

DINÁMICA DE CIRCULACIÓN VIRAL Y SU ASOCIACIÓN CON CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS Y VARIABLES CLIMÁTICAS EN SANTIAGO DE CHILE ENTRE LOS AÑOS 2020-2023.

DYNAMICS OF VIRAL CIRCULATION AND ITS ASSOCIATION WITH ATMOSPHERIC POLLUTANTS AND CLIMATIC VARIABLES IN SANTIAGO DE CHILE BETWEEN 2020-2023.

Eric Comincini C.¹, Midian Clara Castillo P.², Jorge Homero Wilches V.²

ABSTRACT

To analyze the association between environmental pollution, climatic conditions, and the circulation of respiratory viruses in various communes of Santiago de Chile between 2020 and 2023, an ecological, analytical, retrospective, and longitudinal study was conducted in the Santiago, El Bosque, and Cerro Navia communes. Data were collected on atmospheric pollutants ($PM_{2.5}$, PM_{10} , NO_2 , O_3), climatic variables (temperature and relative humidity), and viral circulation (Influenza A [InfA], Influenza B [InfB], Respiratory Syncytial Virus [RSV], COVID-19, adenovirus, and metapneumovirus). Descriptive analyses, Spearman correlations, and generalized linear regression models were performed to examine the associations between the studied variables. The results were reported with 95% confidence intervals, and statistical significance was established at $p < 0.05$. The findings indicated that PM_{10} exhibited the highest densities in El Bosque and Cerro Navia, while O_3 consistently showed low levels. Influenza A (InfA) had the highest density in Santiago, whereas P-Inf and adenovirus were predominant in El Bosque. Spearman correlations revealed significant associations, highlighting a positive relationship between $PM_{2.5}$ and Inf A and adenovirus, whereas O_3 showed a negative association with several viruses. Multilevel generalized linear models further confirmed these associations, emphasizing the influence of NO_2 and relative humidity on Inf A, as well as a negative relationship between average temperature and Inf B and adenovirus. These findings suggest interactions between environmental pollution, climatic conditions, and viral circulation in the selected communes, underscoring the potential impact of the measures implemented during the COVID-19 pandemic.

KEYWORDS: environmental pollution, climate effects, air pollution, environmental epidemiology, COVID-19.

RESUMEN

Con el objetivo de analizar la asociación entre la contaminación ambiental, las condiciones climáticas y la circulación de virus respiratorios en comunas de Santiago de Chile entre 2020 y 2023, se realizó un estudio ecológico, analítico, retrospectivo y longitudinal en las comunas: Santiago, El Bosque y Cerro Navia. Se recopiló datos de contaminantes atmosféricos ($PM_{2.5}$, PM_{10} , NO_2 , O_3), variables climáticas (temperatura y humedad relativa) y circulación viral (Inf A, Inf B, VRS, COVID, adenovirus y metaneumovirus). Mediante análisis descriptivos, correlaciones de Spearman y modelos de regresión lineal generalizada fueron examinadas las asociaciones entre las variables. Los resultados se presentaron con intervalos de confianza del 95% con valores de $p < 0,05$ estadísticamente significativos. Se observó que PM_{10} presentó las mayores densidades en las comunas de El Bosque y Cerro Navia, mientras que O_3 mostró niveles consistentemente bajos. Inf A reportó mayor densidad en Santiago, mientras que P-Inf y adenovirus destacaron en El Bosque. Las correlaciones de Spearman revelaron relación positiva entre $PM_{2.5}$, los virus de la influenza A (Inf A) y adenovirus, mientras que O_3 mostró asociación negativa con varios virus. Los modelos lineales multinivel generalizados confirmaron estas asociaciones, subrayando la influencia de NO_2 y la humedad relativa en Inf A, así como una relación negativa entre la temperatura promedio, los virus de la influenza B (Inf B) y adenovirus. Se concluye la existencia de interacciones entre contaminación ambiental, condiciones climáticas y circulación viral, en dichas comunas, destacando el impacto potencial de las medidas implementadas durante la pandemia de COVID-19.

PALABRAS CLAVE: contaminación ambiental, efectos del clima, contaminación del aire, epidemiología ambiental, COVID-19.

Recibido: 24 de enero de 2025

Aceptado: 19 de marzo de 2025

¹Programa de Maestría de Epidemiología. Fundación Universitaria del Área Andina. Santiago de Chile, Chile. ²Programa de Odontología, Facultad de Ciencias de la Salud. Universidad del Magdalena. Santa Marta, Colombia.

Eric Comincini C. **ORCID:** 0000-0002-4728-5862

Midian Clara Castillo P. **ORCID:** 0000-0003-3170-3959

Jorge Homero Wilches V. **ORCID:** 0000-0003-3649-5079

Correspondencia: jhwilchev@gmail.com

INTRODUCCIÓN

La contaminación ambiental constituye un problema crítico de salud pública a nivel global, estrechamente asociado con una amplia gama de enfermedades respiratorias y cardiovasculares^{1,2}. En áreas urbanas, donde las fuentes de contaminación son más intensas, sus efectos adversos sobre la salud se agravan, afectando especialmente a poblaciones vulnerables como niños, adultos mayores y personas con comorbilidades preexistentes³. En este contexto, contaminantes atmosféricos como el material particulado (PM_{2,5}, PM₁₀), el dióxido de nitrógeno (NO₂) y el ozono (O₃) han sido ampliamente reconocidos como factores clave en la exacerbación de enfermedades respiratorias y en el aumento de la morbilidad asociada⁴.

Simultáneamente, los virus respiratorios, como el virus de la Influenza (Inf A y B), el virus respiratorio sincicial (VRS), el SARS-CoV-2 y otros agentes como adenovirus y metaneumovirus, representan una carga significativa para los sistemas de salud, especialmente durante picos epidémicos⁵. Las interacciones entre los factores ambientales y virales son complejas y multifactoriales; existe evidencia creciente que sugiere que la exposición crónica a contaminantes puede aumentar la susceptibilidad a infecciones virales, amplificar la transmisión comunitaria y agravar los desenlaces clínicos en pacientes infectados^{6,7}.

Por otra parte, las condiciones climáticas como la temperatura y la humedad relativa, desempeñan un papel determinante en la dinámica de la circulación viral y en la dispersión de los contaminantes atmosféricos, influyendo tanto en la exposición como en la susceptibilidad de la población⁸. En el contexto de Santiago de Chile, una ciudad caracterizada por altos niveles de contaminación ambiental y una marcada estacionalidad climática, estas interacciones adquieren especial relevancia para comprender las variaciones en la incidencia de enfermedades respiratorias⁹.

Entre los años 2020 y 2023, el panorama sanitario global estuvo dominado por la pandemia de COVID-19, lo que llevó a la implementación de medidas de mitigación como cuarentena, restricción de la movilidad y uso de mascarillas. Estas intervenciones no solo modificaron la transmisión del SARS-CoV-2, sino también los patrones de circulación de otros virus respiratorios, cuyas dinámicas epidemiológicas pudieron haber sido alteradas por los cambios en las interacciones humanas y la exposición ambiental¹⁰.

