Gaceta Sanitaria 40 (2026) 102676

Original

Contaminación atmosférica y mortalidad por cáncer en comunas de la Región de Valparaíso, Chile (2009-2019)

Florencia Lastarria[a,b,c], Catalina Morales[d], Verónica Iglesias[e,f], Gabriel Cavada[e] y María Teresa Muñoz-Quezada[c,e,f,*]

[a] Programa de Doctorado en Salud Pública, Instituto de Salud Poblacional, Facultad de Medicina, Universidad de Chile, Santiago, Chile
[b] Departamento de Enfermería, Facultad de Medicina, Universidad de La Frontera, Temuco, Chile
[c] Centro de Investigación y Acción en Determinación Social y Salud Mental, Santiago, Chile
[d] Escuela de Medicina, Facultad de Medicina, Universidad de Chile, Santiago, Chile
[e] Instituto de Salud Poblacional, Facultad de Medicina, Universidad de Chile, Santiago, Chile
[f] Centro para la Prevención y el Control del Cáncer, Santiago, Chile

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historia del artículo:
Recibido el 8 de febrero de 2026
Aceptado el 24 de septiembre de 2026

Palabras clave:
Contaminación del aire
Mortalidad por cáncer
Neoplasias gástricas
Material particulado
Dióxido de azufre
Estudios ecológicos

RESUMEN

Objetivo: Estimar la asociación entre las concentraciones anuales de SO_2, $PM_{2,5}$ y PM_{10} y las tasas de mortalidad estandarizadas por edad por cáncer total y cáncer de estómago en cinco comunas de la Región de Valparaíso, Chile, entre 2009 y 2019.
Método: Estudio ecológico de series temporales en Valparaíso, Viña del Mar, Quintero, Quillota y Catemu. Las tasas de mortalidad se estandarizaron por edad y las concentraciones anuales de contaminantes se obtuvieron del Sistema Nacional de Información de Calidad del Aire. Se aplicaron modelos de regresión de Prais-Winsten ajustados por tendencia temporal y autocorrelación. Se realizaron análisis exploratorios estratificados por sexo.
Resultados: Se observaron asociaciones positivas entre SO_2 y la mortalidad por cáncer de estómago en Catemu (β = 0,62; IC95%: 0,28-0,96), entre PM_{10} y la mortalidad por cáncer total en Quintero (β = 2,81; IC95%: 1,05-4,57), y entre $PM_{2,5}$ y la mortalidad por cáncer de estómago en Viña del Mar (β = 0,55; IC95%: 0,22-0,88). En los hombres de Quintero, el PM_{10} también se asoció con ambos desenlaces.
Conclusiones: Los hallazgos aportan evidencia de una asociación entre la contaminación atmosférica y la mortalidad por cáncer en comunas con diferentes perfiles de exposición, especialmente en Quintero y Catemu, territorios con histórica contaminación industrial. Aunque el diseño ecológico y la ausencia de información individual limitan la inferencia causal, los resultados justifican fortalecer el monitoreo ambiental y desarrollar estudios longitudinales que evalúen el impacto de la exposición crónica a contaminantes atmosféricos sobre la mortalidad por cáncer.

© 2026 SESPAS. Publicado por Elsevier España, S.L.U. Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Air pollution and cancer mortality in municipalities of the Valparaíso Region, Chile (2009–2019)

Keywords:
Air pollution
Cancer mortality
Stomach neoplasms
Particulate matter
Sulfur dioxide
Ecological studies

ABSTRACT

Objective: To estimate the association between annual concentrations of SO_2, $PM_{2,5}$, and PM_{10} and age-standardized mortality rates for all cancers and stomach cancer in five municipalities of the Valparaíso Region, Chile, between 2009 and 2019.
Method: An ecological time-series study was conducted in Valparaíso, Viña del Mar, Quintero, Quillota, and Catemu. Age-standardized mortality rates were calculated using the direct method, and annual air pollutant concentrations were obtained from the National Air Quality Information System. Municipality-specific Prais–Winsten regression models were fitted, adjusting for temporal trends and first-order autocorrelation. Exploratory sex-stratified analyses were also performed.
Results: Positive associations were observed between SO_2 and stomach cancer mortality in Catemu (β = 0.62; 95%CI: 0.28–0.96), PM_{10} and all-cancer mortality in Quintero (β = 2.81; 95%CI: 1.05–4.57), and $PM_{2,5}$ and stomach cancer mortality in Viña del Mar (β = 0.55; 95%CI: 0.22–0.88). Among men in Quintero, PM_{10} was also associated with both all-cancer and stomach cancer mortality.

* Autor para correspondencia.
Correo electrónico: mtmunoz@uchile.cl (M.T. Muñoz-Quezada).

https://doi.org/10.1016/j.gaceta.2026.102676
0213-9111/© 2026 SESPAS. Publicado por Elsevier España, S.L.U. Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Conclusions: These findings provide local epidemiological evidence supporting an association between long-term air pollution exposure and cancer mortality across municipalities with contrasting environmental profiles, like in Quintero and Catemu, two industrially impacted territories with a long history of environmental contamination. Although causal inference is limited by the ecological design and the lack of individual-level data, the results support strengthening environmental surveillance and conducting longitudinal studies to better characterize the impact of chronic air pollution exposure on cancer mortality in Chile.

© 2026 SESPAS. Published by Elsevier España, S.L.U. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Introducción

La contaminación atmosférica contribuye a nueve millones de muertes prematuras anuales, el 20% de la mortalidad mundial[1,2]. Se distribuye de manera desigual y afecta con mayor intensidad a poblaciones expuestas crónicamente a emisiones industriales[3,4]. Entre los efectos en la salud se incluyen enfermedades cardiovasculares y respiratorias, y distintos tipos de cáncer, asociados a contaminantes como el dióxido de azufre (SO_2), el material particulado fino y grueso ($PM_{2,5}$ y PM_{10}), el ozono troposférico y los compuestos orgánicos volátiles[5–13].

Las principales fuentes de contaminación comprenden actividades domésticas, transporte, procesos industriales como la minería, refinación de combustibles, generación termoeléctrica y metalurgia, que liberan mezclas complejas de partículas y gases reactivos, como SO_2, óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles[8–10]. Las comunidades cercanas a fuentes industriales suelen estar expuestas de forma continua, con monitoreo ambiental limitado, contribuyendo a la subestimación del riesgo sanitario y dificultando el establecimiento de respuestas regulatorias[9,10].

