

Escrito sobre relación de causalidad en el caso de daño ambiental por emisiones del Complejo Industrial Ventanas

Pablo Ruiz-Rudolph¹

RESUMEN

El año 2016 el Sindicato de Trabajadores Independientes, Pescadores Artesanales, Buzos Mariscadores y Ramos Similares de Caleta Horcón presentaron una demanda por reparación de daño ambiental contra 14 empresas del Complejo Industrial Ventanas y el Ministerio del Medio Ambiente. Como parte fundamental de esta demanda se requería, como punto de prueba, el demostrar que existe una relación causal entre la presencia del Complejo Industrial Ventanas y daño a la salud de las poblaciones adyacentes. En este contexto se me solicitó participar como testigo en la causa por parte de los demandantes. El escrito que se acompaña plasma las reflexiones con respecto este punto central de la demanda, acompañado de un cuerpo importante de la evidencia de contaminación y efectos en salud en la zona.

Palabras clave: Causalidad; Emisiones Industriales; Complejo Industrial Ventanas; Contaminación; Efectos en Salud; Demanda Ambiental

Escrito para apoyar prueba testimonial en juicio de reparación por daño ambiental Rol D-30-2016

1. PRESENTACIÓN

Hace algunos años fui contactado por el equipo de abogados demandantes de esta causa, los cuales me solicitaron ser testigo en ésta, dado mi rol como científico y académico en el área de salud y medio ambiente. Se me explicó que como testigo debería exponer los antecedentes más relevantes sobre los potenciales efectos en salud asociado a las emisiones del Complejo Industrial Ventanas, en particular sobre el punto 5 de la demanda, esto es, el potencial vínculo causal entre la presencia del complejo industrial y sus emisiones y los efectos en salud en la población circundante.

He estudiado con dedicación el tema, y me ha parecido conveniente preparar un escrito que resuma algunos de los puntos teóricos más importantes y que sintetice evidencia científica al respecto. El presente escrito está organizado en cinco secciones. Las siguientes tres secciones son de contenidos: una primera sobre conceptos de causalidad en epidemiología, la siguiente sobre aspectos relevantes sobre la evaluación de efectos en salud por exposición a contaminantes en la zona, y una última, sobre la evidencia científica más pertinente. El escrito termina con una sección de síntesis, en donde argumento mi opinión con respecto a las materias tratadas.

Quisiera destacar mi participación anterior como *amicus curiae* en la reclamación R-22-2014 con respecto a la derogación de la norma anual de MP10. Este informe fue acogido, y del cuál, espero haya sido de utilidad tanto al Tribunal Ambiental y como a la Corte Suprema en ilustrar los aspectos científicos relevantes para tomar dicha decisión.

¹ Bioquímico, Universidad de Chile. Doctor en Salud Ambiental, Universidad de Harvard. Chile.

Correspondencia a: pabloruizr@uchile.cl. Documento completo En: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/194553>

2. SOBRE LA CAUSALIDAD

2.1 ¿Cómo se entiende la causalidad en epidemiología?

El concepto de causalidad en epidemiología, y en otras ciencias empíricas, se relaciona a ideas vertidas con mucha anterioridad por David Hume y John Stuart Mill (Pearl & Mackenzie, 2018; Rothman, 1976; Rothman & Greenland, 2005). En esencia, se considera una causa “un acto o evento o estado de la naturaleza que inicia o permite, por sí solo o en conjunción con otras causas, una secuencia de eventos que resultan en un efecto” (Rothman & Greenland, 2005). En salud, consideraríamos como una causa un evento o estado que gatilla o permite que se desarrolle una enfermedad. Por ejemplo, el ser fumador puede gatillar una serie de eventos en el cuerpo de una persona que pueden llevar, bajo ciertas condiciones, a desarrollar un cáncer al pulmón. La epidemiología se centra en comprender cuáles son estas causas y cómo estas causas pueden estar distribuidas diferentemente en las poblaciones y así explicar las diferencias en su distribución.

Sobre los contrafactuales. Al estudiar los efectos en salud de hipotéticas causas, se hace uso del concepto de contrafactual (Pearl & Mackenzie, 2018; Rothman et al., 2008). Esta es una aproximación usual en ciencias empíricas y consiste plantearse la pregunta hipotética de qué hubiera pasado (“la gran pregunta *“what if”* en inglés) en una situación real si la causa no hubiera estado presente. La solución ideal, e irreal, para resolver este problema sería una máquina del tiempo que nos permita volver al pasado y comparar el estado de cosas entre lo que realmente pasó (factual) contra lo que hubiera pasado en la situación hipotética (contrafactual). En el caso de la salud, nos interesa saber qué hubiera pasado si una persona con cáncer al pulmón no hubiera fumado nunca, o mejor aún, que hubiera pasado con los casos de cáncer al pulmón en una población, si los miembros de dicha población nunca hubieran fumado. Si consideramos que los casos hubieran sido menos en el contrafactual, tendríamos muy fuertes razones para pensar que el fumar es una causa del cáncer del pulmón en dicha situación.

2.2 Algunos aspectos importantes al estudiar los efectos en salud de una causa.

Sobre la aproximación empírica en epidemiología. Este pensamiento se traduce en la aproximación empírica del estudio de enfermedades. Dado que la aproximación del contrafactual es

imposible de realizar, se intentan realizar diseños, formas de estudio, que se aproximen a este ideal. Un diseño, considerado *gold standard* en epidemiología, es el de los ensayos clínicos (Rothman et al., 2008). En este diseño contamos con dos grupos provenientes de la misma población, los cuáles son expuestos a distintos agentes, por ejemplo, un medicamento. La fortaleza del diseño es que justamente los no expuestos al medicamento se pueden considerar una aproximación al contrafactual, esto es, qué hubiera pasado con los expuestos, que tomaron el medicamento, si nunca hubieran estado expuestos; nuestra máquina del tiempo.

Pese a la fortaleza del diseño en términos conceptuales, está limitado en su aplicación pues, por razones éticas, es difícil considerarlo para estudiar efectos nocivos, por ejemplo, estudiar efecto de tabaquismo o contaminantes; o para estudiar efectos a muy largo plazo, por ejemplo, agentes cancerígenos que pueden tener efectos 20 o 30 años después. En este caso, se hace uso de diseños llamados observacionales, por ejemplo, los estudios de cohortes. En este diseño, estudiamos grupos de personas en sus lugares usuales y con sus exposiciones usuales, pero en las que hacemos comparaciones entre distintos grupos, o en distintos tiempos, en que se contrasten distintos niveles de exposición, cosa que podamos comparar los efectos en las personas expuestas con las no expuestas; y considerar este último grupo como el contrafactual, cómo hubieran estado los expuestos si no se hubieran expuesto. Así por ejemplo podríamos estudiar los efectos en una ciudad contaminada contra otra ciudad no contaminada si asumimos que sus poblaciones son muy similares, o comparar los efectos en una misma ciudad en periodos de mucha contaminación con otros de poca contaminación (Rothman et al., 2008).

Sobre inferencia causal. Inferencia causal se entiende entonces como el proceso de evaluación de la evidencia para intentar determinar si un evento causa un efecto. En este sentido es diferente de la inferencia estadística en las cuáles mediante un test se intenta dar respuestas matemáticas a preguntas estructuradas sobre distribuciones y probabilidades aplicadas a una muestra concreta, aunque muchas veces, el proceso de inferencia causal se apoya en estos test estadísticos (Susser, 1977).

En una línea similar, ya desde el siglo XVIII, filósofos como David Hume, han observado que una prueba de causalidad, como una prueba de deducción matemática, es imposible (Rothman & Greenland, 2005). Esto lleva a los epidemiólogos a trabajar con hipótesis epidemiológicas explicativas que compiten entre ellas, y la labor se centra

en buscar y generar evidencia que mejor permita discriminar entre ellas, pero tratando esta evidencia como grados de probabilidad o verosimilitud (Cranor, 1993, 2016; Rothman et al., 2008). Usualmente esta evidencia se da por asociaciones, o ausencia de asociaciones, entre variables en estudios empíricos. Una “prueba en epidemiología” sería entonces una evidencia, o serie de evidencia, que se aprecia como muy probable, de acuerdo con una de las hipótesis, por ejemplo, que X causa Y, y casi imposible, o inverosímil, bajo las otras hipótesis, por ejemplo, que X no causa Y. Adicionalmente, una “prueba” a favor de que X no causa Y sería encontrar razones que permitan explicar una posible asociación entre X e Y pero que no requiera que X sea una causa.

Un ejemplo se da en la controversia del tabaquismo en los 50s. Una de las hipótesis en ese tiempo, y que ha probado ser verdadera, es que el fumar tabaco produce cáncer al pulmón; mientras que una de las hipótesis alternativas planteadas era que había una causa genética que predisponía a fumar y también a contraer cáncer. Esta segunda hipótesis era capaz de explicar asociaciones puntuales en el tiempo, pero se hacía muy difícil de sustentar con la evidencia disponible de alzas muy importantes en las tasas de cáncer al pulmón en el tiempo, las que iban de la mano, aunque con un rezago, del aumento de las tasas de tabaquismo, y que no podían ser explicadas por una “variante genética” ya que no era posible imaginar que una variante de este tipo hubiera aumentado tan rápidamente en la población (Vandenbroucke, 1989). Como síntesis, se podría afirmar que cuando encontramos una asociación entre X e Y que no se puede explicar de ninguna otra forma que no sea porque X causa Y podemos considerar que existe una asociación causal.