A pesar de los avances en la comprensión de los efectos individuales de los contaminantes ambientales y las condiciones climáticas sobre la salud respiratoria, persiste un vacío significativo en el entendimiento de cómo estas variables interactúan de manera sinérgica con la dinámica de circulación viral en áreas urbanas, con características particulares, como Santiago de Chile. Asimismo, no han sido estudiadas, adecuadamente, las implicaciones de las medidas de mitigación del COVID-19 sobre estas relaciones complejas.

Esta investigación tiene como objetivo analizar la asociación entre la contaminación ambiental, las condiciones climáticas y la circulación de virus respiratorios en distintas comunas de Santiago de Chile durante el período 2020-2023.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó un estudio exploratorio, ecológico, analítico, retrospectivo y longitudinal en diversas comunas de la ciudad de Santiago de Chile durante el período 2020-2023.

Se recopilaron datos ambientales y climáticos de estaciones de monitoreo de calidad del aire y meteorología en siete comunas de Santiago de Chile (Cerro Navia, La Florida, Las Condes, El Bosque, Pudahuel, Puente Alto y Santiago) entre el 1 de enero de 2020 y el 31 de diciembre de 2023. Igualmente se incluyeron datos de circulación viral basados en reportes epidemiológicos de infecciones respiratorias, publicados semanalmente por el Instituto Nacional de Salud y el Servicio de Vigilancia Epidemiológica Nacional para Enfermedades de Notificación Obligatoria en Chile^{11,12}.

Las comunas seleccionadas para este estudio presentan una diversidad de características epidemiológicas y ambientales que pueden influir en la circulación de virus respiratorios y la calidad del aire. Santiago, como capital del país, se caracteriza por su alta densidad poblacional y tráfico vehicular intenso, lo que contribuye a concentraciones elevadas de contaminantes atmosféricos, especialmente PM_{2,5} y NO₃, registrando una alta incidencia de influenza A y COVID-19. El Bosque y Cerro Navia, comunas con menor nivel socioeconómico y mayor densidad poblacional, presentan altos niveles de PM₁₀ debido a su cercanía a fuentes industriales y menor cobertura vegetal, observándose una mayor circulación de parainfluenza, adenovirus y VRS. La Florida con una alta actividad comercial y residencial, muestra niveles

intermedios de contaminación y una notable circulación de metaneumovirus (MNV). Las Condes, en contraste, presentan menores niveles de contaminación, gracias a su mayor cantidad de áreas verdes, aunque registra alta incidencia de influenza A y VRS, probablemente debido a la movilidad de su población. Pudahuel, con una combinación de áreas residenciales e industriales, presenta niveles moderados de contaminación y altas tasas de parainfluenza y VRS. Finalmente, Puente Alto, la comuna más poblada de Chile, muestra niveles elevados de PM_{10} y NO_3 , con una tendencia a la alta circulación de adenovirus y virus respiratorios en general. Estas diferencias ambientales y epidemiológicas pueden influir en la relación entre la contaminación atmosférica, las condiciones climáticas y la propagación de enfermedades respiratorias en la ciudad de Santiago.

Criterios de Inclusión

1. Comunas con datos disponibles de contaminantes atmosféricos, variables climáticas y circulación viral entre 2020 y 2023.

2. Estaciones con disponibilidad de las variables claves seleccionadas:

- Contaminantes: $PM_{2.5}$, PM_{10} , NO_2 , O_3 .
- Condiciones climáticas: temperatura promedio y humedad relativa.

Criterios de Exclusión

1. Comunas con información faltante para las variables seleccionadas.

2. Datos de calidad del aire y climáticos con valores atípicos extremos o errores de medición. Se excluyeron valores extremos identificados mediante el rango intercuartílico (IQR) ($Q1 \pm 1.5 \times IQR$) y aquellos que excedieran los límites aceptados por la OMS o normativas nacionales.

3. Virus respiratorios con menos del 5% de prevalencia en el universo estudiado durante el período analizado.

Variables Dependientes: Circulación viral (número de casos semanales por comuna de los siguientes virus):

1. Inf A (Influenza A).
2. Inf B (Influenza B).
3. VRS (Virus Respiratorio Sincicial).
4. COVID-19.
5. Adenovirus.
6. Metaneumovirus (MNV).

Variables Independientes: los contaminantes ambientales reportados por la autoridad nacional en la materia.

1. $PM_{2.5}$: Concentración diaria promedio ($\mu g/m^3$).
2. PM_{10} : Concentración diaria promedio ($\mu g/m^3$).
3. NO_2 (Dióxido de nitrógeno): Concentración diaria promedio ($\mu g/m^3$).
4. O_3 (Ozono): Concentración diaria promedio ($\mu g/m^3$).

Condiciones climáticas:

1. Temperatura ($^{\circ}C$).
2. Humedad relativa (%).

Sesgos

Este estudio podría estar sujeto a sesgo de Información, dado que se emplearon datos secundarios obtenidos de fuentes oficiales y bases de datos, cuya calidad y precisión pueden variar. Este sesgo podría afectar la exactitud de las mediciones de variables climáticas, contaminantes y virales. Asimismo, el uso de datos agregados a nivel comunal puede introducir sesgo ecológico, limitando la capacidad de inferir asociaciones a nivel individual. Para reducir el impacto de estos sesgos, se seleccionaron únicamente fuentes de datos estatales y consistentes en el tiempo. Adicionalmente, se implementaron ajustes estadísticos en los modelos analíticos para controlar posibles confusores.

Para resumir las características de las variables estudiadas, se efectuó un análisis estadístico de tipo descriptivo, empleando medidas de tendencia central y dispersión para variables cuantitativas. Posteriormente, para evaluar asociaciones entre las variables contaminantes, climáticas y virales, se realizó un análisis bivariado utilizando el coeficiente de correlación de Spearman, debido a la naturaleza no paramétrica de los datos.

Se generaron mapas de calor para representar las concentraciones promedio de contaminantes atmosféricos por comuna, permitiendo visualizar patrones espaciales y temporales. Adicionalmente, se realizaron análisis de densidad mediante estimaciones Kernel para variables virales y contaminantes. Este método permitió representar de forma continua y suavizada la distribución relativa de las concentraciones de contaminantes y de los casos virales por comuna, destacando las zonas con mayor frecuencia relativa dentro del rango observado.

Para explorar relaciones más complejas y controlar factores de confusión, se llevaron a cabo análisis multivariados mediante modelos mixtos generalizados. Estos modelos utilizaron una distribución de Poisson con función de enlace logarítmica, adecuada para variables de conteo. Además, se incluyeron efectos aleatorios para capturar la variabilidad por semana epidemiológica.

Los resultados de las correlaciones y coeficientes se reportaron con sus respectivos intervalos de confianza al 95% y valores de significancia estadística ($p < 0,05$).

El procesamiento y análisis de los datos se realizaron utilizando los programas RStudio (versión 4.2.2) y IBM SPSS Statistics (versión 29.0).