Los estudios internacionales muestran que la exposición crónica a $PM_{2,5}$ se asocia con mortalidad por cáncer, especialmente de pulmón[7]. La exposición a $PM_{2,5}$ también se asocia con un aumento del riesgo de cáncer de estómago (riesgo relativo: 1,12; intervalo de confianza del 95% [IC95%]: 1,01-1,24), de cáncer colorrectal y de cáncer hepático[14]. Por otro lado, la International Agency for Research on Cancer (IARC) clasificó la contaminación del aire y el material particulado como carcinógenos para humanos (grupo 1)[5].

Aunque la mayor parte de la evidencia proviene de Europa, Norteamérica y Asia[1,2,5,10,13–17,25], los estudios realizados en América Latina han reportado asociaciones comparables entre la exposición a $PM_{2,5}$ y la mortalidad por enfermedades crónicas[6,11,18,19]. En Chile, la evidencia sigue siendo limitada[19,20]. Algunos estudios ecológicos han descrito tasas más altas de hospitalización y mortalidad por enfermedades crónicas en las comunas expuestas a fundiciones, termoeléctricas o refinerías, en comparación con las comunas sin dichas fuentes[19]. Estos estudios han sido relevantes para visibilizar desigualdades territoriales en salud ambiental, pero suelen basarse en periodos acotados o en indicadores indirectos de exposición. Asimismo, los indicadores de hospitalización pueden verse condicionados por el acceso a los servicios de salud. Por otra parte, aunque el uso de la mortalidad como desenlace presenta limitaciones frente a los registros de incidencia, por su dependencia del acceso a diagnóstico y tratamiento, constituye una fuente de información disponible que permite analizar tendencias y comparaciones poblacionales[20,23].

En la Región de Valparaíso, Catemu y Quintero presentan antecedentes de actividad industrial y registros de SO_2 relacionados con la Fundición y Refinería de Chagres y el complejo industrial de Ventanas[19,21,22]. En este contexto, el SO_2 puede considerarse un marcador de emisiones industriales que incluyen material particulado, metales y otros productos de la combustión, más que un agente carcinógeno aislado[1,3,7,10]. La contaminación atmosférica exterior, entendida como una mezcla de contaminantes, está clasificada como carcinógena para los seres humanos[5]. Las comunas seleccionadas presentan distintos perfiles industriales y urbanos, relevantes para comparar sus condiciones ambientales y sanitarias[19,21,22].

Entre los factores asociados con el cáncer de estómago se encuentran la infección por *Helicobacter pylori,* la dieta, el tabaquismo y las exposiciones ocupacionales[14,16]; la mortalidad por esta enfermedad es mayor en los hombres[14]. Los estudios sobre $PM_{2,5}$ y cáncer de estómago son limitados. En la cohorte ESCAPE, la estimación del riesgo fue mayor en los hombres que en las mujeres; sin embargo, esta diferencia no demuestra por sí sola una modificación del efecto por sexo sin una prueba formal de interacción[17].

El cáncer de estómago es la tercera causa de muerte por cáncer en Chile y representa aproximadamente el 12% de las defunciones por causas oncológicas[20]. Su incidencia es mayor en las regiones del centro y del sur del país, distribución en la que pueden intervenir factores biológicos, ambientales y sociales[20]. Los estudios de cohortes han evaluado la relación entre la exposición prolongada a $PM_{2,5}$ y este cáncer: un incremento de 5 $\mu g/m^3$ de $PM_{2,5}$ se asoció con una *hazard ratio* de 1,38, aunque la estimación fue imprecisa y su intervalo de confianza incluyó la unidad (IC95%: 0,99-1,92)[16,17]. En Chile, esta relación ha sido poco estudiada mediante mediciones ambientales directas[19,20].

El objetivo de este estudio fue estimar la asociación entre las concentraciones anuales de SO_2, $PM_{2,5}$ y PM_{10} y las tasas comunales de mortalidad estandarizadas por edad por cáncer total y por cáncer de estómago en cinco comunas de la Región de Valparaíso durante 2009-2019. El análisis busca aportar información local para la vigilancia ambiental y sanitaria.

Método

Diseño y área de estudio

Se realizó un estudio ecológico mixto con series temporales y comparaciones espaciales. La unidad de observación fue comuna-año, evaluando la relación entre las concentraciones anuales de SO_2, $PM_{2,5}$ y PM_{10} y las tasas estandarizadas de mortalidad por cáncer total y por cáncer de estómago durante 2009-2019.

Se incluyeron cinco comunas de la Región de Valparaíso (Catemu, Quillota, Quintero, Valparaíso y Viña del Mar), seleccionadas *a priori* según criterios ambientales y operativos previamente descritos para el contexto regional chileno[21–27]. Estas comunas representan diferentes perfiles territoriales: industrial-minero (Catemu y Quintero), urbano-portuario (Valparaíso y Viña del Mar) y semiurbano/agrícola (Quillota). La inclusión se restringió a comunas con disponibilidad mínima de series ambientales continuas y validadas en el Sistema Nacional de Información de Calidad del Aire (SINCA)[28].

En la figura 1 se muestra la localización de las comunas analizadas y en la tabla 1 se resumen los indicadores sociodemográficos comunales del año 2017, utilizados para contextualizar las comparaciones territoriales[23].