Sobre la imposibilidad de una prueba contra toda duda. Dado este escenario se podría pensar además que existen herramientas para probar contra toda duda una asociación causal. Sin embargo, varios epidemiólogos ya han hecho ver que en los estudios poblacionales siempre se puede convocar una última hipótesis que no se puede desechar, la de una tercera variable que está vinculada a la hipotética causa y al efecto, lo que llamaríamos un confusor desconocido (Greenland, 1990, 1991; Savitz et al., 1990). Esta tercera variable podría explicar cualquier posible asociación entre X e Y, y por tanto refutaría la idea de una asociación causal. Este hecho de demostrar una causa contra toda duda o de demostrar “matemáticamente” una causa y efecto, como

vimos anteriormente, resulta un imposible y puede redundar en una postura de no poder considerar ningún conocimiento con la validez suficiente para tomar una decisión. Por ejemplo, no podríamos afirmar que un contaminante produce algún efecto, que el tabaquismo produce cáncer al pulmón, lo que nos llevaría a un riesgo de inacción en salud pública (Greenland, 1990, 1991; Savitz et al., 1990).

En este escenario, parece más sensible trabajar con niveles de certeza o probabilidades de verosimilitud que juzguen los investigadores con respecto a un problema, y que puede estar en función del problema o decisión en cuestión. Por dar un ejemplo, la Agencia Internacional de Investigación en Cáncer (IARC) trabaja con grupos de expertos que analizan la evidencia sobre el posible rol carcinógeno de sustancias. Los expertos evalúan la evidencia en su conjunto y emiten juicios sobre qué tan probable es que una sustancia sea carcinogénica. Así, una sustancia declarada como carcinógeno (Grupo 1) es aquella que cuente con numerosa evidencia de asociaciones observadas, que sean muy probables bajo la hipótesis causal, y que, por otro lado, sean muy difíciles de explicar mediante otro mecanismo (Pearce et al., 2015; World Health Organization. International Agency for Research on Cancer, 2010). Otros organismos como la OMS y la EPA operan con lógicas similares.

En suma, es de utilidad considerar para enfrentar estos problemas una aproximación de la llamada Inferencia a la Mejor Explicación (*Inference to the Best Explanation*) (Cranor, 1993, 2016), en la que tomamos toda la evidencia disponible para ver con cuál de las hipótesis alternativas es más coherente. Esta aproximación fue usada de cierta forma por Sir Bradford Hill al enfrentar la polémica del tabaco en los 50s y sugerir diferentes “aspectos” a considerar al evaluar una posible relación causal entre una variable ambiental (tabaco) con un efecto en salud. Al cerrar su célebre ensayo, aboga por no tener sus aspectos como reglas “duras y rápidas” para dirimir el tema, sino que considerar la evidencia disponible a la luz de dichos aspectos, y siempre intentar contestar la pregunta, “¿hay alguna otra forma de explicar los hechos ante nosotros, hay alguna otra respuesta igual, o más probable que la relación causal efecto?” (HILL, 1965).

2.3 ¿Cómo entender la causalidad en este caso?

Volviendo al caso, hay que preguntarse qué quiere decir que las emisiones del Complejo Industrial Ventanas causan efectos en salud en

las poblaciones circundantes. Aquí sería bueno establecer una hipótesis y con ella un contrafactual adecuado que permita pensar en cómo usar la evidencia disponible. Se podría precisar que la hipótesis de trabajo es que la presencia de **todo el Complejo Industrial Ventanas (CIV)** produce efectos en salud en las poblaciones circundantes. Esto precisa que no nos estamos planteando que una empresa particular ni un contaminante en particular es el responsable de los efectos en salud. Ante este escenario, el contrafactual sería, ¿cómo sería la salud de la población si **todo el CIV** no hubiera estado? Tal como vimos en las secciones anteriores, la respuesta sería positiva si la salud de la población fuera mejor sin el complejo que con el complejo, pero es un experimento que no podemos realizar.

Como aproximaciones empíricas, obviamente se descarta un diseño experimental, del *gold standard*, en que tuviéramos una población que le asignamos la exposición, tener la presencia del CIV, con una población que no la tiene (es más debieran ser sujetos que al azar son asignados a cada exposición). Por tanto, sólo nos quedan aproximaciones observacionales al problema. Una aproximación más realista y práctica al problema es la de la Inferencia a la Mejor Explicación, en que usamos toda la evidencia disponible intentando dirimir la hipótesis planteada. En este caso podríamos plantear dos hipótesis a dirimir: la hipótesis 1, que el CIV causa efectos en salud, y la hipótesis 2, que el CIV no causa efectos en salud. Entonces, podemos usar la evidencia para preguntarnos ¿cuál de las dos hipótesis parece más de acuerdo con la evidencia? Resulta clave para el caso entonces, si dada la evidencia podemos afirmar que **es más probable o mucho más probable** que el CIV cause efectos en salud en la población a que no los cause. Una segunda pregunta, que podría plantearse a continuación de ésta, es cuál puede ser la magnitud de los efectos en salud debido a la presencia del CIV. Aquí, nuevamente con esta aproximación podríamos analizar la evidencia, plantear una posible magnitud de efectos y preguntarnos si la evidencia nos permite afirmar que **es más probable o mucho más probable** que el CIV cause efectos en salud de la magnitud planteada a que no los cause.

Como vimos con anterioridad no es extraño que diversos organismos diriman estas preguntas con una afirmación de verosimilitud a la pregunta dada la evidencia disponible. Como otro ejemplo, tenemos los juicios de agravios en EEUU (*toxic torts*) en que justamente se resuelve si un agravio

causó un perjuicio dado, en caso de que se pueda demostrar que la probabilidad de que sí lo haya hecho es mayor a que no (Cranor, 1993, 2016).

A la luz de los planteamientos, en este escrito se hará un análisis de toda la evidencia en la zona en su conjunto. Se considerarán también muchas de las incertezas y supuestos que se pueden tener para este caso, los cuáles se detallarán en las secciones siguientes. Tanto la evidencia como los efectos de estos supuestos e incertezas se analizarán bajo la pregunta, ¿esta observación tiende a apoyar más la hipótesis 1, de que el CIV produce efectos en salud, o la hipótesis 2, de que no produce efectos en salud?

3. SOBRE ALGUNOS ASPECTOS PARTICULARES DEL ESTUDIO DE EFECTOS EN SALUD EN LA ZONA.

En esta sección se plantean algunos aspectos con respecto a la evaluación de la evidencia disponible, sobre algunas dificultades anticipadas para el estudio de los efectos en salud y sobre algunas incertezas relacionadas. El análisis se centra en discutir cómo estos aspectos pueden afectar la evaluación de las hipótesis. Esto es, si los puntos discutidos pueden considerarse un apoyo a la hipótesis 1 o 2.

Sobre la dificultad para determinar efectos en salud de contaminantes en la zona. Considerando lo expuesto en 3, parecería pertinente intentar realizar estudios observacionales para demostrar la asociación entre la presencia del CIV o sus contaminantes y la aparición de enfermedades. Esto presenta diversas dificultades en general (Cranor, 1993, 2016) y que afectan particularmente el caso del CIV. La primera es que muchos de los efectos presentan una larga latencia, esto es, requiere un tiempo importante, que puede llegar a 20 a 30 años, desde que ocurre la exposición a que se observen los efectos. Esto es muy característico del cáncer, que tiene tiempos de latencia usuales de entre 5 hasta incluso 50 años (Roberts et al., 2015). Esto también es válido para efectos de la contaminación atmosférica donde se han descrito efectos de deterioro en sistema cardiovascular, por ejemplo, acelerando procesos de aterosclerosis, lo cual puede causar un problema cardíaco en años posteriores (Health Organization & Office for Europe, 2013; World Health Organization, 2021). Entonces, estudios de seguimiento de tipo cohorte, en que seguimos un grupo de personas sanas durante un tiempo para determinar si aparecen enfermedades, parece imposible de realizar para este tipo de enfermedades.

La segunda, y quizás aún más importante, es que la población expuesta es relativamente pequeña para poder apreciar efectos en salud en un estudio epidemiológico. La población de Quintero es de aproximadamente 25.000 habitantes mientras que la de Puchuncaví es de 15.000 habitantes, lo cual usualmente dará poco poder para apreciar diferencias estadísticas entre esta población y otras de referencia. Esto es particularmente relevante para enfermedades poco frecuentes, por ejemplo, cáncer, y para enfermedades muy frecuentes, por ejemplo, asma. Si se intentara hacer estudios, las estimaciones tendrían rangos probables (intervalos de confianza) tan grandes, debido al error aleatorio por muestra pequeña, que sería imposible diferenciar un posible efecto del “ruido de fondo”. Para decirlo en otras palabras, cuando se trabaja con un tamaño de muestra pequeño, para una enfermedad infrecuente o para una enfermedad muy frecuente, solo se podrán apreciar efectos si los riesgos son muy altos, por ejemplo, si un contaminante aumenta el riesgo en 20 ó 50 veces, lo cual está fuera de las expectativas usuales de efectos de un contaminante, que tienden a tener aumentos de riesgo de 2 a 3 veces cuando mucho (Cranor, 1993, 2016).

Al considerar estos argumentos, se puede explicar la relativamente escasa cantidad de estudios sobre efectos en salud en la zona (Legaspi, 2019), o que se pueda conocer sobre estudios no publicados que no encuentran asociaciones estadísticamente significativas. En consideración a los expuesto anteriormente, parece razonable no considerar la falta de estudios con asociaciones positivas como un argumento fuerte para la hipótesis 2, de que el CIV no produce efectos en salud.