Para cumplir con los aspectos éticos, este estudio se llevó a cabo utilizando únicamente datos secundarios y de acceso público, asegurando la anonimización de la Información y el cumplimiento de los principios de la Declaración de Helsinki. Al no involucrar datos de pacientes ni Información personal identificable, y dado que no se realizaron intervenciones directas, el estudio fue clasificado como de riesgo mínimo o sin riesgo. Por esta razón, no fue necesario someter el proyecto a la revisión de un comité de ética.

RESULTADOS

Los análisis descriptivos de las variables ambientales (contaminantes atmosféricos y condiciones climáticas) y la incidencia de virus respiratorios en las comunas de Santiago de Chile durante el período 2020-2023 se presentan en la Tabla 1.

El cálculo de las densidades, tanto para los contaminantes como para los virus respiratorios, se realizó mediante estimaciones de densidad de probabilidad utilizando funciones Kernel, específicamente el método Kernel Density Estimation (KDE).

En relación con la densidad de contaminantes, se analizaron los niveles de $PM_{2,5}$, PM_{10} , NO_2 y O_3 (Figura 1). Los resultados muestran que, en general, el PM_{10} presentó las mayores densidades en todas las comunas, con valores máximos en El Bosque (73,43), seguido por Cerro Navia (69,56) y Puente Alto (68,06). En contraste, los niveles de O_3 fueron consistentemente más bajos, destacando El Bosque

(14,32) y Cerro Navia (14,90) como las comunas con mayor densidad para este contaminante. Por otro lado, la densidad de $PM_{2,5}$ osciló entre 17,72 en Las Condes y 27,98 en El Bosque, mientras que NO_2 mostró una variación entre 17,39 en Puente Alto y 23,31 en El Bosque.

En cuanto a la densidad viral, los valores se calcularon para los virus respiratorios INF A, INF B, P-INF, VRS, MNV, adenovirus y COVID-19 (Figura 2). INF A presentó la mayor densidad en Santiago (0,93), seguido por Pudahuel y Las Condes, ambas con 0,8. MNV tuvo densidades más altas en La Florida (0,73) y El Bosque (0,62), mientras que P-INF mostró valores destacados en Pudahuel (0,66) y El Bosque (0,62). Adenovirus presentó valores similares en El Bosque (0,48) y Puente Alto (0,62). En contraste, COVID-19 mostró densidades bajas, con un valor máximo de 0,23 en Santiago, mientras que INF B reportó valores homogéneos, con máximos de 0,2 en Cerro Navia y Santiago. Finalmente VRS presentó mayores densidades en Pudahuel (0,66) y El Bosque (0,44).

El análisis bivariado realizado, a través del Coeficiente de Correlación de Spearman, para explorar las relaciones entre contaminantes atmosféricos ($PM_{2,5}$, PM_{10} , NO_2 , O_3), variables climáticas (temperatura promedio y humedad relativa) y la circulación de virus respiratorios (Inf A, Inf B, P-Inf, COVID-19, MNV, VRS y adenovirus) se muestra en la Tabla 2. Los resultados indican que $PM_{2,5}$ tuvo correlaciones positivas y significativas con varios virus, siendo las más destacadas con P-Inf ($\rho = 0,386$, IC 95%: 0,260-0,499, $p < 0,001$), adenovirus ($\rho = 0,387$, IC 95%: 0,262-0,500, $p < 0,001$) e Inf A ($\rho = 0,315$, IC 95%: 0,183-0,436, $p < 0,001$). PM_{10} reportó asociaciones positivas más débiles, principalmente con P-Inf ($\rho = 0,252$, IC 95%: 0,116-0,378, $p < 0,001$) y MNV ($\rho = 0,147$, IC 95%: 0,007-0,281, $p = 0,034$).

En el caso de NO_2 , se observaron correlaciones tanto positivas como negativas. Por ejemplo, presentó una relación negativa significativa con Inf A ($\rho = -0,369$, IC 95%: -0,484--0,242, $p < 0,001$) pero positiva con adenovirus ($\rho = 0,403$, IC 95%: 0,279-0,514, $p < 0,001$) y P-Inf ($\rho = 0,34$, IC 95%: 0,210-0,458, $p < 0,001$). Por otro lado, O_3 mostró correlaciones consistentemente negativas con todos los virus evaluados, destacando adenovirus ($\rho = -0,432$, IC 95%: -0,539--0,311, $p < 0,001$) e Inf B ($\rho = -0,419$, IC 95%: -0,528--0,296, $p < 0,001$).

Tabla 1. Descripción estadística de contaminantes atmosféricos y virus circulantes en comunas. Chile 2020-2023.

Variables	N	Mínimo	Máximo	Media	Desv. estándar
PM _{2.5}	1456	4,25	83	23,707	14,117
PM ₁₀	1456	18,43	163,71	65,290	23,517
NO ₂	1456	1,214	55,621	20,578	9,452
O ₃	1456	0	49,428	16,386	7,934
Temperatura promedio	1456	0	24,821	15,090	4,933
Humedad relativa	1456	0	92,983	60,015	12,574
Inf-A	208	0	12	0,62	1,743
Inf-B	208	0	2	0,15	0,463
P-Inf	208	0	6	0,5	1,059
Covid	208	0	4	0,08	0,391
MNV	208	0	14	0,46	1,431
VRS	208	0	7	0,41	1,143
Adenovirus	208	0	3	0,34	0,675