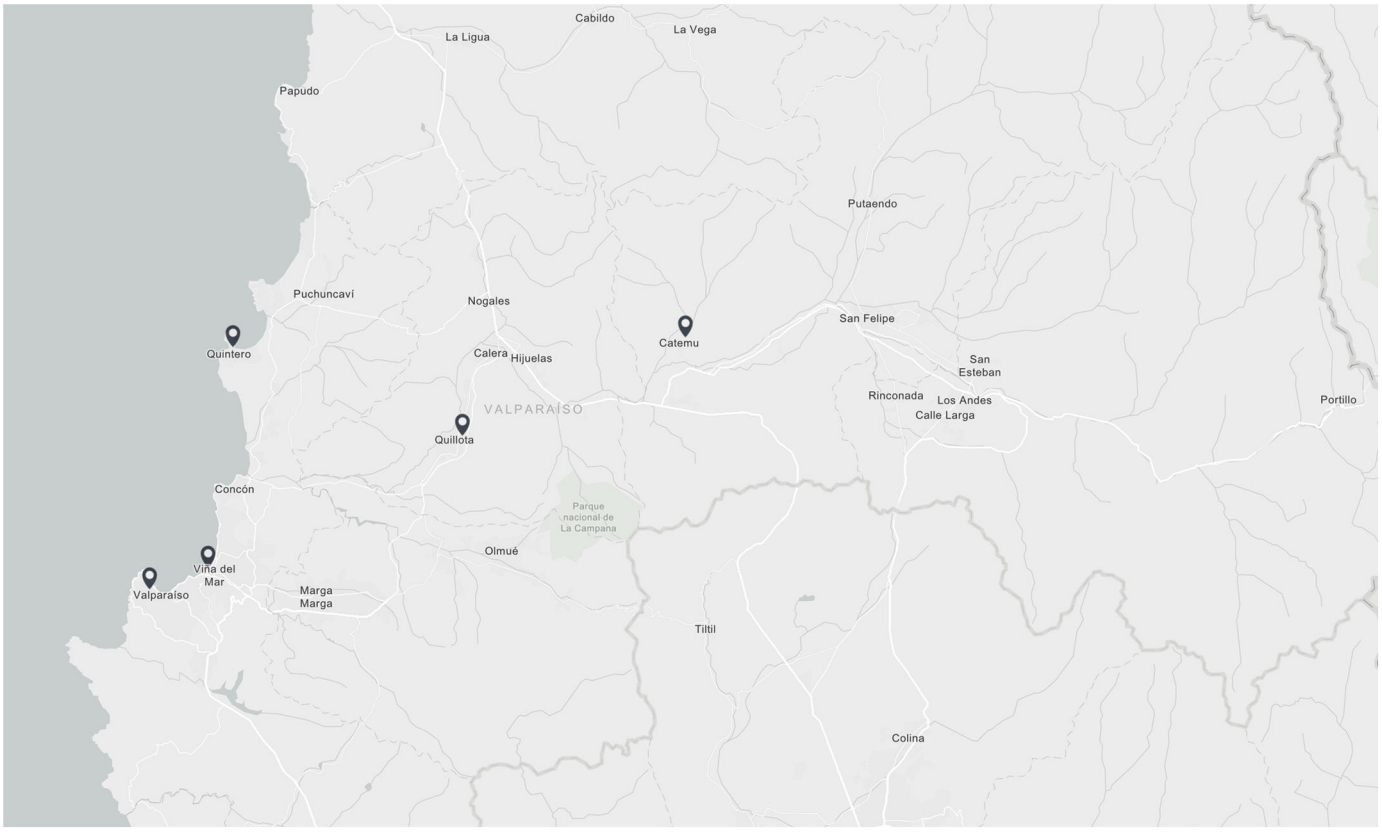


Figura 1. Mapa de la región de Valparaíso y ubicación geográfica de las comunas seleccionadas. (Elaboración propia a partir de Esri, TomTom, Garmin, FAO, NOAA y USGS.)

Tabla 1
Características sociodemográficas de las comunas incluidas en el estudio

Comuna	Población total 2017[a]	Variación 2002-2017 (%)[a]	Índice de masculinidad 2017[a]	Índice de dependencia demográfica 2017[a]	Índice de adultos mayores 2017[a]	Porcentaje promedio de personas en situación de pobreza por ingresos (%)[b]
Catemu	13.998	15,57	103,91	32,22	63,54	22
Quillota	90.517	19,23	96,04	39,59	66,04	14
Quintero	31.923	50,77	96,35	39,51	64,28	16
Valparaíso	296.655	7,49	96,06	51,29	89,93	15
Viña del Mar	334.248	16,49	90,51	51,29	89,93	12

[a] Censo de población y vivienda, INE, 2017[23].
[b] Encuesta de Caracterización Socioeconómica Nacional CASEN 2011, 2013, 2015 y 2017[23].

Variables de desenlace

Los datos de mortalidad se obtuvieron del Departamento de Estadísticas e Información de Salud (DEIS) del Ministerio de Salud de Chile, con registros anuales por comuna, edad y causa básica de defunción[29]. Se analizaron las muertes por cáncer total (CIE-10: C00–C97) y de estómago (CIE-10: C16). Las tasas comunales se estandarizaron por edad mediante el método directo, tomando como referencia el Censo Nacional de 2017[23]. También se calcularon tasas separadas para hombres y mujeres, empleadas en los análisis descriptivos y los modelos estratificados por sexo (véanse las Tablas S1–S4 del Material Suplementario).

Variables de exposición

Las concentraciones medias anuales de SO_2, $PM_{2,5}$ y PM_{10} ($\mu g/m^3$) se obtuvieron del SINCA, administrado por el Ministerio del Medio Ambiente[28]. Se seleccionaron estaciones comunales o cercanas con series validadas para 2009-2019. En caso de existir más de una estación operativa, se calculó el promedio anual comunal. Se incluyeron los años con al menos un 75% de registros diarios válidos por estación, sin imputar datos faltantes. El año calendario se incorporó como covariable para controlar la tendencia temporal.

Análisis estadístico

Se realizó un análisis descriptivo de las tasas de mortalidad y de las concentraciones anuales de contaminantes. La heterogeneidad entre comunas se evaluó mediante modelos de efectos mixtos con intercepto aleatorio, lo que permitió estimar modelos específicos por comuna[33].