Sobre la evidencia de los contaminantes individuales. En las siguientes secciones se presentarán datos sobre exposición, riesgos y efectos para diversos contaminantes. Al respecto, es importante destacar que en la presente evaluación se parte de la base **que ya se sabe** que la mayoría de estos contaminantes producen efectos en salud. Por lo que no nos enfrentamos al tema de determinar, en forma general, si la exposición al contaminante X **causa** efectos en salud, si no que si hay evidencia para pensar que el contaminante X **ha causado** efectos en salud. De vuelta al ejemplo del tabaco, no interesa la pregunta de si fumar tabaco causa cáncer al pulmón, que se da por un hecho, si no la pregunta de si fumar tabaco puede haber causado o estar causando cáncer en cierto grupo de personas. Considerando este antecedente, podremos

considerar que cada vez que se encuentre la presencia de un contaminante relacionado al CIV en la zona, y que sabemos que causa un efecto en salud, esta evidencia tendería a apoyar más la hipótesis 1 que a hipótesis 2. Además, el apoyo a esta hipótesis tenderá a ser mayor si las concentraciones observadas se acercaran a los límites descritos para sus efectos. Este argumento, de la presencia de contaminantes, cobra mayor relevancia dada la dificultad de demostrar asociaciones entre exposiciones y efectos en salud en la zona, según lo explicado en el punto anterior.

Sobre la presencia de múltiples contaminantes y el argumento de la Justicia Ambiental. Una de las particularidades de la zona, como veremos, es la presencia de múltiples fuentes emitiendo múltiples contaminantes al mismo tiempo. Usualmente, los efectos de los contaminantes se determinan uno a uno (Baker & Nieuwenhuijsen, 2008), y con esta evidencia se pueden estimar curvas dosis-respuesta o límites para cada uno, con los que posteriormente se pueden anticipar riesgos de las poblaciones expuestas. Sin embargo, se ha postulado que, dado que los contaminantes pueden actuar en distintas rutas fisiopatológicas, y que en su acción conjunta estas rutas puedan sumarse, que estos contaminantes puedan tener efectos sinérgicos; esto es, que el efecto de los contaminantes en forma conjunta es mucho mayor que su efecto individual. Podríamos ejemplificarlo que ser alcohólico y fumador es mucho peor para su salud que el efecto de ser alcohólico o fumador en forma separada. El impacto de su acción conjunta es un tema gran interés en salud pública y que ha demorado su desarrollo (Fragkou, 2019; Frumkin, 2016).

El argumento anterior es uno de los levantados por los movimientos de Justicia Ambiental en el mundo (Fragkou, 2019; Frumkin, 2016). Estos movimientos han alertado sobre la alta contaminación que se produce en las cercanías de grandes centros industriales, donde se tienden a aglomerar un número importante de fuentes emisoras, que emiten una cantidad importante de contaminantes distintos, justamente como se aprecia en este caso. Esto se junta a que los contaminantes se pueden acumular en los distintos medios (suelo, agua, sedimentos) y en el organismo de los sujetos expuestos. Además, estas locaciones tienden a estar en cercanías de poblaciones vulnerables, empobrecidas, con presencia de minorías, y por tanto tener poco poder político para luchar por mejorar su situación. El hecho de estar empobrecidas puede llevar a ser más vulnerables a los efectos

Figura 1. Tabla resumen de actividades industriales y emisiones en el CIV.

Table 1
Main industrial activity in Puchuncaví-Ventanas, V Region, Chile.

Number (Fig. 1)	Company	Activity	Main atmospheric pollutants
1	AES Gener	Coal Thermolectric Power Plant	SO ₂ , NO _x , CO ₂ , PM, Hg, Co, Pb, V, Mn, As, Zn and Cu (MMA, 2014; Salmani-Ghabeshi et al., 2015)
2	Puerto Ventanas	Harbor Storage and transfer of solid bulks, copper concentrate, fuel, asphalt and chemicals	SO ₂ , NO _x , PM, CO ₂ , and VOCs (MMAbib, MMA, 2014, 2014)
3	CODELCO División Ventanas	Copper smelter and refinery	SO ₂ , PM, NO _x , (MMA, 2014) As (MMA, 2014 and Parra et al., 2014a,b), Cu, Zn, Se, Mo, Sb, Sn and Pb (Parra et al., 2014a,b)
4	Oxiquim	Storage and transfer of liquid bulks (chemical products) Grinding of granular substances	SO ₂ , CO, NO _x , PM and VOCs (MMA, 2014)
5	GNL Quintero	Terminal for receiving, unloading, storage and regasification of Liquefied Natural Gas (LNG).	Fugitive emissions of CH ₄ , PM, NO _x , SO ₂ , CO and VOCs (MMA, 2014)
6	COPEC	Lubricant manufacturing. Storage and distribution of fuels and lubricants	PM, SO ₂ , NO _x , CO and VOCs (MMA, 2014)
7	SHELL	Storage and distribution of fuels and lubricants	PM, SO ₂ , NO _x , CO and VOCs (MMA, 2014)
8	ASFALTO	Storage and distribution of asphalt	VOCs (MMA, 2014)
9	Cemento Melón	Grinding, storage and distribution of cement (Clinker-bauxita)	CO ₂ , PM, As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se y Zn (MMA, 2014)
10	Gasmar	Storage and distribution of Liquefied Petroleum Gas (LPG)	NO _x , CO, PM, SO ₂ and VOCs (MMA, 2014)
11	ENAP	Fuel storage, mainly crude oil	VOCs (MMA, 2014)
12	EPOXA	Storage and distribution of chemical products for industry	SO ₂ , CO, NO _x , PM and VOCs (MMA, 2014)
13	ENDESA	Thermolectric Power Plant (it uses LNG as main fuel and diesel oil as backup fuel)	SO ₂ , NO _x , PM, CO ₂ and VOCs (MMA, 2014)
14	ENAP	Fuel storage, mainly crude oil	VOCs (MMA, 2014)

Fuente: Cereceda-Balic, F., Gala-Morales, M. de la, Palomo-Marín, R., Fadic, X., Vidal, V., Funes, et al. (2020). Spatial distribution, sources, and risk assessment of major ions and trace elements in rainwater at Puchuncaví Valley, Chile: The impact of industrial activities. *Atmospheric Pollution Research*, 11(6), 99–109. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.03.003>

en salud de contaminantes, ya sea por malnutrición, vivienda inadecuada, falta de acceso a servicios de salud, entre otros estresores. En el caso de Puchuncaví, la evidencia muestra niveles de pobreza multidimensional más altos (26,9% para Quintero y 27,9% para Puchuncaví) que los niveles de la región y país (19,0% y 20,7%) (Ministerio de Desarrollo Social, 2017), por lo que se configuran casi todos los elementos del argumento de la Justicia Ambiental.

¿Cómo afectaría la presencia de múltiples contaminantes y los argumentos de Justicia Ambiental la presente evaluación? Al analizar la evidencia, en circunstancias que se estimen riesgos para contaminantes a nivel individual, es posible que estos efectos sean aún mayores si se considera la presencia de otros contaminantes. Esto apoyaría la hipótesis 1 más que la hipótesis 2. Por el contrario, un supuesto que apoya la hipótesis 2, de que la acción de ambos contaminantes se antagonice, generando un efecto menor que la suma, parece una explicación bastante inverosímil. Lo mismo ocurre cuando consideramos los posibles riesgos estimados según curvas dosis-respuesta o límites establecidos para los contaminantes según la literatura. Estos usualmente provienen de estudios en países desarrollados, en poblaciones relativamente sanas, por lo que es posible que los efectos en las circunstancias de la zona puedan ser aún mayores, nuevamente apoyando la hipótesis 1. Por

el contrario, el pensar que esta población sería “más resistente” a la contaminación que lo descrito en la literatura, parece inverosímil.

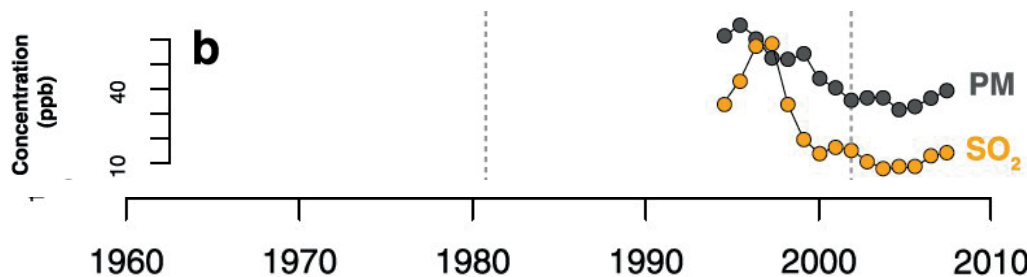
4. EVIDENCIA SOBRE EXPOSICIÓN Y EFECTOS EN SALUD EN LA ZONA DEL CIV

4.1 Aproximación

Sobre la estrategia de búsqueda bibliográfica. La principal búsqueda bibliográfica de evidencia de efectos en salud en la zona fue de artículos científicos en revistas indexadas. Se usaron los buscadores más usuales, Web of Science y Google Scholar, usando como palabras clave (“Ventanas” or “Puchuncaví” or “Quintero”) y (“health effect” or “morbidity” or “mortality” or “symptom” or “cancer”). La búsqueda inicial arrojó un número importante de resultados, los cuales fueron revisados uno a uno para ver si cumplían el criterio de ser artículos relacionados a contaminación y/o salud en la zona en estudio. De la selección inicial se buscaron más artículos en la bibliografía de éstos, así como también por las citas de algunos artículos clave.