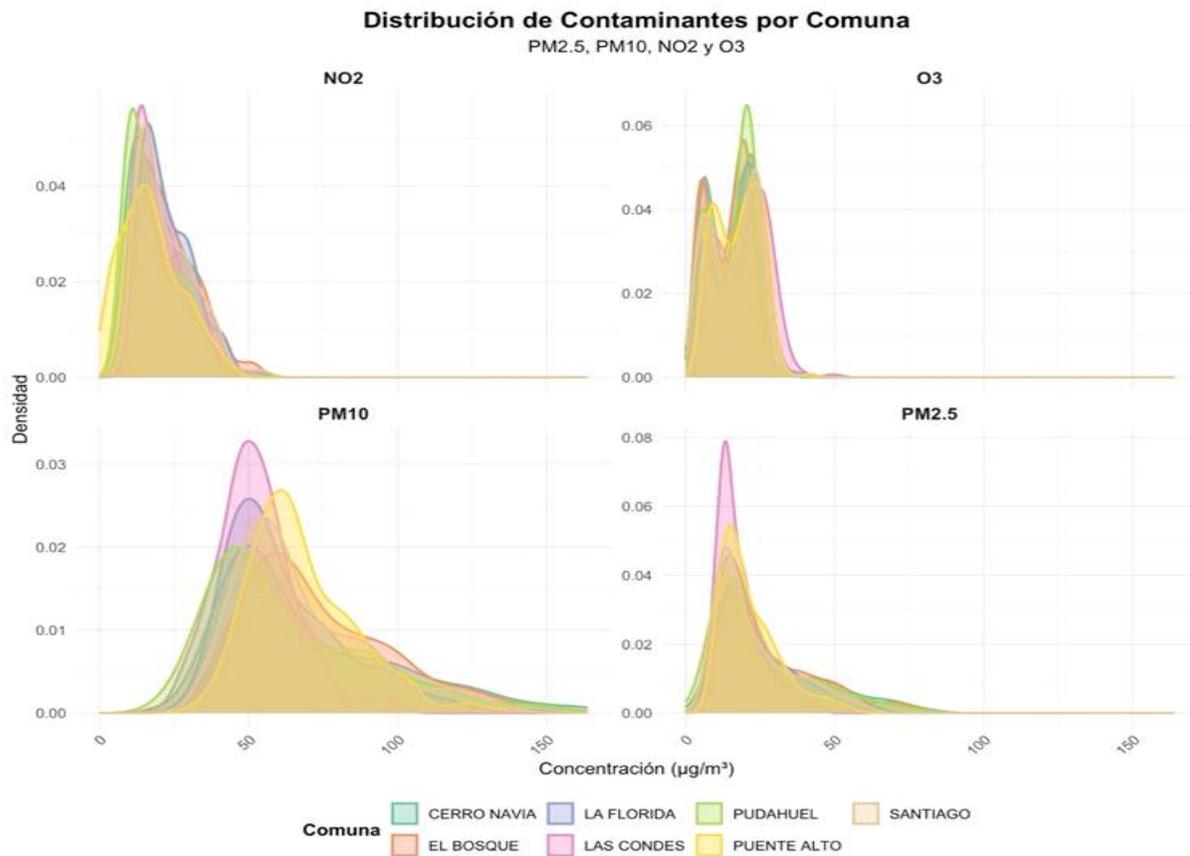


Figura 1. Distribución de contaminantes atmosféricos por comunas de Santiago de Chile.

Las variables climáticas también mostraron asociaciones significativas. La temperatura promedio presentó correlaciones negativas con todos los virus respiratorios, siendo más pronunciada con adenovirus ($\rho=-0,527$, IC 95%: $-0,621--0,417$, $p<0,001$) e Inf B ($\rho=-0,42$, IC 95%: $-0,529--0,298$, $p<0,001$). Por el contrario, la humedad relativa exhibió correlaciones positivas significativas, especialmente con Inf B ($\rho=0,42$, IC 95%: $0,297-0,529$, $p<0,001$), adenovirus ($\rho=0,387$, IC 95%: $0,261-0,500$, $p<0,001$) e Inf A ($\rho=0,348$, IC 95%: $0,219-0,466$, $p<0,001$).

Para evaluar las asociaciones entre contaminantes atmosféricos, variables climáticas y la incidencia de virus respiratorios se realizaron modelos mixtos generalizados (análisis multivariado), tal como se presenta en la tabla 3. En el caso de Inf A, se observaron asociaciones significativas con NO_2 ($B = 0,044$, IC 95%: $0,006-0,082$, $p = 0,024$), O_3 ($B = -0,122$, IC 95%: $-0,176--0,069$, $p<0,001$) y humedad relativa ($B = -0,028$, IC 95%: $-0,054--0,002$, $p = 0,037$). Para Inf B, la temperatura promedio mostró una asociación negativa significativa ($B = -0,272$, IC 95%: $-0,516--0,028$, $p = 0,029$).

En el caso de P-Inf, se identificaron asociaciones significativas con O_3 ($B = -0,064$, IC 95%: $-0,118--0,011$, $p = 0,019$), temperatura promedio ($B = -0,162$, IC 95%: $-0,266--0,059$, $p = 0,002$) y humedad relativa ($B = -0,057$, IC 95%: $-0,088--0,026$, $p<0,001$).

Para COVID-19, se observó una relación significativa con $\text{PM}_{2,5}$ ($B = -0,086$, IC 95%: $-0,171--0,001$, $p = 0,048$). En cuanto a MNV, se encontraron asociaciones significativas con $\text{PM}_{2,5}$ ($B = -0,047$, IC 95%: $-0,082--0,011$, $p = 0,01$), PM_{10} ($B = 0,029$, IC 95%: $0,008-0,049$, $p = 0,006$) y O_3 ($B = -0,075$, IC 95%: $-0,132--0,018$, $p = 0,01$).

Para VRS, se identificaron relaciones con $\text{PM}_{2,5}$ ($B = -0,134$, IC 95%: $-0,183--0,086$, $p < 0,001$), PM_{10} ($B=0,079$, IC 95%: $0,051-0,107$, $p<0,001$), temperatura promedio ($B = -0,558$, IC 95%: $-0,706--0,41$, $p<0,001$) y humedad relativa ($B = -0,056$, IC 95%: $-0,089--0,022$, $p = 0,001$).

Finalmente, para adenovirus, la temperatura promedio ($B= -0,323$, IC 95%: $-0,458--0,188$, $p<0,001$) y la humedad relativa ($B = -0,061$, IC 95%: $-0,099--0,022$, $p = 0,002$) mostraron asociaciones estadísticamente significativas.

DISCUSIÓN

El análisis de los resultados permitió explorar de manera robusta las interacciones entre contaminantes atmosféricos, variables climáticas y la incidencia de virus respiratorios en Santiago de Chile. Este estudio proporciona evidencia relevante sobre la influencia de factores ambientales en la circulación viral, contribuyendo a una mejor comprensión de los determinantes de la salud respiratoria en contextos urbanos densamente poblados^{9,13}. Las comunas con mayores densidades de contaminantes, como Cerro Navia y El Bosque, presentaron también mayores concentraciones de virus respiratorios como parainfluenza (P-Inf) y adenovirus (Figura 1 y 2). Este hallazgo subraya la posible relación entre la calidad del aire y la incidencia viral, respaldando estudios previos que han indicado que niveles elevados de $\text{PM}_{2,5}$ y PM_{10} pueden exacerbar la susceptibilidad a infecciones respiratorias^{14,15}.

En contraste, comunas como Las Condes, que mostraron menores densidades de $\text{PM}_{2,5}$, exhibieron mayores niveles de circulación de otros virus, como influenza A (Inf A) y virus respiratorio sincitial (VRS). Esto podría atribuirse a la interacción entre factores climáticos locales y patrones específicos de movilidad y densidad poblacional en estas áreas. Estudios realizados en contextos similares han demostrado que las diferencias microclimáticas y sociodemográficas pueden modular significativamente la dinámica de transmisión viral^{16,17}.

Además, los mapas de calor generados para representar la concentración de contaminantes atmosféricos revelaron que los niveles de $\text{PM}_{2,5}$ y PM_{10} fueron consistentemente altos en áreas densamente pobladas y con elevada actividad vehicular (Figura 3). Esto coincide con estudios realizados en otras ciudades altamente urbanizadas, como Beijing y São Paulo, donde las concentraciones de contaminantes son mayores en áreas de alta densidad vehicular e industrial^{18,19}.