La asociación entre las concentraciones anuales de SO_2, $PM_{2,5}$ y PM_{10} y las tasas de mortalidad estandarizadas por edad se estimó mediante regresión de Prais-Winsten[33]. Se ajustaron modelos independientes para cada comuna, contaminante y desenlace (cáncer total y de estómago), incluyendo el año calendario como covariable: $Y_t = \beta_0 + \beta_1 X_t + \beta_2 t + u_t$, con $u_t = \rho u_t\text{-}1 + \varepsilon_t$, siendo Y_t la tasa ajustada por edad de mortalidad por cáncer al año, t el año calendario, X_t la concentración anual del contaminante, β_0 el intercepto, β_1 el coeficiente de asociación entre el contaminante y la mortalidad

Tabla 2
Estadística descriptiva de las tasas estandarizadas de mortalidad y contaminantes atmosféricos, 2009-2019

Variable	Catemu	Quillota	Quintero	Valparaíso	Viña del Mar
Muertes por cáncer total, n	205	493	1803	6176	7147
Muertes por cáncer de estómago, n	36	64	201	769	748
Edad promedio cáncer total, media ± DE	64,8 ± 10,7	67,3 ± 9,8	66,5 ± 10,2	68,9 ± 8,4	69,5 ± 8,1
Edad promedio cáncer estómago, media ± DE	67,9 ± 8,9	69,2 ± 8,2	71,3 ± 7,5	70,1 ± 7,9	71,0 ± 7,2
Tasa estandarizada cáncer total, mediana (P25-P75)	131,5 (115,5-142,2)	174,9 (161,5-186,6)	139,3 (115,6-155,0)	175,8 (170,3-183,9)	171,3 (165,3-179,1)
Tasa estandarizada cáncer estómago, mediana (P25-P75)	24,6 (23,0-30,9)	21,2 (16,2-22,6)	17,1 (10,7-28,0)	22,3 (19,4-25,8)	19,3 (14,0-21,0)
SO_2 (μg/m³), mediana (P25-P75)	12,9 (11,4-36,5)	1,8 (1,4-2,0)	8,6 (7,8-9,2)	s/d	6,0 (6,0-6,0)
$PM_{2,5}$ (μg/m³), mediana (P25-P75)	s/d	s/d	16,0 (11,7-17,3)	7,5 (7,3-7,9)	14,1 (12,6-20,2)
PM_{10} (μg/m³), mediana (P25-P75)	65,5 (65,5-65,5)	35,0 (33,6-38,8)	30,8 (25,0-34,5)	s/d	36,6 (34,2-45,7)

DE: desviación estándar; s/d: sin datos.
Las tasas estandarizadas de mortalidad por cáncer total y por cáncer de estómago se expresan por 100.000 habitantes. En algunas comunas no fue posible estimar ciertos contaminantes debido a la ausencia de mediciones válidas durante el periodo analizado.

por cáncer, β_2 la pendiente temporal (controlada por tendencia), ρ el parámetro de autocorrelación de primer orden, u_t el error con estructura autorregresiva y ε_t el error aleatorio independiente.

Se calcularon los IC95% y se estableció un nivel de significación de 0,05. Se excluyeron los modelos con menos de cinco observaciones o estimaciones inestables.

Como análisis secundarios, se ajustaron modelos estratificados por sexo para cada comuna, contaminante y desenlace. Debido al reducido número de observaciones por estrato, se consideraron exploratorios y se presentan en las tablas S3 y S4 del Material Suplementario. Los análisis se realizaron en Stata v19.0.

Resultados

En la tabla 2 se presentan las tasas estandarizadas de mortalidad, las concentraciones de SO_2, $PM_{2,5}$ y PM_{10}, y las características comunales durante 2009-2019. Se registraron 15.824 defunciones por cáncer, de las cuales 1818 correspondieron a cáncer de estómago. Valparaíso y Viña del Mar concentraron el mayor número de defunciones y presentaron unas tasas de mortalidad por cáncer total superiores a las de las comunas interiores. Quintero y Catemu tuvieron tasas menores de cáncer total y mayor variabilidad en las de cáncer de estómago. El porcentaje de personas en situación de pobreza por ingresos también varió entre las comunas.

Catemu presentó las mayores concentraciones de SO_2, mientras que Quintero registró los valores más altos de PM_{10} y $PM_{2,5}$. Viña del Mar mostró concentraciones intermedias de material particulado. En Valparaíso, los registros de SO_2 y PM_{10} estuvieron incompletos.

En la tabla 3 se detallan las concentraciones anuales de los contaminantes. Las series mostraron variabilidad interanual, principalmente para SO_2, y se resumieron mediante medianas y rangos intercuartílicos debido a su distribución asimétrica y a la presencia de datos faltantes. Las tasas de mortalidad por cáncer total y por cáncer de estómago disminuyeron durante el periodo. Las concentraciones de SO_2 fueron mayores entre 2009 y 2011, el $PM_{2,5}$ presentó registros discontinuos y valores entre 10 y 17 μg/m³, y el PM_{10} mostró medianas de 30-40 μg/m³.

Las tendencias por comuna se presentan en las figuras S1 y S2 del Material Suplementario. Las tasas de mortalidad fueron relativamente estables en Valparaíso y Viña del Mar. Quillota y Quintero presentaron mayor variabilidad interanual del material particulado, y Catemu mostró fluctuaciones del SO_2.

Los modelos de Prais-Winsten por comuna se presentan en la tabla 4. En Valparaíso, el $PM_{2,5}$ no se asoció con la mortalidad por cáncer total (β = 21,46; IC95%: – 21,84 a 64,76) ni de estómago (β = 2,88; IC95%: – 12,53 a 18,29).

En Quintero, el PM_{10} se asoció con la mortalidad por cáncer total (β = 2,81; IC95%: 1,05-4,57). No se observaron asociaciones entre el SO_2 y la mortalidad por cáncer total (β = 10,41; IC95%: – 3,91 a 24,73), ni entre el SO_2 (β = 1,61; IC95%: – 3,63 a 6,86) o el PM_{10} (β = 0,81; IC95%: – 0,30 a 1,92) y la mortalidad por cáncer de estómago.

En Viña del Mar, el $PM_{2,5}$ se asoció con la mortalidad por cáncer de estómago (β = 0,55; IC95%: 0,22-0,88). No se observaron asociaciones entre el $PM_{2,5}$ (β = 0,83; IC95%: – 0,49 a 2,15) o el PM_{10} (β = – 0,11; IC95%: – 1,32 a 1,10) y la mortalidad por cáncer total, ni entre el PM_{10} y la mortalidad por cáncer de estómago (β = –0,02; IC95%: –0,47 a 0,44).

En Quillota, el SO_2 (β = 2,98; IC95%: –34,33 a 40,29) y el PM_{10} (β = –0,12; IC95%: –3,10 a 2,86) no se asociaron con la mortalidad por cáncer total. Tampoco se observaron asociaciones con la mortalidad por cáncer de estómago para el SO_2 (β = 7,92; IC95%: –0,49 a 16,33) y el PM_{10} (β = –0,41; IC95%: –1,20 a 0,38).