Sobre el tipo de evidencia considerada. Aparte de los artículos científicos, la evidencia fue complementada por informes que se encontraran, o que hubieran sido citados por los artículos. Adicionalmente, dado que muchos eventos en la zona, como por ejemplo los episodios de

Figura 2. Evolución histórica de la contaminación atmosférica en la zona.



Fuente: Gayo, E. M., Muñoz, A. A., Maldonado, A., Lavergne, C., Francois, J. P., Rodríguez, D., et al. (2022). A Cross-Cutting Approach for Relating Anthropocene, Environmental Injustice and Sacrifice Zones. *Earth's Future*, 10(4).

contaminación, no son usualmente material de artículos o informes, también se buscaron un número de artículos y noticias en medios de información electrónicos.

Sobre la lógica de recopilación de evidencia. Se siguió una lógica para ordenar y exponer la evidencia, que de cierta forma sigue la trayectoria de un contaminante desde su emisión hasta las personas y su afectación. Primero se describe brevemente las características del CIV y sus emisiones, destacando las características de estos con respecto a sus efectos en salud y cómo y por qué son regulados. Luego se describe cómo han impactado los distintos medios, cómo las personas han estado expuestas, cuáles son los riesgos a la salud que enfrentan y la evidencia que hay sobre asociaciones entre la contaminación del CIV y la salud. Se cierra con alguna evidencia más cualitativa sobre episodios y percepciones en la gente de la zona. En cada sección se analiza la evidencia siempre desde la perspectiva si lo informado tiende a apoyar más la hipótesis 1 o la hipótesis 2.

4.2 Evidencia de emisiones de contaminantes

Sobre las emisiones en la zona. Como es de conocimiento hay un número importante de industrias instaladas en el CIV, cada una con procesos distintos que pueden contribuir a emisiones de distintos contaminantes. Un buen resumen de las principales actividades industriales y emisiones atmosféricas asociadas se presenta en la Figura 1. Con respecto a los efectos de la contaminación atmosférica, de contaminantes principales como Material Particulado, Óxidos de Nitrógeno, Ozono y Dióxido de Azufre; éstos son muy amplios, pueden ejercer efectos a corto o largo plazo, en el sistema respiratorio,

pero también otros, como el sistema cardiovascular, incluso afectar neurológicamente, producir cáncer o afectar la salud reproductiva (U.S. Environmental Protection Agency, 2019; World Health Organization., 2006; World Health Organization, 2021). Es por esto que ciudades contaminadas tienden a tener indicadores de salud (mortalidad, morbilidad) altos para muchos tipos de efectos en salud. Además, encontramos las emisiones de algunos elementos particulares, los cuales pueden tener efectos tóxicos particulares ya sea para efectos como el cáncer u otros (Crinnion & Pizzorno, 2018; Roberts et al., 2015). Estos efectos en salud han llevado a que los contaminantes sean regulados con normas como las de calidad de aire, y por algunos convenios internacionales como el Convenio de Basilea (*Convenio de Basilea, 2023*). Otras emisiones importantes son los residuos industriales líquidos, residuos industriales sólidos y las emisiones fugitivas.

Sobre las normas de calidad de aire. Es importante considerar las normas de calidad de aire pues indirectamente regulan las emisiones de contaminantes atmosféricos. Estas normas se basan en los efectos en salud descritos a nivel nacional y mundial, y usualmente siguen los ejemplos de la EPA y las guías de calidad de aire de la OMS. Actualmente las normas nacionales tienden a ser bastante más laxas que las sugerencias de la OMS. Por ejemplo, para el SO₂, la norma horaria chilena de 1 hora, que demoró mucho en establecerse, es de 350 µg m⁻³ (Ministerio del Medio Ambiente, 2019), mientras la sugerencia de la OMS es de 500 µg m⁻³ pero en 10 minutos. Esto dado que la evidencia de efectos en salud en niños es para períodos muy cortos de tiempo. Un problema que tiene esta norma es que opera con el percentil 99, pero para todas las horas del

año, cuando bastaría una hora al día para generar efectos en salud importante. Esto significa que es muy difícil, casi imposible superar la norma (hay 365x24 horas en un año). Una forma más razonable de entender este problema es haber aplicado el máximo horario diario. Este tema fue explicado en una observación ciudadana el año 2015 (ver anexo 1), junto con informes de la OMS sobre efectos en salud del SO₂. Esta observación nunca fue respondida, y la sugerencia sobre los percentiles no acogida. Para el MP_{2,5} se observa algo similar, con normas nacionales de 20 µg m⁻³ para concentración anual y 50 µg m⁻³ como concentración diaria (Ministerio del medio ambiente, 2023), mientras las guías de la OMS son 5 µg m⁻³ y 15 µg m⁻³, respectivamente. Esto da a entender que, aun cumpliendo la norma chilena, puede haber efectos en salud importantes.

4.3 Evidencia de contaminación en medios.

Sobre la contaminación del aire. Los niveles de contaminación atmosférica, particularmente de MP y SO₂ han disminuido, sobre todo a partir de los años 90 dada la entrada de nuevas regulaciones, como se puede apreciar en la Figura 2. Aun considerando esta reducción, los niveles se mantienen en valores cercanos a la latencia según las normas nacionales y superan ampliamente las guías de calidad de la OMS.

Sobre la medición de contaminantes y el cumplimiento de normas, parece preocupante el punto del Dr. Yuri Carvajal en su Informe Amicus Curiae (Carvajal, 2019), en el cual alerta la gran discrepancia entre las mediciones validadas y no validadas en las estaciones de monitoreo de la zona. Estas últimas son las que quedan inmediatamente disponibles en los sitios de la red MACAM, las cuales posteriormente, en un proceso no transparente, en las palabras del autor del informe amicus curiae, aparecen como validadas, pero con grandes cambios. La mayor preocupación se manifiesta en que mediciones no validadas presentan en episodios importantes los son “corregidas” desapareciendo los episodios.

Cómo síntesis, se puede afirmar que los niveles de contaminantes siguen siendo significativos, cumpliendo la norma, pero que aún cumpliendo la norma se esperan efectos en salud. Esto hace más probable la hipótesis 1.

Sobre contaminación en suelos. Existe mucha evidencia sobre contaminación de suelos en la zona y fitotoxicidad. No es la intención de

resumir todos éstos si no de destacar algunos más recientes en los que se destacan la influencia del CIV. En general todos estos estudios siguen un patrón similar, de coleccionar muestras de suelo a distintas distancias del CIV para ser luego analizar el contenido de elementos y determinar gradientes de concentraciones. Usualmente, los sitios en La Greda son los de más alto impacto. Un primer trabajo de (Parra, Bravo, Quiroz, Moreno, Karanasiou, Font, Vidal, & Cereceda-Balic, 2014) coleccionó muestras en 4 sitios entre el 2007 y 2009, encontrando mayores concentraciones al acercarse al CIV y resolviendo con métodos estadísticos un perfil asociado a una fuente industrial rica en Cu, Zn, As, Se, Mo, Sn, Sb y Pb.

En un segundo trabajo de (Salmanighabeshi et al., 2015) se tomaron 121 muestras de suelo en 5 sitios entre el 2007 y 2011. Usando métodos estadísticos se determinó un perfil industrial rico en As, Pb, Cd, Hg, Zn, Sb y Cu. Usando índices de geo acumulación, factores de enriquecimiento, factores de contaminación, grado de contaminación y un índice de contaminación integrada, se determinó que existen impactos ecológicos significativos.

Otro de (Tume et al., 2020) utilizó 361 muestras, de un estudio anterior de PGS del 2015, dispersas por toda la zona. Se encontraron altas concentraciones de As, Cd, Cu, ni, Pb, V y Zn, mayores que las encontradas en otras ciudades de Chile contaminadas como Arica y Talcahuano, pero similares a otras zonas industriales en el mundo (Zambia, Polonia, EEUU, Turquía, Serbia y China). Métodos estadísticos determinaron un perfil industrial rico en As, Cu, Pb y Zn, y un índice de geoacumulación extremadamente alto para Pb, As, Cd y Cu.

El último trabajo en esta línea es el de (Tapia-Gatica et al., 2020), en el cual se coleccionaron 245 muestras de suelo, dispersas por toda la zona de modo de poder construir mapas de concentraciones. Las concentraciones de Pb, As y Cu estaban muy correlacionadas entre sí y aumentan con la cercanía a CIV y a lo largo de los vientos predominantes lo que sugiere que el CIV es una fuente. Un 35% de las muestras mostró concentraciones de estos elementos por sobre los niveles base y concentraciones de Cu que eran por lo menos medianamente fitotóxicas.

Un trabajo algo diferente a los anteriores, pero muy ilustrador, es el de (Pérez et al., 2019), en el cual se estudia la contaminación en suelo de mercurio. Se tomaron muestras de suelo en 4 locaciones a nivel nacional en las cuales se analizó el

mercurio total y metilmercurio, la variedad tóxica del mercurio. Las muestras colectadas en Ventanas y en Renca mostraron altos niveles de mercurio total, alrededor de 40 veces más alto que los niveles control. Sin embargo, las muestras de Ventanas estaban particularmente disminuidas en metilmercurio, no registrándose muestras sobre el límite sugerido de 1 ng g⁻¹, mientras las muestras de Renca sobrepasaron ese valor en numerosas ocasiones. Los investigadores explican en su artículo que el metilmercurio se forma en los suelos por biotransformación debido a la acción de bacterias, pero que el suelo cercano al CIV está tan contaminado, por Cu principalmente, que la población de bacterias ha disminuido mucho, explicándose así los bajos valores de metilmercurio. Pareciera este uno de los pocos casos en que dos contaminantes antagonizan sus efectos entre ellos.