Estas observaciones refuerzan la importancia de las políticas de control de emisiones como una estrategia central para mitigar los efectos de la contaminación en la salud respiratoria²⁰. En Santiago, donde la geografía de la cuenca limita la dispersión de contaminantes, estas medidas son particularmente cruciales. Por ejemplo, la implementación de zonas de baja emisión y el fomento del transporte público limpio, podrían contribuir significativamente a reducir la exposición a $\text{PM}_{2,5}$ y otros contaminantes nocivos^{21,22}.

Tabla 2. Correlaciones bivariadas entre circulación viral, contaminantes ambientales y variables atmosféricas según el coeficiente de Spearman.

		PM _{2.5}	PM ₁₀	NO ₂	O ₃	Temperatura promedio	Humedad relativa
	Rho	0,315	0,105	-0,369	-0,391	-0,389	0,348
Inf-A	IC 95%	0,183-0,436	-1,855- 2,065	0,242- 0,484	-0,503— 0,265	-0,502 - -0,263	0,219-0,466
	Valor p	<0,001	0,13	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	Rho	0,307	0,043	0,27	-0,419	-0,42	0,42
Inf-B	IC 95%	0,174,-0,429	-1,916- 2,004	0,135- 0,395	-0,528— 0,296	-0,529 - -0,298	0,297-0,529
	Valor p	<0,001	0,53	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	Rho	0,386	0,252	0,34	-0,346	-0,378	0,275
P-Inf	IC 95%	0,260-0,499	0,116- 0,378	0,210- 0,458	-0,463— 0,216	-0,492 - -0,251	0,141-0,400
	Valor p	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	Rho	0,176	0,121	0,22	-0,232	-0,225	0,222
Covid	IC 95%	0,037-0,308	-1,838- 2,082	0,083- 0,350	-0,360— 0,095	-0,354 - -0,088	0,085-0,352
	Valor p	0,011	0,079	0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	Rho	0,267	0,147	0,277	-0,274	-0,27	0,206
MNV	IC 95%	0,132-0,392	0,007- 0,281	0,142- 0,401	-0,399— 0,139	-0,395 - -0,135	0,068-0,337
	Valor p	<0,001	0,034	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	Rho	0,247	0,119	0,287	-0,224	-0,316	0,201
VRS	IC 95%	0,111-0,374	-1,84- 2,08	0,153- 0,410	-0,353— 0,087	-0,437 - -0,184	0,062-0,331
	Valor p	<0,001	0,084	<0,001	0,001	<0,001	0,003
	Rho	0,387	0,126	0,403	-0,432	-0,527	0,387
Adenovirus	IC 95%	0,262-0,500	-1,91- 2,15	0,279- 0,514	-0,539- 0,311	-0,621 - -0,417	0,261-0,500
	Valor p	<0,001	0,067	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

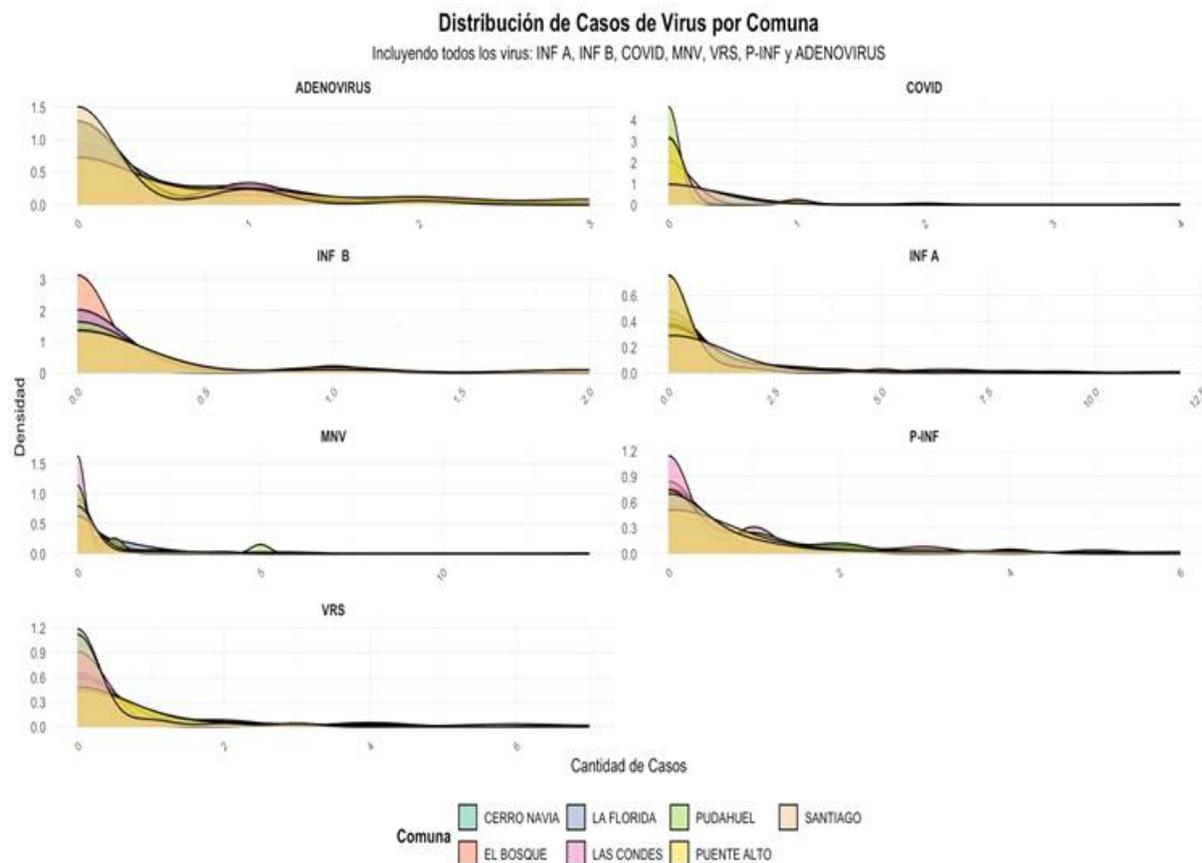


Figura 2. Distribución de la densidad de casos virales por tipo de virus respiratorio y comunas de Santiago de Chile.

Los resultados del análisis de correlación indicaron relaciones significativas entre los contaminantes atmosféricos y las variables climáticas, confirmando su interacción como determinantes en la incidencia de virus respiratorios²³. Por ejemplo, el $PM_{2.5}$ mostró correlaciones positivas con varios virus, como Inf A y B, P-Inf, metapneumovirus (MNV), COVID-19 y VRS, lo que respalda su papel como promotor de la inflamación de las vías respiratorias²⁴.

Este hallazgo está alineado con investigaciones previas que han señalado que el $PM_{2.5}$, al penetrar en las vías respiratorias, facilita la entrada de partículas virales y exacerba la inflamación^{25,26}. Este patrón fue evidente en las comunas más densamente pobladas de Santiago, donde la alta carga de contaminantes se superpuso con la prevalencia de virus respiratorios²⁷.

En contraste, el ozono (O_3) mostró correlaciones negativas con varios virus, como Inf A y B, P-Inf, MNV, COVID-19, VRS y adenovirus, lo cual puede explicarse por el papel del ozono como oxidante ambiental, que podría reducir la viabilidad de ciertos virus en el aire^{28,29}.