En Catemu, el SO_2 se asoció con la mortalidad por cáncer de estómago (β = 0,62; IC95%: 0,28-0,96), pero no con la mortalidad por cáncer total (β = 0,85; IC95%: –0,84 a 2,55).

Las tasas de mortalidad por ambos desenlaces fueron mayores en los hombres que en las mujeres en las cinco comunas (Tablas S1 y S2, y Figs. S3 y S4, del Material Suplementario). En los análisis estratificados no se encontraron asociaciones en las mujeres. En los hombres de Quintero, el PM_{10} se asoció con la mortalidad por cáncer total (β = 4,90; IC95%: 1,15-8,65; p = 0,018) y de estómago (β = 2,05; IC95%: 0,10-4,00; p = 0,041). Las demás estimaciones incluyeron el valor nulo (Tablas S3 y S4 del Material Suplementario).

Discusión

En este estudio se evaluó la asociación entre la exposición a contaminantes atmosféricos y la mortalidad por cáncer en comunas con distintas características ambientales y productivas de la Región de Valparaíso, Chile, durante el período 2009-2019.

Uno de los hallazgos fue la asociación positiva entre SO_2 y mortalidad por cáncer de estómago en Catemu, territorio con presencia histórica de actividad minero-metalúrgica. Si bien el SO_2 no está clasificado como carcinógeno directo por la IARC[5], su presencia suele asociarse a emisiones industriales complejas que incluyen otros contaminantes potencialmente oncogénicos, como metales pesados y compuestos orgánicos persistentes[4,5,7,9,10]. Los estudios experimentales han explorado la coexposición a SO_2 y arsénico como posible vía de promoción tumoral[9], más que una relación aislada del gas.

En Quintero se identificó una asociación significativa entre PM_{10} y mortalidad por cáncer en general. Esta comuna forma parte de una zona con carga ambiental acumulada y antecedentes de episodios agudos de contaminación atmosférica[21,22,24]. El material particulado grueso puede transportar metales, hidrocarburos y otros compuestos adsorbidos en su superficie, aumentando el efecto más allá del sistema respiratorio[4,10,13]. Si bien la mayoría de los estudios vinculan el PM_{10} con mortalidad por cáncer de

Tabla 3
Medianas y rangos intercuartílicos de tasas de mortalidad por cáncer y concentraciones de contaminantes atmosféricos por año en cinco comunas de la Región de Valparaíso (2009-2019)

Año	Tasa cáncer total, mediana (P25-P75)*	Tasa cáncer estómago, mediana (P25-P75)*	SO_2 (μg/m³), mediana (P25-P75)	$PM_{2,5}$ (μg/m³), mediana (P25-P75)	PM_{10} (μg/m³), mediana (P25-P75)
2009	179,1 (173,6-180,7)	24,2 (22,6-25,8)	8,50 (3,90-11,76)	23,52 (23,52-23,52)	40,09 (31,89-55,57)
2010	178,5 (127,9-190,6)	24,4 (19,7-26,2)	7,85 (2,02-39,27)	21,26 (21,26-21,26)	33,57 (27,76-50,71)
2011	167,7 (164,1-183,9)	21,2 (17,1-22,9)	20,95 (2,04-39,86)	s/d	38,84 (38,84-38,84)
2012	161,5 (142,2-171,7)	21,0 (19,7-28,0)	5,64 (1,44-35,24)	13,28 (13,28-13,28)	40,49 (25,00-48,39)
2013	172,3 (139,3-184,3)	21,1 (20,6-23,1)	9,23 (1,39-36,53)	s/d	29,27 (25,01-33,54)
2014	169,5 (141,7-170,3)	18,2 (17,6-21,5)	9,41 (2,24-30,80)	10,19 (7,85-12,53)	33,79 (22,75-34,88)
2015	175,8 (155,0-176,6)	22,8 (19,9-24,8)	8,94 (1,95-11,45)	12,60 (8,38-16,82)	37,33 (35,63-38,53)
2016	171,3 (157,6-178,3)	19,7 (19,3-26,6)	8,51 (1,48-12,71)	17,79 (7,61-20,20)	36,82 (35,30-41,65)
2017	157,6 (154,4-160,4)	21,4 (14,0-22,3)	8,67 (1,42-12,95)	12,04 (7,25-15,30)	34,13 (33,88-36,63)
2018	151,0 (137,5-165,3)	13,5 (9,2-15,9)	8,28 (1,43-11,23)	12,57 (7,30-16,79)	34,08 (34,00-35,04)
2019	159,9 (152,7-165,4)	17,2 (13,7-19,4)	6,93 (1,84-10,43)	8,13 (6,88-14,12)	34,22 (24,86-44,23)

s/d: sin datos.
Las tasas de mortalidad por cáncer se expresan por 100.000 habitantes y ajustadas por edad. El símbolo s/d indica que no hay mediciones disponibles para al menos una de las comunas en ese año, por lo que no fue posible estimar los percentiles correspondientes.

Tabla 4
Modelos de Prais-Winsten por comuna: asociación entre contaminantes atmosféricos y mortalidad por cáncer total y por cáncer de estómago (2009–2019)

Modelo	Comuna	Variable explicativa	Desenlace	β	IC95%	p
1	Valparaíso	$PM_{2,5}$	Cáncer total	21,46	-21,84 a 64,76	0,213
		$PM_{2,5}$	Cáncer estómago	2,88	-12,53 a 18,29	0,594
2	Quintero	SO_2	Cáncer total	10,41	-3,91 a 24,73	0,129
		PM_{10}	Cáncer total	2,81	1,05 a 4,57	0,007
		SO_2	Cáncer estómago	1,61	-3,63 a 6,86	0,491
		PM_{10}	Cáncer estómago	0,81	-0,30 a 1,92	0,127
3	Viña del Mar	$PM_{2,5}$	Cáncer total	0,83	-0,49 a 2,15	0,174
		PM_{10}	Cáncer total	-0,11	-1,32 a 1,10	0,838
		$PM_{2,5}$	Cáncer estómago	0,55	0,22 a 0,88	0,013
		PM_{10}	Cáncer estómago	-0,02	-0,47 a 0,44	0,938
4	Quillota	SO_2	Cáncer total	2,98	-34,33 a 40,29	0,858
		PM_{10}	Cáncer total	-0,12	-3,10 a 2,86	0,926
		SO_2	Cáncer estómago	7,92	-0,49 a 16,33	0,062
		PM_{10}	Cáncer estómago	-0,41	-1,20 a 0,38	0,263
5	Catemu	SO_2	Cáncer total	0,85	-0,84 a 2,55	0,280
		SO_2	Cáncer estómago	0,62	0,28 a 0,96	0,006