En síntesis, parece claro que existe una contaminación de los suelos, con elementos tóxicos y que la fuente parece provenir del CIV.

Sobre contaminación de sedimentos marinos. Ya en el informe del 2013 (Ministerio del Medio Ambiente, 2013) se alertaba de la gran descarga de contaminantes al mar en la bahía, que se manifestaba en muestras de sedimentos muy contaminadas por metales pesados, lo que podía esparcirse por las cadenas tróficas. Otro estudio posterior de (Parra et al., 2015) tomó 14 muestras de sedimentos marinos alrededor de la bahía de Quintero y realizaron análisis de elementos. Se encontraron más altas concentraciones de varios elementos (As, Cr, Co, Cu, Pb, Mn, Mo, Ni, Se, V, Zn) en las muestras más cercanas a los descargos comparadas con el sitio control. Además, usando métodos estadísticos se encontró un perfil de elementos (Hg, B, Cu, Sr y Mo) asociados a fuentes industriales y que el Cu estaba extremadamente enriquecido en algunas muestras. Estas dos evidencias alertan sobre posible contaminación de las cadenas tróficas que puede redundar en la pérdida de recursos marinos y/o el consumo de alimentos contaminados.

Sobre evidencia de contaminación histórica y deposición de contaminantes actuales. Recientemente se han publicado algunos artículos que con una novedosa metodología muestran cómo se ha estado contaminando la zona desde la instalación del CIV en los 60s y que, pese a algunas mejoras recientes, este proceso de contaminación persiste. El primer artículo de (Muñoz et al., 2019) usa la medición de elementos en los anillos de corteza de cipreses para reconstruir la contaminación del área desde 1964 a 2011. Se

compararon mediciones en cipreses en la zona afectada (Costa Quilén) con otros en una zona control (Isla Negra). Se encontraron más altas concentraciones de Pb, Cu, As, Fe, Mo, Cr y Zn en la zona expuesta, y que ha ido aumentando desde los años 60s con una reducción pequeña en años recientes luego de la entrada de nuevas regulaciones. En una línea similar, (Gayo et al., 2022) estudiaron columnas de sedimentos en los humedales de Los Maitenes. Los autores proponen que estas deposiciones son muy dinámicas, por lo que representan un flujo de contaminantes en el momento en que se generaron estos sedimentos más que el registro de flujos previos. Tal como el artículo anterior se encontraron tendencias al alza en el tiempo de muchos elementos, Cu, Hg, As, Pb, Cd, Zn, Sn, Nb, P, Mo, B y Sb, mientras otros más bien asociados a la corteza terrestre, como el Ti y Al, no mostraron aumentos. Estas alzas partieron en los 60s y se mantuvieron hasta un tiempo cercano a las nuevas regulaciones, en que las concentraciones se estabilizan, o disminuyen, pero no se acercan a niveles background. Estas dos publicaciones tienden a apoyar la idea de que, pese a algunas reducciones leves en los flujos de contaminación recientes, estos flujos se mantienen.

Esta evidencia se complementa con otros dos estudios recientes que muestran deposición de contaminantes en la zona. El primero de (Rueda-Holgado et al., 2016) colectó 156 muestras de deposición de polvo en zonas más y menos impactadas alrededor del CIV, entre los años 2010 y 2011. Se encontraron aumentos en las concentraciones de As, Cd, Co, Cu, Pb, Sb, Fe, V y Zn al acercarse al CIV, y estos niveles fueron similares a otras zonas urbanas e industriales contaminadas en el mundo. Usando métodos estadísticos pudieron determinar un perfil de elementos que parecía de origen industrial (As, Co, Cu, Pb, Sb, Zn, Cd) y estimaron que la deposición de Pb excedía una carga crítica para la zona. El siguiente estudio de (Cereceda-Balic et al., 2020) trabajó con 47 muestras de deposición de agua de lluvia, colectadas en 3 sitios con cercanía variable al CIV, en los inviernos del 2010 y 2011. Pudieron determinar enriquecimientos importantes de elementos asociados a las fuentes industriales (As, Cd, Hg, Cu, Zn, Sb), lo que fue refrendado por un análisis estadístico que sugirió una fuente industrial para Cu, As, Pb y Sb. Este conjunto de evidencia indica que pese a algunas mejoras en años recientes la zona cercana al CIV se sigue contaminando.

En síntesis, se aprecia la presencia de contaminantes conocidamente tóxicos en varios medios, aire, suelo, sedimentos, con mucha evidencia que proviene del CIV, y con la posibilidad de entrar a la cadena trófica y exponer a los habitantes del sector. Toda la evidencia da un apoyo a la hipótesis 1.

4.4 Evidencia de exposición y riesgo.

Sobre la exposición a polvo de suelo. Se presenta la evidencia de un grupo de 4 estudios. En estos, se estimaron ingestas diarias promedio de elementos por distintas rutas de exposición, esto es, ingesta oral, absorción dermal e inhalación, para luego estimar riesgos posibles de efectos en salud tipo cáncer y no cáncer. En el caso del cáncer, usualmente se usan curvas dosis-respuestas lineales, por lo que cada aumento en la dosis aumenta el riesgo, y se intenta definir si el riesgo calculado sobrepasa un valor de 1 caso de cáncer en 10.000 (1×10^{-4}), que se consideran inaceptables, si se encuentra entre 1 en 1.000.000 (1×10^{-6}) y 1×10^{-4} , que se considera de riesgo elevado pero tolerable dependiendo del contexto, y menor a 1×10^{-6} , que se considera de riesgo no significativo. Los efectos tipo no cáncer, en cambio, se centran en estimar exposiciones que superan un umbral límite, sobre el cuál, se puede considerar que puede haber efectos en salud.

El primer estudio de (Salmani-Ghabeshi et al., 2016) hace uso de los datos de muestreo de un estudio anterior (Salmanighabeshi et al., 2015). Se identificó la ingesta de polvo como la principal ruta de exposición y se encontraron riesgos de efectos de no cáncer para As en niños y de no cáncer en niños y adultos al considerar todos los elementos juntos. Además, se encontraron riesgos de cáncer inaceptables por As en niños, en algunos sitios cercanos al CIV, y tolerables para niños y adultos, en la mayoría de los otros sitios.

En el trabajo de (Berasaluce et al., 2019) se colectaron muestras de polvo en 100 hogares y de suelo en los alrededores de la zona. Se encontraron riesgos mayores al considerar las muestras de polvo residencial (ver sección más abajo). En este trabajo no se encontraron riesgos elevados para efectos no cáncer, pero sí riesgos inaceptables para niños pequeños (hasta 5 años) en toda la zona y para todos los niños (hasta 18 años) en las zonas más expuestas.

Un siguiente trabajo del mismo grupo (Tapia-Gatica et al., 2020), y usando los datos de un extenso muestreo espacial (ver sección anterior), determinó que en un 27% de la zona se alcanzan niveles de As que representan un riesgo inaceptable para

niños pequeños. Los autores comentan además que el trabajo de (Salmani-Ghabeshi et al., 2016) pudo a ver sobreestimado la ingesta de polvo.

Finalmente, el estudio de (Tume et al., 2020), explicado anteriormente, encuentra riesgos de efectos no cáncer para As y V, en muestras más cercanas al CIV, y riesgos tolerables por ingesta de As en niños.

En síntesis, los estudios de riesgo por exposición a polvo muestran que la principal ruta es la ingesta de polvo y muestran riesgos elevados y significativos tanto de efectos no cáncer y cáncer, particularmente en niños y asociados a exposiciones a As. Los riesgos se elevan al acercarse al CIV tal como se vio con respecto a las concentraciones en las secciones anteriores. Pese a alguna discrepancia en la magnitud, se aprecia en general un riesgo elevado en la zona. En general la evidencia apoya la hipótesis 1.

Sobre la exposición a través de alimentos contaminados. Dos artículos estiman exposiciones y riesgos por consumo de alimentos, uno por consumo de pescados y otro por consumo de vegetales. El primer trabajo de (Bravo et al., 2019) tomó muestras de distintos tipos de pescados en comercios locales, preocupándose de incluir peces depredadores, los cuáles tienden a bioacumular contaminantes. Estas muestras fueron analizadas para mercurio (en que se puede considerar que todo este mercurio está como metilmercurio, la variante tóxica). Se encontró, como se anticipaba, que muchas muestras contenían mercurio en altas concentraciones, superando las guías de la EPA, y que estas concentraciones eran mayores en los peces depredadores como la albacora y atún enlatado. Ante esta última observación, el artículo no explica cómo se pueden haber contaminado los pescados.

En un segundo artículo de (Lizardi et al., 2020), se cultivaron vegetales en pequeñas parcelas en zonas de alta, media y baja contaminación, cerca del CIV, en el 2016 y 2017. Se cultivaron vegetales de hojas comestibles como lechuga, repollo, acelga, y de raíz comestible, como papas, zanahorias y betarragas. Adicionalmente se tomaron muestras de suelo. Las muestras de vegetales fueron exhaustivamente lavadas, y junto a las de suelo, fueron analizadas para determinar la concentración de elementos. Usando información de dieta, se estimó una ingesta promedio probable. Los resultados mostraron concentraciones aumentadas en suelo de Cu y As en las zonas más contaminadas, que los vegetales de hoja comestible acumularon más elementos que

los de raíz, y que los vegetales en las zonas contaminadas podían tener concentraciones hasta 5 veces mayores de As y Cu que las cultivadas en la zona control. El riesgo por esta ingesta no superaba un límite descrito ($HQ \sim 0.6$) pero si se consideraba la ingesta probable de vegetales y de polvo, descrito en otros estudios, este límite si se superaba ($HQ \sim 1,2$).