Este efecto, parece depender del contexto climático y de los niveles de otros contaminantes. Estudios en Norteamérica han señalado que el ozono puede mitigar la propagación viral, aunque investigaciones realizadas en áreas con alta radiación solar, como el Mediterráneo, han reportado resultados opuestos^{30,31}. Este comportamiento heterogéneo refuerza la importancia de considerar las características específicas de cada región al interpretar estos hallazgos³². Las variables climáticas también desempeñaron un papel crucial. La temperatura

promedio mostró correlaciones negativas con varios virus, como Inf A y B, P-Inf, MNV, COVID-19 y VRS, lo que es consistente con estudios que documentan una mayor estabilidad y transmisibilidad viral en condiciones de bajas temperaturas³³.

Investigaciones en países nórdicos han señalado un incremento estacional en la incidencia de infecciones respiratorias durante los meses de invierno, debido a la estabilización de partículas virales en ambientes fríos³⁴. Asimismo, la humedad relativa presentó asociaciones tanto positivas como negativas, dependiendo del virus estudiado. Por ejemplo, mostró una relación negativa con Inf A, lo que puede estar relacionado con su impacto en la dispersión y viabilidad de partículas virales³⁵. Sin embargo, en el caso de P-Inf y los demás virus estudiados, la humedad relativa presentó una correlación positiva, lo que sugiere que estos virus podrían tener una mayor estabilidad en condiciones húmedas³⁶.

Estas variaciones subrayan la naturaleza multifactorial de la dinámica viral y la necesidad de considerar múltiples dimensiones al evaluar el impacto de las variables climáticas. Los modelos mixtos generalizados (GLMM) proporcionaron una herramienta robusta para ajustar las asociaciones detectadas en el análisis descriptivo y bivariado, permitiendo controlar factores de confusión y variabilidad intrínseca entre semanas. Para Inf A, se observaron asociaciones significativas con NO₂, ozono y humedad relativa. La asociación positiva con NO₂ indica que este contaminante puede actuar como un desencadenante de procesos inflamatorios que aumentan la susceptibilidad al virus³⁷.

Por otro lado, la asociación negativa con el ozono refuerza su posible papel como mitigador de la viabilidad viral en el ambiente³⁸. La relación negativa con la humedad relativa destaca su influencia en la dispersión y estabilidad de partículas virales, lo que

Tabla 3. Coeficientes del análisis de modelos mixtos generalizados para la asociación entre contaminantes ambientales, variables atmosféricas y circulación viral en comunas de Santiago de Chile.

Variable	Predictor	B	Inferior	Superior	Sig.
Adenovirus	Temperatura promedio	-0,323	-0,458	-0,188	<,001
Adenovirus	Humedad relativa	-0,061	-0,099	-0,022	0,002
Covid	PM _{2.5}	-0,086	-0,171	-0,001	0,048
Inf-A	NO ₂	0,044	0,006	0,082	0,024
Inf-A	O ₃	-0,122	-0,176	-0,069	<,001
Inf-A	Humedad relativa	-0,028	-0,054	-0,002	0,037
Inf-B	Temperatura promedio	-0,272	-0,516	-0,028	0,029
MNV	PM _{2.5}	-0,047	-0,082	-0,011	0,01
MNV	PM ₁₀	0,029	0,008	0,049	0,006
MNV	O ₃	-0,075	-0,132	-0,018	0,01
P-Inf	O ₃	-0,064	-0,118	-0,011	0,019
P-Inf	Temperatura promedio	-0,162	-0,266	-0,059	0,002
P-Inf	Humedad relativa	-0,057	-0,088	-0,026	<,001
VRS	PM _{2.5}	-0,134	-0,183	-0,086	<,001
VRS	PM ₁₀	0,079	0,051	0,107	<,001
VRS	Temperatura promedio	-0,558	-0,706	-0,41	<,001
VRS	Humedad relativa	-0,056	-0,089	-0,022	0,001

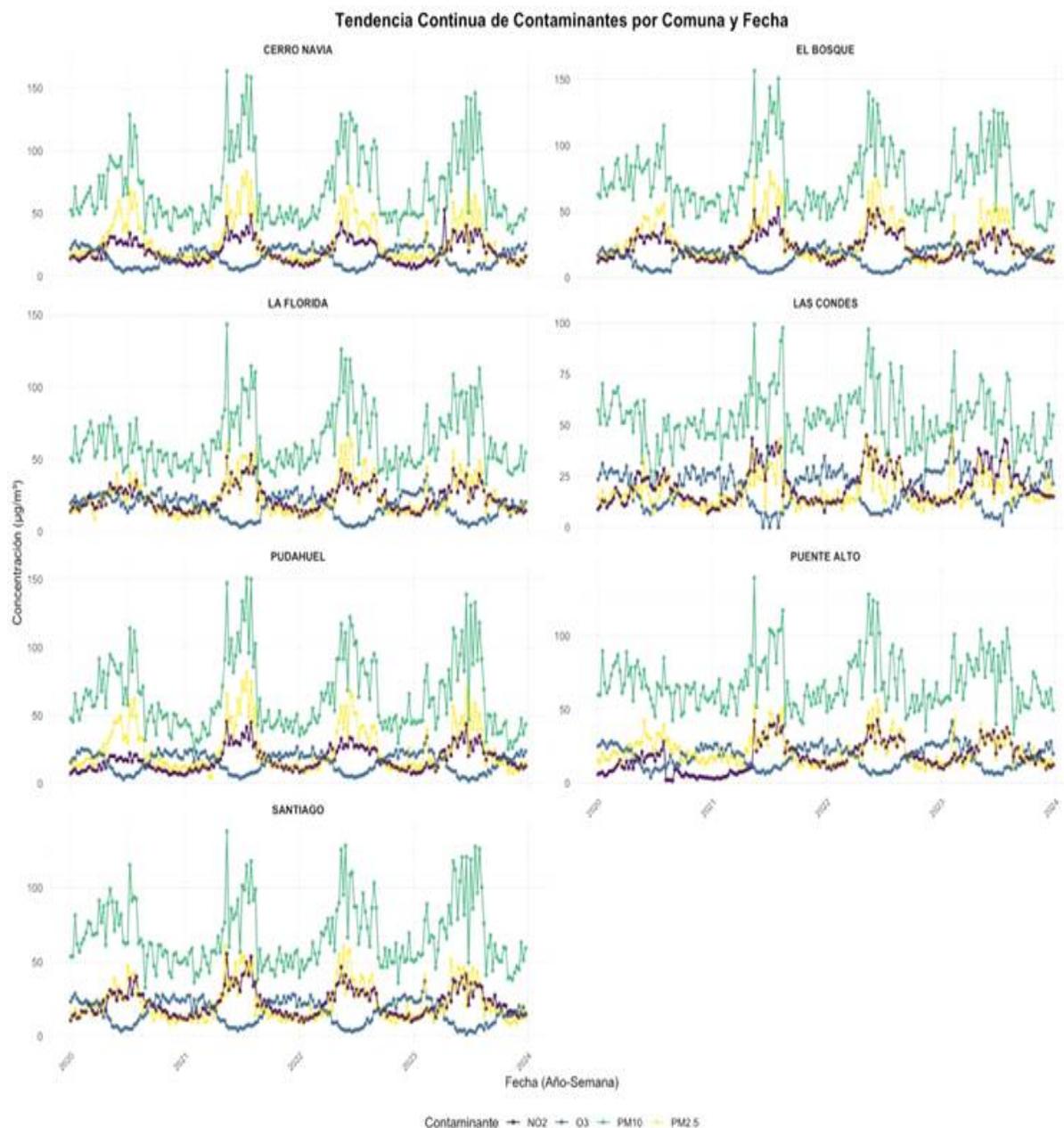


Figura 3. Tendencia temporal de concentraciones de contaminantes atmosféricos por comuna y año-semana en Santiago de Chile.