IC95%: intervalo de confianza del 95%.
Los coeficientes β representan el cambio en la tasa estandarizada de mortalidad por cáncer por cada incremento de 1 μg/m³ en la concentración del contaminante. Los modelos no estimables o con bajo número de observaciones no se reportan debido a la disponibilidad limitada de datos en la serie temporal. Todos los modelos fueron ajustados por año calendario.

pulmón[7,10,13], también se ha descrito una posible asociación con algunos tumores digestivos, lo que respalda la evidencia de desenlaces no respiratorios en entornos industriales[4,14,16,17]. Este resultado debe interpretarse con cautela debido a la naturaleza ecológica del estudio.

En Viña del Mar se observó una asociación significativa entre el $PM_{2,5}$ y la mortalidad por cáncer de estómago. Aunque se trata de una comuna predominantemente urbana, las emisiones asociadas al tráfico y otras fuentes de combustión pueden contribuir a mantener unas concentraciones sostenidas de material particulado fino[3,12]. En el ámbito internacional, la exposición prolongada a $PM_{2,5}$ se ha asociado con mortalidad por diversos tipos de cáncer, incluido el de estómago, mediante mecanismos como inflamación sistémica, estrés oxidativo y daño al ADN[7,10,13]. Los estudios de cohortes y los metaanálisis han descrito asociaciones entre la exposición prolongada a $PM_{2,5}$ y el cáncer de estómago[14–17,30]. No obstante, la disponibilidad limitada de datos de $PM_{2,5}$ en algunas comunas reduce el número de observaciones y compromete la estabilidad de las estimaciones, lo cual debe considerarse al interpretar este hallazgo.

En los análisis estratificados por sexo, las asociaciones entre el PM_{10} y la mortalidad por cáncer total y por cáncer de estómago en Quintero se observaron en los hombres. No obstante, la ausencia de asociaciones estadísticamente significativas en las mujeres no demuestra por sí misma la existencia de modificación del efecto por el sexo, ya que la comparación entre resultados significativos y no significativos no equivale a una prueba formal de interacción[35]. Las diferencias observadas podrían relacionarse con una menor precisión de las estimaciones, el reducido número de observaciones en cada serie y la distribución diferencial de exposiciones ocupacionales, conductuales y sociales entre hombres y mujeres[14,16,17]. Por tanto, estos resultados deben considerarse exploratorios y requieren confirmación mediante estudios con mayor tamaño muestral y pruebas formales de interacción.

Asimismo, las asociaciones generales observadas entre SO_2 y mortalidad por cáncer de estómago en Catemu, y entre $PM_{2,5}$ y mortalidad por cáncer de estómago en Viña del Mar, no alcanzaron la significación estadística en los modelos estratificados por sexo. Esta diferencia puede atribuirse, al menos parcialmente, a la reducción de la precisión de las estimaciones al dividir las series y al menor número de observaciones disponibles para algunos contaminantes, especialmente $PM_{2,5}$. Por esta razón, la pérdida de significación estadística no debe interpretarse necesariamente como ausencia de asociación en cada estrato[16,17,32].

Las tendencias temporales variaron entre comunas y desenlaces. Estas diferencias podrían relacionarse con cambios no medidos en el acceso al diagnóstico, los programas de detección y la distribución de factores de riesgo[20,31,32]. También podrían influir las modificaciones de las fuentes emisoras y la implementación, desde 2018, del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica de Concón, Quintero y Puchuncaví[24].

Desde el punto de vista metodológico, el uso de modelos de regresión de Prais-Winsten permitió controlar la autocorrelación temporal presente en las series anuales, lo que resulta adecuado en estudios ambientales de series de tiempo[31,32]. La estimación previa de modelos mixtos con intercepto aleatorio por comuna evidenció heterogeneidad territorial en algunos desenlaces, lo que respaldó la decisión de realizar análisis por comuna.

El diseño ecológico impide establecer relaciones causales y está sujeto a un sesgo ecológico[33]. La cobertura temporal y espacial incompleta de los registros ambientales, especialmente de $PM_{2,5}$, limitó los análisis disponibles para algunas comunas[3,12,26,28]. La estratificación por sexo redujo la precisión de las estimaciones. Además, la mortalidad depende de la incidencia, la supervivencia y el acceso a diagnóstico y tratamiento, por lo que tiene menor capacidad para estudiar factores etiológicos que los registros de incidencia.

Las tasas de mortalidad por cáncer de estómago fueron mayores en los hombres, coincidiendo con estudios previos[14,16,17]. No se dispuso de información individual sobre ocupación, tabaquismo, dieta, infección por *H. pylori* ni acceso a atención de salud. El nivel socioeconómico tampoco se incorporó a los modelos debido a su escasa variación temporal dentro de cada comuna[33].

Variables como el nivel socioeconómico, representado en este estudio por el porcentaje de personas en situación de pobreza por ingresos, no se incorporaron a los modelos analíticos debido a la falta de variación temporal suficiente en cada comuna durante el periodo de estudio[33]. Los datos posteriores a 2019 no se incluyeron por la disrupción generada por la pandemia de COVID-19, que pudo afectar la calidad y la oportunidad de los registros de mortalidad, así como las condiciones de exposición ambiental en Chile[34]. Este corte temporal limita la evaluación de tendencias recientes, pero se justifica para evitar sesgos derivados de cambios abruptos en los sistemas de registro y en la dinámica poblacional durante el periodo pandémico.

Entre las fortalezas del estudio se encuentran el periodo de 11 años, el uso de registros oficiales y la inclusión de comunas con diferentes fuentes de contaminación. Los resultados muestran la importancia de mejorar la continuidad del monitoreo de $PM_{2,5}$ y PM_{10}, y de incorporar la caracterización química del material particulado[3,12,28]. También apoyan la inclusión del cáncer de estómago en futuros estudios sobre contaminación atmosférica en Chile[14,16,20].