Un último informe que mencionar es el del (Ministerio del Medio Ambiente, 2013) en que se analizaron el contenido de elementos en organismos marinos de la bahía, encontrándose altas concentraciones de metales pesados en algas, chorrillos, jaibas y algunos pescados.

En síntesis, se confirma que los contaminantes pueden entrar en las cadenas tróficas y que estas exposiciones pueden aumentar los riesgos de los habitantes de la zona, y como se mostró, sumarse a los riesgos por otras rutas de exposición. Se puede considerar como evidencia para la hipótesis 1.

Sobre como al mejorar la evidencia de exposición aumenta el riesgo. Se detallan aquí algunos ejemplos de trabajos que describen el cómo al mejorar nuestra estimación de exposición o naturaleza del contaminante tiende a aumentar el riesgo.

En el trabajo de (Rueda-Holgado et al., 2014) se tomaron 14 muestras de suelo el 2014. Tal como en otros trabajos se muestra una mayor concentración de elementos en suelo (Sr, As, Cd,) en sectores más cercanos al CIV (La Greda), pero adicionalmente determinaron la solubilidad de este material, encontrándose que entre 50%-60% de los elementos pueden estar en la fracción soluble lo que es un antecedente de que el material es antropogénico (y no de fuentes geológicas) y que el material es biodisponible, o sea, es más fácil que sea captado por un organismo.

En el trabajo de (Parra, Bravo, Quiroz, Moreno, Karanasiou, Font, Vidal, & Cereceda, 2014) se colectaron muestras de suelo entre los años 2007-2009 en distintas zonas del sector y se analizaron elementos. Se utilizó una técnica para determinar el tamaño de las partículas en el polvo. Se encontró, como en otros estudios, gran presencia de elementos en el suelo (Cu, Zn, As, Se, Mo, Cd, Sb, Pb), que aumentaban al acercarse al CIV, y que se enriquecían en la fracción de partículas más pequeñas. Este es un hallazgo importante pues el menor tamaño de partículas puede relacionar con una mayor capacidad de dispersarse, entrar en las viviendas, ser ingerido o inhalado, por tanto, aumenta el riesgo de exposición.

Finalmente, en el trabajo de (Berasaluce et al., 2019) se tomaron muestras de suelo en distintos sectores de la zona y dentro de las casas de 100 familias y se analizaron por elementos. En general, se encontraron mayores concentraciones más cerca del CIV y mayores concentraciones de As, Pb y Cu dentro de los hogares que afuera. Lo que muestra cómo las exposiciones pueden ser mayores a las estimadas si solo tomamos muestras en medios (suelo) pero no cerca de donde habitan las personas.

Como se aprecia, al considerar el tamaño de partícula, solubilidad y presencia en microambientes donde permanecen las personas, se encuentra evidencia que apunta a que aumenta el riesgo de exposición. La mayoría de la evidencia en suelo tiende a no considerar estos aspectos por lo que se puede considerar que este grupo de evidencia tiende a apoyar que los riesgos en salud pueden ser mayores a los estimados, y por tanto sería un apoyo a la hipótesis 1 más que a la hipótesis 2.

Sobre evidencia de que los contaminantes han entrado al cuerpo de las personas y pueden producir efectos fisiopatológicos. En las secciones anteriores hemos descrito evidencia de presencia de contaminantes en medios que lleva a la exposición de personas. Exposición se entiende, en términos simples, que las personas entran en contacto con las sustancias. La siguiente pregunta es si existe alguna evidencia que muestre que estos contaminantes han entrado al cuerpo de las personas, y así generar una dosis que pueda gatillar un efecto en salud. Esta evidencia se busca a través de biomarcadores (Nieuwenhuijsen, 2015) que pueden ser de exposición o de efecto. Los primeros muestran la presencia del contaminante, o sus derivados, dentro del cuerpo, por ejemplo, en fluidos, pelos o uñas. El segundo muestra evidencia que se ha iniciado un proceso fisiopatológico, por ejemplo, con evidencia de daño al ADN. En la búsqueda se encontraron 2 artículos sobre biomarcadores de exposición y 1 sobre biomarcadores de efecto.

El primer artículo que incluye biomarcadores de exposición es el de (Berasaluce et al., 2019) en el cual se estudiaron 205 personas en 100 hogares (134 adultos y 71 niños) a las cuáles se les tomaron muestras de pelo y uñas de los pies. Las concentraciones de elementos se correlacionaron con las estimaciones de ingesta por distintos medios explicados en la sección anterior. Se encontraron altas correlaciones entre la ingesta y las concentraciones en pelo para As y Pb, y entre ingesta y concentraciones en uñas para todos los elementos

(As, Pb, Cu y Cd). A su vez, la ingesta estaba relacionada a la cercanía al CIV, por lo que sería una prueba que los contaminantes del CIV han entrado al cuerpo de las personas.

El siguiente es el de (Bravo et al., 2019) en el que se tomaron muestra de pelo a 199 personas el año 2016, aparte de determinar la ingesta de mercurio por pescados. Se encontró que una parte importante de los sujetos tenía concentraciones en pelo que superaban el límite sugerido de la EPA de $1 \mu\text{g m}^{-3}$ y una alta correlación entre las concentraciones de mercurio en pelo y la ingesta mediante pescados, siendo la contribución de mercurio por suelos contaminados no significativa. Pese a que el origen del mercurio no es claro en el CIV, si es relevante que aumenta la carga en los habitantes y que puede dar pie a efectos sinérgicos con otros contaminantes.

El artículo sobre biomarcadores de efecto es el de (Madrid et al., 2022). En este se estudian muestras de sangre de 280 personas, 140 que viven en zonas de alta contaminación, según un artículo previo (Tapia-Gatica et al., 2020), y 140 en zonas de baja contaminación. Se analizó el nivel de metilación de 4 genes relacionados con el desarrollo de cáncer. Este tipo de estudios se conoce como de epigenética, pues se considera como el medio ambiente puede interactuar con los genes, pero sin modificar su secuencia, si no cambiando su nivel de activación a través de la metilación (Hou et al., 2012). Como resultado principal se encontró un cambio en la metilación del gen p53, que es un oncogén, y que puede activar una ruta fisiopatológica que lleva al cáncer. Además, este cambio fue mayor en las zonas más contaminadas y asociados a elementos (As, Cu, Pb, Zn) asociados a las emisiones del CIV.

En síntesis, esta sección muestra evidencia que muchos de los contaminantes si han podido entrar al cuerpo, que se pueden encontrar en concentraciones altas, y que se asocian a las exposiciones, ya sea por ingesta de polvo en el interior de hogares o por alimentos. A su vez, estas rutas de exposición están relacionados a medios contaminados en el área como son el suelo y el mar. Aún más, uno de los artículos muestra que estos contaminantes están asociados a rutas fisiopatológicas que están relacionadas con el desarrollo del cáncer. En general, esta evidencia tiende a apoyar mucho más la hipótesis 1 que la hipótesis 2.

Síntesis. Se muestra evidencia que la población está expuesta a contaminantes por varias rutas, principalmente por el polvo y alimentos, que estas

exposiciones pueden entrar al cuerpo, iniciar procesos fisiopatológicos y que representan riesgos altos. A esto se puede sumar los riesgos por exposición a contaminantes atmosféricos. Dado el número de contaminantes y exposiciones es posible anticipar efectos sinérgicos. Es difícil sustentar la hipótesis 2, que el CIV no produce efectos en salud, frente a esta evidencia.

4.5 Evidencia de efectos en salud

Sobre estudios de asociaciones entre exposiciones y efectos en salud. Como evidencia de asociación entre exposiciones y efectos en salud encontramos dos artículos y 1 informe. El primero es el de (Sánchez et al., 1999). En este trabajo se muestran asociaciones significativas entre MP10 y SO₂ con síntomas respiratorios en niños; esto es, los días de mayores concentraciones se aprecian más síntomas como tos o sibilancias. Dado que las concentraciones de estos contaminantes han bajado, pero mantienen cierto nivel, y que en general las relaciones entre contaminantes y efectos en salud son lineales (a cada pequeño aumento de concentración se asocia algún aumento en los efectos), es posible que se mantengan una parte de los efectos observados.

Quizás uno de los trabajos más relevantes para esta evaluación es el de (Ruiz-Rudolph et al., 2016). En éste se trabaja con datos comunales de movilidad y mortalidad entre los años 2000 y 2010, y se asocian el aumento de efectos con la presencia de grandes fuentes industriales. Justamente por la dificultad de trabajar con poblaciones pequeñas es que se realiza este análisis a nivel nacional, usando así, todas las comunas que presentan estas fuentes, y que incluye la zona de estudio. Los resultados son muy categóricos, encontrándose aumentos importantes (entre 10% y 100%) de mortalidad total y por algunas causas (cardiovascular, respiratoria, cáncer y cáncer al pulmón) y hospitalizaciones (cardiovascular, respiratoria, cáncer y neumonía), tanto para hombres como para mujeres, en las comunas con plantas industriales. Más aún, los efectos encontrados se asociaron tanto a termoeléctricas a carbón como a fundiciones de cobre por separado, lo cual es muy importante considerando que en la zona se encuentran ambas fuentes. Este estudio puede dar una indicación de posible rango de la magnitud de los efectos más globales de la presencia de estas instalaciones.