podría ser relevante para estrategias de mitigación específicas³⁹. En el caso de Inf B, la temperatura promedio emergió como un predictor negativo significativo. Este hallazgo es consistente con estudios previos que documentan una mayor incidencia de este virus durante períodos de bajas temperaturas, lo que puede explicarse por la estabilización de partículas virales en ambientes fríos⁴⁰.

Este resultado refuerza la importancia de monitorear las condiciones climáticas como un factor clave en la dinámica de transmisión viral. Para P-Inf, las asociaciones detectadas incluyeron contaminantes como el ozono y variables climáticas como la temperatura promedio y la humedad relativa. La asociación negativa con el ozono sugiere que este contaminante puede tener un efecto protector contra

este virus, mientras que las relaciones negativas con la temperatura promedio y la humedad relativa subrayan la complejidad de los factores que influyen en su incidencia⁴¹.

Estas asociaciones refuerzan el carácter multifactorial de este virus, que parece estar influenciado tanto por la calidad del aire como por las condiciones climáticas. El análisis del COVID-19 mostró una relación negativa con el $PM_{2.5}$, lo que podría estar influenciado por las medidas de mitigación implementadas durante el período estudiado. Restricciones como confinamientos y reducción del tráfico vehicular resultaron en una disminución significativa de los niveles de $PM_{2.5}$, lo que podría haber alterado los patrones de transmisión viral. Este hallazgo es consistente con estudios realizados en Europa y Norteamérica, donde se documentaron reducciones en la incidencia de infecciones respiratorias durante los confinamientos, atribuibles a menores niveles de contaminación y medidas preventivas como el uso de mascarillas⁴².

El período estudiado estuvo marcado por la implementación de medidas de mitigación ante la pandemia de COVID-19, lo que representa un contexto único para interpretar los resultados. Restricciones como confinamientos y reducción de actividades económicas resultaron en disminuciones, sin precedentes, en los niveles de contaminación atmosférica, lo que pudo haber modificado las dinámicas de transmisión viral. Estos hallazgos refuerzan la importancia de intervenciones conjuntas

que reduzcan la contaminación atmosférica y mejoren la calidad del aire, particularmente en contextos urbanos densamente poblados.

Este estudio tiene limitaciones inherentes a su diseño ecológico, lo que impide establecer causalidad directa entre las variables analizadas. Además, la disponibilidad de datos a nivel comunal puede no reflejar completamente la heterogeneidad dentro de cada comuna. Las mediciones de contaminantes y variables climáticas se realizaron en estaciones específicas, lo que podría no representar adecuadamente la exposición individual. Asimismo, el uso de registros agregados de circulación viral limita la capacidad de analizar diferencias a nivel individual. Finalmente, las medidas de mitigación implementadas durante la pandemia de COVID-19 pueden haber influido en los patrones observados, generando posibles sesgos en la interpretación de los resultados. Por tratarse de un estudio exploratorio, los resultados no son concluyentes debido a las limitaciones y sesgos reportados.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores no reportan conflictos de interés relacionados con este trabajo.

DECLARACIÓN DE FINANCIACIÓN

El estudio no contó con financiación externa, todos los costos fueron asumidos por los investigadores.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) Maio S, Sarno G, Tagliaferro S, Pirona F, Stanisci I, Baldacci S, et al. Outdoor air pollution and respiratory health. *International Journal of Tuberculosis and Lung Disease*. 2023 Jan 1;27(1):7-12.
- 2) Schraufnagel DE, Balmes JR, Cowl CT, De Matteis S, Jung SH, Mortimer K, 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 Feb 1;155(2):417-26.
- 3) Manisalidis I, Stavropoulou E, Stavropoulos A, Bezirtzoglou E. Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review. *Front Public Health* [Internet]. 2020 Feb 20 [cited 2024 Dec 31];8:505570. Available from: www.frontiersin.org
- 4) Agarwal NK, Sharma P, Agarwal SK. Particulate matter air pollution and cardiovascular disease. *Med Sci* [Internet]. 2017 Nov 1 [cited 2024 Dec 31];21(88):270-9. Available from: <https://researchdiscovery.drexel.edu/esploro/outputs/journalArticle/Particulate-matter-air-pollution-and-cardiovascular/991019319071004721>
- 5) Iuliano AD, Roguski KM, Chang HH, Muscatello DJ, Palekar R, Tempia S, et al. Estimates of global seasonal influenza-associated respiratory mortality: a modelling study. *The Lancet* [Internet]. 2018 Mar 31 [cited 2024 Dec 31];391(10127):1285-300. Available from: <http://www.thelancet.com/article/S0140673617332932/fulltext>
- 6) Conticini E, Frediani B, Caro D. Can atmospheric pollution be considered a co-factor in extremely high level of SARS-CoV-2 lethality in Northern Italy? *Environmental Pollution*. 2020 Jun 1;261:114465.
- 7) Domingo JL, Rovira J. Effects of air pollutants on the transmission and severity of respiratory viral infections. *Environ Res*. 2020 Aug 1;187:109650.
- 8) Moriyama M, Hugentobler WJ, Iwasaki A. Annual review of virology seasonality of respiratory viral infections. *Annu Rev Virol* [Internet]. 2020 Sep 29 [cited 2024 Dec 31];7(Volume 7, 2020):83-101. Available from: <https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev-virology-012420-022445>.
- 9) Pope CA, Dockery DW. Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect. *J Air Waste Manage Assoc* [Internet]. 2006 [cited 2024 Dec 22];56(6):709-42. Available from: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10473289.2006.10464485>.
- 10) Venter ZS, Aunan K, Chowdhury S, Lelieveld J. COVID-19 lockdowns cause global air pollution declines. *Proc Natl Acad Sci U S A* [Internet]. 2020 Aug 11 [cited 2024 Dec 31];117(32):18984-90. Available from: <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.2006853117>.
- 11) Ministerio del Medio Ambiente (Chile). Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA). Region Metropolitana de Santiago. 2024. p. 1.
- 12) Ministerio de Salud de Chile. Vigilancia Epidemiológica Influenza e Infecciones Respiratorias [Internet]. 2024 [cited 2025 Mar 18]. p. 1. Available from: <https://www.ispch.gob.cl/biomedico/vigilancia-de-laboratorio/ambitos-de-vigilancia/vigilancia-virus-respiratorios/informes-virus-respiratorios/?y=2024>
- 13) Dominici F, Peng RD, Bell ML, Pham L, McDermott A, Zeger SL, et al. Fine Particulate Air Pollution and Hospital Admission for Cardiovascular and Respiratory Diseases. *JAMA* [Internet]. 2006 Mar 8 [cited 2024 Dec 22];295(10):1127-34. Available from: <https://jamanetwork.com/journals/jama/fullarticle/202503>
- 14) Brook RD, Rajagopalan S, Pope CA, Brook JR, Bhatnagar A, Diez-Roux A V., et al. Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: An update to the scientific statement from the American Heart Association. *Circulation* [Internet]. 2010 Jun 1 [cited 2024 Dec 22];121(21):2331-78. Available from: <https://www.ahajournals.org/doi/10.1161/CIR.0b013e3181dbee1>
- 15) Guarneri M, Balmes JR. Outdoor air pollution and asthma. *The Lancet* [Internet]. 2014 May 3 [cited 2024 Dec 22];383(9928):1581-92. Available from: <http://www.thelancet.com/article/S0140673614606176/fulltext>
- 16) Samet J, Buist S, Bascom R, Garcia J, Lipsett M, Mauderly J, et al. What constitutes an adverse health effect of air pollution? *Am J Respir Crit Care Med* [Internet]. 2000 [cited 2024 Dec 23];161(2 Pt 1):665-73. Available from: <https://pure.johnshopkins.edu/en/publications/what-constitutes-an-adverse-health-effect-of-air-pollution-3>
- 17) Cohen AJ, Brauer M, Burnett R, Anderson HR, Frostad J, Estep K, et al. Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015. *The Lancet* [Internet]. 2017 May 13 [cited 2024 Nov 1];389(10082):1907-18. Available from: <http://www.thelancet.com/article/S0140673617305056/fulltext>
- 18) Janssen NAH, Hoek G, Simic-Lawson M, Fischer P, van Bree L, Brink H Ten, et al. Black carbon as an additional indicator of the adverse health effects of airborne particles compared with pm10 and pm2.5. *Environ Health Perspect* [Internet]. 2011 [cited 2024 Dec 22];119(12):1691-9. Available from: <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/10.1289/ehp.1003369>
- 19) Lelieveld J, Evans JS, Fnais M, Giannadaki D, Pozzer A. The contribution of outdoor air pollution sources to premature