Futuros estudios podrían integrar datos individuales, registros de incidencia, modelos espaciales y análisis multinivel[31,33]. La vinculación de datos sobre calidad del aire, fuentes emisoras y desenlaces de salud con mayor resolución espacial permitiría estimar las asociaciones con mayor precisión[1,3].

¿Qué se sabe sobre el tema?

La exposición crónica a la contaminación atmosférica (en particular, $PM_{2,5}$) se ha asociado con mortalidad por cáncer en estudios internacionales, pero la evidencia en Chile es limitada y se basa en escasos análisis con mediciones ambientales directas.

¿Qué añade el estudio realizado a la literatura?

En cinco comunas de la Región de Valparaíso (2009-2019) se observaron asociaciones específicas por territorio y contaminante: SO_2 con la mortalidad por cáncer gástrico en Catemu, PM_{10} con la mortalidad por cáncer total en Quintero y $PM_{2,5}$ con la mortalidad por cáncer gástrico en Viña del Mar, mediante modelos de Prais-Winsten por comuna.

¿Cuáles son las implicaciones de los resultados obtenidos?

Los resultados respaldan reforzar la continuidad y la cobertura del monitoreo (especialmente de $PM_{2,5}$) en zonas con fuentes industriales y urbanas, y considerar el cáncer gástrico en las evaluaciones sanitarias territoriales basadas en registros y series ambientales.

Disponibilidad de bases de datos y material para réplica

Los datos de mortalidad (DEIS, MINSAL) y de calidad del aire (SINCA, MMA) son de acceso público. Las fuentes y los enlaces de consulta se detallan en las referencias. El código de análisis (Stata) está disponible solicitándolo a la autora para correspondencia.

Editora responsable del artículo

Vanessa Santos.

Declaración de transparencia

La autora principal (garante responsable del manuscrito) afirma que este manuscrito es un reporte honesto, preciso y transparente del estudio que se remite a Gaceta Sanitaria, que no se han omitido aspectos importantes del estudio, y que las discrepancias del estudio según lo previsto (y, si son relevantes, registradas) se han explicado.

Contribuciones de autoría

F. Lastarria: conceptualización, base de datos, metodología, análisis de datos, visualización, validación, escritura del borrador original, escritura, revisión y edición del manuscrito final. C. Morales: conceptualización, análisis de datos, validación, visualización, escritura del borrador original, escritura, revisión y edición del manuscrito final. V. Iglesias: conceptualización, metodología, visualización, validación, supervisión, redacción del borrador original, redacción, revisión y edición del manuscrito final. G. Cavada: conceptualización, base de datos, metodología, análisis de datos, validación, redacción del borrador original, redacción, revisión y edición del manuscrito final. M.T. Muñoz-Quezada: conceptualización, base de datos, metodología, análisis de datos, visualización, validación, supervisión, redacción del borrador original, redacción, revisión y edición del manuscrito final.

Agradecimientos

Al profesor Pablo Ruiz, de la Escuela de Salud Pública de la Universidad de Chile, quien contribuyó a la revisión del manuscrito en el contexto de la actividad de evaluación de la cátedra de Método en Investigación en Salud Pública, Doctorado en Salud Pública, Universidad de Chile.

Financiamiento

Este estudio fue financiado por el Centro para la Prevención y el Control del Cáncer (CECAN), FONDAP 152220002, y por el Centro de Investigación y Acción en Determinación Social y Salud Mental (CIADES), CIN250054, de la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID), Chile.

Conflictos de intereses

Ninguno.

Anexo. Material adicional

Se puede consultar material adicional a este artículo en su versión electrónica disponible en doi:10.1016/j.gaceta.2026.102676.