Por último, un estudio del Departamento de Salud Pública de la PUC (Departamento de Salud Pública. Pontificia Universidad Católica, 2011) estudió

exhaustivamente niños de la Escuela de La Greda y encontró evidencia de niveles altos de plomo en sangre y sospecha de trastornos neurosicológicos.

Sobre otra evidencia registrada. También podemos considerar un efecto en salud la experiencia de vivir en una zona contaminada, sobre todo para niños. Varios trabajos de corte periodístico han mostrado la realidad de vivir en la zona, mostrando en primera persona la afectación de los niños que sienten vivir y respirar “aire cochino”^{2,3,4,5,6}. Otra línea de evidencia importante es la percepción de la comunidad de los graves riesgos en salud a los que están expuestos. Esto se recoge en un informe del Instituto de Sociología de la Pontificia Universidad Católica (Pontificia Universidad Católica de Chile. Instituto de Sociología, 2014). En una sección sobre la percepción respecto a la enfermedad se describe de esta manera:

“En Puchuncaví, el riesgo medioambiental más recurrente y sentido, es la potencial enfermedad, tanto en las personas como en los animales- simbolizados por los animales “verdes” y la asociación por parte de los entrevistados con la presencia de patologías (cáncer, deficiencias mentales, problemas a la vista), de acuerdo a la percepción de los consultados” (pag 83)

Otro aspecto importante son los episodios de intoxicaciones relativamente usuales. Estos, principalmente ocurridos entre el 2011-2018 posiciona mediáticamente la problemática ambiental del CIV generando además una serie de informes técnicos a nivel del estado, estudios científicos, y acciones en aspectos de política pública. Una de las medidas fue colocar purificadores del aire en algunos salones de los centros educativos. En años recientes un episodio generó un recurso de protección que fue acogido por la Corte Suprema⁷. Sin embargo, episodios y otros eventos, como incendios, han seguido ocurriendo, como informaron recientemente los medios^{8,9,10}.

En síntesis, se muestra alguna evidencia de afectación a la salud de niños y graves afectaciones a la salud derivados de un estudio nacional y que pudiera aplicarse para estimar la magnitud de riesgos en la zona. La percepción de la condición de salud se condice con esta evidencia nacional de una grave afectación. La presencia de episodios, que siguen ocurriendo, es una fuente de preocupación, y representa otra cara de la afectación a la salud. Esta evidencia tiende a apoyar la hipótesis 1.

5. SÍNTESIS

En resumen, considerando:

Que existe evidencia de presencia de contaminantes conocidamente tóxicos, que se espera tengan efectos amplios, de muchos tipos, que son regulados, que la población está expuesta por distintos medios, que estas exposiciones representan riesgos importantes, que hay evidencia que han entrado al cuerpo de las personas y activado mecanismos fisiopatológicos.

Que existe evidencia que al mejorar la estimación de exposición usual se aumentan los riesgos.

Que se anticipan efectos en salud aun cumpliendo las normas. Que existen algunos problemas en la definición de algunas normas para proteger a la población (SO₂). Que se han detectado problemas en el monitoreo para el cumplimiento de normas.

Que existen episodios usuales fuera de control cuya magnitud de impacto es difícil de dimensionar.

Que existe evidencia de efectos a la salud importantes por estas industrias por un trabajo a nivel nacional, y que hay evidencia de afectación de la salud en niños.

Que el tipo de efectos esperados (efectos crónicos como el cáncer) requieren un tiempo largo de estudio y que el pequeño tamaño de la población dificulta, si no imposibilita, el estudio de asociaciones entre exposición y este tipo de efectos en salud.

Que los contaminantes presentes son muy

2 https://sochipe.cl/v3/esteto_articulo_solo.php?id=1237

3 <https://www.elmostrador.cl/noticias/pais/2011/12/26/el-informe-que-revela-contaminacion-en-todos-los-colegios-de-puchuncavi/>

4 <https://radio.uchile.cl/2011/12/27/informe-ratifica-presencia-de-metales-pesados-en-todas-las-escuelas-de-puchuncavi/>

5 https://www.cnnchile.com/pais/nina-emplaza-a-las-empresas-por-el-aire-cochino-de-quintero-es-el-colmo-porque-perdemos-nuestro-derecho-de-estudiar_20180824/

6 <https://www.terram.cl/2022/08/quintero-y-puchuncavi-ninez-y-vejez-de-sacrificio/>

7 <https://www.diarioconstitucional.cl/2019/05/30/cs-revoco-sentencia-y-acoge-protecciones-por-contaminacion-en-quintero-ventanas-y-puchuncavi/>

8 <https://www.elmostrador.cl/opinion-newsletter/2022/12/30/incendio-en-puerto-ventanas-que-pone-en-tela-de-juicio-la-evaluacion-ambiental/>

9 <https://www.emol.com/noticias/Nacional/2023/03/16/1089483/sma-fiscaliza-codelco-quintero-azufre.html>

10 <https://www.latercera.com/nacional/noticia/municipio-de-quintero-informa-37-escolares-afectados-por-contaminacion-del-aire/UGD246MUF5E6RN4AFFS7VDLQDI/>

variados y que es muy posible que haya sinergia en sus efectos sus efectos.

Que se está en una población que se podría considerar vulnerable por lo que los riesgos a la salud pueden ser mayores a los anticipados para una población sana.

Parece probable o mucho más probable que haya efectos en salud debido a las emisiones del CIV a que no. Desde el punto de vista contrario, y a la luz de la evidencia, la hipótesis dos, que exista la presencia de un complejo industrial de esta naturaleza y que no produzca efectos en salud en las poblaciones circundantes parece improbable.

Sobre la magnitud de efectos, parece más probable que haya efectos en salud importantes como los descritos en el estudio nacional de (Ruiz-Rudolph et al., 2016), lo descrito en algunos episodios de intoxicaciones y lo relatado por miembros de la comunidad a que sean relativamente leves.

REFERENCIAS

- Baker, D., & Nieuwenhuijsen, M. J. (2008). *Environmental Epidemiology: Study methods and application*. Oxford University Press.
- Berasaluce, M., Mondaca, P., Schuhmacher, M., Bravo, M., Sauvé, S., Navarro-Villarroel, C., Dovletyarova, E. A., & Neaman, A. (2019). Soil and indoor dust as environmental media of human exposure to As, Cd, Cu, and Pb near a copper smelter in central Chile. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 54, 156–162. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2019.04.006>
- Bravo, M. A., Parra, S., Quiroz, W., & Neaman, A. (2019). HUMAN EXPOSURE ASSESSMENT TO MERCURY THROUGH HAIR ANALYSIS IN COASTAL VILLAGES OF THE VALPARAISO REGION (CHILE). In *J. Chil. Chem. Soc* (Vol. 64).
- Carvajal, Y. (2019). *INFORME AMICUS CURIAE SOBRE EL PLAN DE DESCONTAMINACIÓN DE VENTANAS*.
- Cereceda-Balic, F., Gala-Morales, M. de la, Palomo-Marín, R., Fadic, X., Vidal, V., Funes, M., Rueda-Holgado, F., & Pinilla-Gil, E. (2020). Spatial distribution, sources, and risk assessment of major ions and trace elements in rainwater at Puchuncaví Valley, Chile: The impact of industrial activities. *Atmospheric Pollution Research*, 11(6), 99–109. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.03.003>
- *Convenio de Basilea*. (2023). [Http://Www.Basel.Int/Portals/4/Basel%20convention/Docs/Text/Baselconventiontext-s.Pdf](http://www.Basel.Int/Portals/4/Basel%20convention/Docs/Text/Baselconventiontext-s.Pdf).
- Cranor, C. F. (1993). *Regulating Toxic Substances: A Philosophy of Science and the Law*. Oxford University Press.
- Cranor, C. F. (2016). *Toxic Torts*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781316585368>
- Crinnion, W., & Pizzorno, J. (2018). *Clinical Environmental Medicine: Identification and Natural Treatment of Diseases Caused by Common Pollutants*.
- Departamento de Salud Pública. Pontificia Universidad de Católica. (2011). *Evaluación de los efectos en salud en escolares asistentes a la Escuela Básica La Greda*.
- Frangkou, M. C. (2019). Environmental Justice. In *The Wiley Blackwell Encyclopedia of Urban and Regional Studies* (pp. 1–6). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118568446.eurs0091>
- Frumkin, H. (2016). Environmental Justice. In *Environmental Health: From Local to Global*. Wiley.
- Gayo, E. M., Muñoz, A. A., Maldonado, A., Lavergne, C., Francois, J. P., Rodríguez, D., Klock-Barría, K., Sheppard, P. R., Aguilera-Betti, I., Alonso-Hernández, C., Mena-Carrasco, M., Urquiza, A., & Gallardo, L. (2022). A Cross-Cutting Approach for Relating Anthropocene, Environmental Injustice and Sacrifice Zones. *Earth's Future*, 10(4). <https://doi.org/10.1029/2021EF002217>
- Greenland, S. (1990). Re: “Those who were wrong”. *American Journal of Epidemiology*, 132(3), 585–586. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a115697>
- Greenland, S. (1991). Invited Commentary: Science versus Public Health Action: Those Who Were Wrong Are Still Wrong. In *American Journal of Epidemiology* (Vol. 133, Issue 5).
- Health Organization, W., & Office for Europe, R. (2013). *Review of evidence on health aspects of air pollution-REVTHAAP Project Technical Report*. <http://www.euro.who.int/pubrequest>
- HILL, A. B. (1965). THE ENVIRONMENT AND DISEASE: ASSOCIATION OR CAUSATION? *Proceedings of the Royal Society of Medicine*, 58(5), 295–300.

