10.7717/peerj.4699

URL: <https://peerj.com/articles/4699/>

Parte de este trabajo ha sido traducido al castellano directamente desde el artículo original con fines de divulgación.