Bibliografía

1. Landrigan PJ, Fuller R, Acosta NJR, et al. The Lancet Commission on pollution and health. Lancet. 2018;391:462–512, https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)32345-0.
2. Lelieveld J, Pozzer A, Pöschl U, et al. Loss of life expectancy from air pollution compared to other risk factors: a worldwide perspective. Cardiovasc Res. 2020;116:1910–7, https://doi.org/10.1093/cvr/cvaa025.
3. World Health Organization. Ambient (outdoor) air pollution. Geneva: WHO; 2024 (Consultado el 26-10-2025.) Disponible en: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health
4. Manisalidis I, Stavropoulou E, Stavropoulos A, et al. Environmental and health impacts of air pollution: a review. Front Public Health. 2020;8:14, https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014.
5. International Agency for Research on Cancer. Outdoor air pollution. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Vol. 109. Lyon: IARC; 2016.
6. Romieu I, Gouveia N, Cifuentes LA, et al. Multicity study of air pollution and mortality in Latin America (ESCALA). Res Rep Health Eff Inst. 2012;171:5–86.
7. Schraufnagel DE, Balmes JR, Cowl CT, et al. Air pollution and noncommunicable diseases: a review by the Forum of International Respiratory Societies' Environmental Committee. Part 2: air pollution and organ systems. Chest. 2019;155:417–26, https://doi.org/10.1016/j.chest.2018.10.041.
8. Brook RD, Rajagopalan S, Pope CA 3rd, et al. Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: an update to the scientific statement from the American Heart Association. Circulation. 2010;121:2331–78, https://doi.org/10.1161/CIR.0b013e3181dbece1.
9. JiP, Li Z, Dong J, et al. SO_2 derivatives and As co-exposure promote liver cancer metastasis through integrin αvβ3 activation. Ecotoxicol Environ Saf. 2019;181:572–8, https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.06.029.
10. Turner MC, Andersen ZJ, Baccarelli A, et al. Outdoor air pollution and cancer: an overview of the current evidence and public health recommendations. CA Cancer J Clin. 2020;70:460–79, https://doi.org/10.3322/caac.21632.
11. Husaini DC, Reneau K, Balam D. Air pollution and public health in Latin America and the Caribbean: a systematic review with meta-analysis. Beni Suef Univ J Basic Appl Sci. 2022;11:122, https://doi.org/10.1186/s43088-022-00305-0.
12. World Health Organization. WHO global air quality guidelines: particulate matter, ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: WHO; 2021 (Consultado el 26-10-2025.) Disponible en: https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228.
13. Markozannes G, Pantavou K, Rizos EC, et al. Outdoor air quality and human health: an overview of reviews of observational studies. Environ Pollut. 2022;306:119309, https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119309.
14. Pritchett N, Spangler EC, Gray GM, et al. Exposure to outdoor particulate matter air pollution and risk of gastrointestinal cancers in adults: a systematic review and meta-analysis of epidemiologic evidence. Environ Health Perspect. 2022;130:036001, https://doi.org/10.1289/EHP9620.
15. Turner MC, Krewski D, Diver WR, et al. Ambient air pollution and cancer mortality in the Cancer Prevention Study II. Environ Health Perspect. 2017;125:087013, https://doi.org/10.1289/EHP1249.
16. Weinmayr G, Pedersen M, Stafoggia M, et al. Particulate matter air pollution components and incidence of cancers of the stomach and the upper aerodigestive tract in the European Study of Cohorts of Air Pollution Effects (ESCAPE). Environ Int. 2018;120:163–71, https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.07.030.
17. Nagel G, Stafoggia M, Pedersen M, et al. Air pollution and incidence of cancers of the stomach and the upper aerodigestive tract in the European Study of Cohorts for Air Pollution Effects (ESCAPE). Int J Cancer. 2018;143:1632–43, https://doi.org/10.1002/ijc.31564.
18. Riojas-Rodríguez H, Soares da Silva A, Texcalac-Sangrador JL, et al. Air pollution management and control in Latin America and the Caribbean: implications for climate change. Rev Panam Salud Publica. 2016;40:150–9.
19. Ruiz-Rudolph P, Arias N, Pardo S, et al. Impact of large industrial emission sources on mortality and morbidity in Chile: a small-areas study. Environ Int. 2016;92-93:130–8, https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.03.036.
20. Parra-Soto S, Petermann-Rocha F, Martínez-Sanguinetti MA, et al. Cáncer en Chile y en el mundo: una mirada actual y su futuro escenario epidemiológico. Rev Med Chil. 2020;148:1489–95, https://doi.org/10.4067/S0034-98872020001001489.
21. Bolados P, Espinoza L, Panez A. Una aproximación decolonial a las zonas de sacrificio en Chile. Vibrant. 2024;21:e603, https://doi.org/10.1590/1809-4341202421d603.
22. Panez Pinto A, Bolados García P, Espinoza Almonacid L, et al. Zonas de sacrificio y recuperación socioambiental en Chile: fallas y oportunidades de la política ambiental. Ambient Soc. 2023;26:e0137, https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc0137r1vu2023L3AO.
23. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. SIIT. Estadísticas territoriales. Series estadísticas oficiales a nivel comunal y regional, provenientes de organismos del Estado en ámbitos demográficos, educacionales, económicos, salud, sociales y seguridad ciudadana. Santiago de Chile: BCN; 2026 (Consultado el 2-5-2026.) Disponible en: https://www.bcn.cl/siit/estadisticasterritoriales.
24. Ministerio del Medio Ambiente (Chile). Decreto Supremo N.° 105: Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para Concón, Quintero y Puchuncaví. Santiago: Ministerio del Medio Ambiente; 2018 (Consultado el 20-10-2025.) Disponible en: https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1130135.
25. Coordinador Eléctrico Nacional (Chile). Infotécnica. Instalaciones en operación: Región de Valparaíso. Santiago: Coordinador Eléctrico Nacional; 2024 (Consultado el 26-10-2025.) Disponible en: https://infotecnica.coordinador.cl/geo/region/valparaiso-6.
26. Ministerio del Medio Ambiente (Chile). Proyecto estudio diagnóstico: Plan de gestión atmosférica Región de Valparaíso. Monitoreos exploratorios en zonas no evaluadas. Santiago: Ministerio del Medio Ambiente; 2011 (Consultado el 20-10-2025.) Disponible en: https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/12/ProyectoDiagnosticoPlanGestionAtmosfericoValpo.pdf.
27. Departamento de, Epidemiología. Región de Valparaíso. Diagnósticos regionales en salud con enfoque en determinantes sociales. Santiago de Chile: Ministerio de Salud; 2025 (Consultado el 2-6-2025.) Disponible en: https://epi.minsal.cl/datos_drs/05_DIAGNOSTICOS_REGIONALES_EN_SALUD_VALPARAISO_2025.pdf.
28. Ministerio del Medio Ambiente, Chile. SINCA – Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire: Región de Valparaíso. Santiago: Ministerio del Medio Ambiente; 2009-2025. (Consultado el 26-10-2025.) Disponible en: https://sinca.mma.gob.cl/index.php/region/index/id/V.
29. Departamento de Estadísticas e Información de Salud. Defunciones y mortalidad por tumores seleccionados. Santiago de Chile: Ministerio de Salud. 2025 (Consultado el 26-10-2025.) Disponible en: https://informesdeis.minsal.cl/SASVisualAnalytics/?reportUri=%2Freports%2Freports%2Fbcf6e81f-d7f9-4f69-8703-9a83c3eb5da9&sectionIndex=0&sso_guest=true&reportViewOnly=true&reportContextBar=false&sas-welcome=false.
30. Hu J, Yu L, Yang Z, et al. Long-term exposure to PM2.5 and mortality: a cohort study in China. Toxics. 2023;11:727, https://doi.org/10.3390/toxics11090727.
31. Moradzadeh R, Shamsi M, Heidari S. Spatial cluster analysis of stomach neoplasms in the center of Iran based on a population-based study, 2009-2014: application of the Poisson-based probability model. Int J Prev Med. 2022;13:28, https://doi.org/10.4103/ijpvm.IJPVM_51_19.
32. Bhaskaran K, Gasparrini A, Hajat S, et al. Time series regression studies in environmental epidemiology. Int J Epidemiol. 2013;42:1187–95, https://doi.org/10.1093/ije/dyt092.
33. Borja-Aburto VH. Estudios ecológicos. Salud Publica Mex. 2000;;42:533–8, https://doi.org/10.1590/S0036-36342000000600011.
34. Cuadrado C, Vidal F, Pacheco J, et al. Acceso a la atención del cáncer en los grupos vulnerables de la población de Chile durante la pandemia de COVID-19. Rev Panam Salud Publica. 2022;46:e77, https://doi.org/10.26633/RPSP.202277.
35. Altman DG, Bland JM. Interaction revisited: the difference between two estimates. BMJ. 2003;326:219, https://doi.org/10.1136/bmj.326.7382219.