- Hou, L., Zhang, X., Wang, D., & Baccarelli, A. (2012). Environmental chemical exposures and human epigenetics. *International Journal of Epidemiology*, 41(1), 79–105. <https://doi.org/10.1093/ije/dyr154>
- Legaspi, E. (2019). Etnografías y tecnocracia en zona de sacrificio. *Cuadernos Médico Sociales*, 59(2), 41–59. <https://www.facebook.com/rnsvalparaisochile/videos/215142659357856/>
- Lizardi, N., Aguilar, M., Bravo, M., Fedorova, T. A., & Neaman, A. (2020). Human Health Risk Assessment from the Consumption of Vegetables Grown near a Copper Smelter in Central Chile. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20(3), 1472–1479. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00226-w>
- Ministerio de Desarrollo Social. (2017). *Encuesta CASEN*. <Http://Observatorio.Ministeriodesarrollosocial.Gob.Cl/Encuesta-Casen-2017>.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2013). *ANÁLISIS DE RIESGO ECOLÓGICO POR SUSTANCIAS POTENCIALMENTE CONTAMINANTES EN EL AIRE, SUELO Y AGUA, EN LAS COMUNAS DE CONCÓN, QUINTERO Y PUNCHUNCAVÍ*.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2019). *Norma Primaria de Calidad del Aire de Dióxido de Azufre*. <Https://Mma.Gob.Cl/Norma-Primaria-de-Calidad-Del-Aire-de-Dioxido-de-Azufre-Es-Aprobada-Por-La-Contraloria-General-de-La-Republica/>.
- Ministerio del medio ambiente. (2023). *Norma de calidad de aire*. <Https://Sinca.Mma.Gob.Cl/Index.Php/Pagina/Index/Id/Norma>.
- Muñoz, A. A., Klock-Barría, K., Sheppard, P. R., Aguilera-Betti, I., Toledo-Guerrero, I., Christie, D. A., Gorena, T., Gallardo, L., González-Reyes, Á., Lara, A., Lambert, F., Gayo, E., Barraza, F., & Chávez, R. O. (2019). Multidecadal environmental pollution in a mega-industrial area in central Chile registered by tree rings. *Science of the Total Environment*, 696. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133915>
- Nieuwenhuijsen, M. J. (2015). *Exposure Assessment in Environmental Epidemiology* (M. J. Nieuwenhuijsen, Ed.). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/med/9780199378784.001.0001>
- Parra, S., Bravo, M. A., Quiroz, W., Moreno, T., Karanasiou, A., Font, O., Vidal, V., & Cereceda, F. (2014). Distribution of trace elements in particle size fractions for contaminated soils by a copper smelting from different zones of the Puchuncaví Valley (Chile). *Chemosphere*, 111, 513–521. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.03.127>
- Parra, S., Bravo, M. A., Quiroz, W., Moreno, T., Karanasiou, A., Font, O., Vidal, V., & Cereceda-Balic, F. (2014). Source apportionment for contaminated soils using multivariate statistical methods. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 138, 127–132. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2014.08.003>
- Parra, S., Bravo, M. A., Quiroz, W., Querol, X., & Paipa, C. (2015). Distribution and pollution assessment of trace elements in marine sediments in the Quintero Bay (Chile). *Marine Pollution Bulletin*, 99(1–2), 256–263. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.07.066>
- Pearce, N., Blair, A., Vineis, P., Ahrens, W., Andersen, A., Anto, J. M., Armstrong, B. K., Baccarelli, A. A., Beland, F. A., Berrington, A., Bertazzi, P. A., Birnbaum, L. S., Brownson, R. C., Bucher, J. R., Cantor, K. P., Cardis, E., Cherrie, J. W., Christiani, D. C., Cocco, P., ... Zahm, S. H. (2015). IARC Monographs: 40 Years of Evaluating Carcinogenic Hazards to Humans. *Environmental Health Perspectives*, 123(6), 507–514. <https://doi.org/10.1289/ehp.1409149>
- Pearl, J., & Mackenzie, D. (2018). *The Book of Why: The new Science of Cause and Effect*. BasicBooks.
- Pérez, P. A., Hintelmann, H., Lobos, G., & Bravo, M. A. (2019). Mercury and methylmercury levels in soils associated with coal-fired power plants in central-northern Chile. *Chemosphere*, 237. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124535>
- Pontificia Universidad Católica de Chile. Instituto de Sociología. (2014). *COMUNICACIÓN DEL RIESGO AMBIENTAL PARA LAS SUSTANCIAS POTENCIALMENTE CONTAMINANTES EN EL AIRE, SUELO Y AGUA, EN LAS COMUNAS DE CONCÓN, QUINTERO Y PUCHUNCAVÍ*.

- Roberts, S. M., James, R. C., & Williams, P. L. (2015). *Principles of Toxicology: Environmental and Industrial Applications 3rd Edición*. Wiley.
- Rothman, K. J. (1976). Reviews and Commentary CAUSES. In *AMERICAN Journal of Epidemiology Formerly AMERICAN JOURNAL OF HYGIENE*.
- Rothman, K. J., & Greenland, S. (2005). Causation and causal inference in epidemiology. In *American Journal of Public Health* (Vol. 95, Issue SUPPL. 1). <https://doi.org/10.2105/AJPH.2004.059204>
- Rothman, K. J., Lash, T. L., & Greenland, S. (2008). *Modern Epidemiology*. Wolters.
- Rueda-Holgado, F., Calvo-Blázquez, L., Cereceda-Balic, F., & Pinilla-Gil, E. (2016). Temporal and spatial variation of trace elements in atmospheric deposition around the industrial area of Puchuncaví-Ventanas (Chile) and its influence on exceedances of lead and cadmium critical loads in soils. *Chemosphere*, 144, 1788–1796. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.10.079>
- Rueda-Holgado, F., Palomo-Marín, M. R., Calvo-Blázquez, L., Cereceda-Balic, F., & Pinilla-Gil, E. (2014). Fractionation of trace elements in total atmospheric deposition by filtering-bulk passive sampling. *Talanta*, 125, 125–130. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2014.02.019>
- Ruiz-Rudolph, P., Arias, N., Pardo, S., Meyer, M., Mesías, S., Galleguillos, C., Schiattino, I., & Gutiérrez, L. (2016). Impact of large industrial emission sources on mortality and morbidity in Chile: A small-areas study. *Environment International*, 92–93, 130–138. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.03.036>
- Salmani-Ghabeshi, S., Palomo-Marín, M. R., Bernalte, E., Rueda-Holgado, F., Miró-Rodríguez, C., Cereceda-Balic, F., Fadic, X., Vidal, V., Funes, M., & Pinilla-Gil, E. (2016). Spatial gradient of human health risk from exposure to trace elements and radioactive pollutants in soils at the Puchuncaví-Ventanas industrial complex, Chile. *Environmental Pollution*, 218, 322–330. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.07.007>
- Salmanighabeshi, S., Palomo-Marín, M. R., Bernalte, E., Rueda-Holgado, F., Miró-Rodríguez, C., Fadic-Ruiz, X., Vidal-Cortez, V., Cereceda-Balic, F., & Pinilla-Gil, E. (2015). Long-term assessment of ecological risk from deposition of elemental pollutants in the vicinity of the industrial area of Puchuncaví-Ventanas, central Chile. *Science of the Total Environment*, 527–528, 335–343. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.010>
- Sánchez, J., Romieu, I., Ruiz, S., Pino, P., & Gutiérrez, M. (1999). Efectos agudos de las partículas respirables y del dióxido de azufre sobre la salud respiratoria en niños del área industrial de Puchuncaví, Chile. *Revista Panamericana de Salud Pública*, 6(6). <https://doi.org/10.1590/S1020-49891999001100003>
- Savitz, D. A., Greenland, S., Stolley, P. D., & Kelsey, J. L. (1990). Scientific Standards of Criticism: A Reaction to “Scientific Standards in Epidemiologic Studies of the Menace of Daily Life,” by A.R. Feinstein. *Epidemiology*, 1(1), 78–82. <https://doi.org/10.1097/00001648-199001000-00017>
- Susser, M. (1977). Judgement and causal inference: criteria in epidemiologic studies. *American Journal of Epidemiology*, 105(1), 1–15. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a112349>
- Tapia-Gatica, J., González-Miranda, I., Salgado, E., Bravo, M. A., Tessini, C., Dovletyarova, E. A., Paltseva, A. A., & Neaman, A. (2020). Advanced determination of the spatial gradient of human health risk and ecological risk from exposure to As, Cu, Pb, and Zn in soils near the Ventanas Industrial Complex (Puchuncaví, Chile). *Environmental Pollution*, 258. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113488>
- Tume, P., Barrueto, K., Olguin, M., Torres, J., Cifuentes, J., Ferraro, F. X., Roca, N., Bech, J., & Cornejo, O. (2020). The influence of the industrial area on the pollution outside its borders: a case study from Quintero and Puchuncavi districts, Chile. *Environmental Geochemistry and Health*, 42(8), 2557–2572. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00423-2>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2019). *Integrated Science Assessment for Particulate Matter (December 2019)*. www.epa.gov/isa
- Vandenbroucke, J. P. (1989). Those who were wrong. *American Journal of Epidemiology*, 130(1), 3–5. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a115320>
- World Health Organization. (2006). *Air*

- quality guidelines : global update 2005 : particulate matter, ozone, nitrogen dioxide, and sulfur dioxide.* World Health Organization.
- World Health Organization. (2021). *Air quality guidelines 2021*. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>
 - World Health Organization. International Agency for Research on Cancer. (2010). *Household Use of Solid Fuels and High-temperature Frying. LARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Volume 95.*