- mortality on a global scale. *Nature* 2015 525:7569 [Internet]. 2015 Sep 16 [cited 2024 Dec 22];525(7569):367-71. Available from: <https://www.nature.com/articles/nature15371>
- 20) Bauer SE, Tsigaridis K, Miller R. Significant atmospheric aerosol pollution caused by world food cultivation. *Geophys Res Lett* [Internet]. 2016 May 28 [cited 2024 Dec 23];43(10):5394-400. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2016GL068354>
- 21) McConnell R, Berhane K, Yao L, Jerrett M, Lurmann F, Gilliland F, *et al.* Traffic, susceptibility, and childhood asthma. *Environ Health Perspect* [Internet]. 2006 May [cited 2024 Dec 23];114(5):766-72. Available from: <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/10.1289/ehp.8594>
- 22) D'amato G, Cecchi L, Amato D, Liccardi G. Urban Air Pollution and Climate Change as Environmental Risk Factors of Respiratory Allergy: An Update. *J Investig Allergol Clin Immunol*. 2010;20(2):95-102.
- 23) Spix C, Anderson HR, Schwartz J, Vigotti MA, Letertre A, Vonk JM, *et al.* Short-Term Effects of Air Pollution on Hospital Admissions of Respiratory Diseases in Europe: A Quantitative Summary of APHEA Study Results. *Archives of Environmental Health: An International Journal* [Internet]. 1998 Jan 1 [cited 2024 Dec 23];53(1):54-64. Available from: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00039899809605689>
- 24) Zhao Y, Wang S, Aunan K, Martin Seip H, Hao J. Air pollution and lung cancer risks in China-a meta-analysis. *Science of The Total Environment*. 2006 Aug 1;366(2-3):500-13.
- 25) Huang J, Pan X, Guo X, Li G. Health impact of China's Air Pollution Prevention and Control Action Plan: an analysis of national air quality monitoring and mortality data. *Lancet Planet Health* [Internet]. 2018 Jul 1 [cited 2024 Dec 23];2(7):e313-23. Available from: <http://www.thelancet.com/article/S2542519618301414/fulltext>
- 26) Dockery DW, Pope CA, Xu X, Spengler JD, Ware JH, Fay ME, *et al.* An Association between Air Pollution and Mortality in Six U.S. Cities. *New England Journal of Medicine* [Internet]. 1993 Dec 9 [cited 2024 Dec 23];329(24):1753-9. Available from: <https://www.nejm.org/doi/full/10.1056/NEJM199312093292401>
- 27) Burnett RT, Arden Pope C, Ezzati M, Olives C, Lim SS, Mehta S, *et al.* An integrated risk function for estimating the global burden of disease attributable to ambient fine particulate matter exposure. *Environ Health Perspect* [Internet]. 2014 [cited 2024 Dec 23];122(4):397-403. Available from: <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/10.1289/ehp.1307049>
- 28) Ostro B, Chestnut L. Assessing the Health Benefits of Reducing Particulate Matter Air Pollution in the United States. *Environ Res*. 1998 Feb 1;76(2):94-106.
- 29) Blanc N, Liao J, Gilliland F, Zhang J (Jim), Berhane K, Huang G, *et al.* A systematic review of evidence for maternal preconception exposure to outdoor air pollution on Children's health. *Environmental Pollution*. 2023 Feb 1;318:120850.
- 30) Kim H, Byun G, Choi Y, Kim S, Kim SY, Lee JT. Effects of long-term exposure to air pollution on all-cause mortality and cause-specific mortality in seven major cities of South Korea: Korean national health and nutritional examination surveys with mortality follow-up. *Environ Res*. 2021 Jan 1;192:110290.
- 31) Orellano P, Quaranta N, Reynoso J, Balbi B, Vasquez J. Effect of outdoor air pollution on asthma exacerbations in children and adults: Systematic review and multilevel meta-analysis. *PLoS One* [Internet]. 2017 Mar 1 [cited 2024 Dec 23];12(3):e0174050. Available from: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0174050>
- 32) Luong LMT, Phung D, Dang TN, Sly PD, Morawska L, Thai PK. Seasonal association between ambient ozone and hospital admission for respiratory diseases in Hanoi, Vietnam. *PLoS One* [Internet]. 2018 Sep 1 [cited 2024 Dec 23];13(9):e0203751. Available from: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0203751>
- 33) Kampa M, Castanas E. Human health effects of air pollution. *Environmental Pollution*. 2008 Jan 1;151(2):362-7.
- 34) Schikowski T, Mills IC, Anderson HR, Cohen A, Hansell A, Kauffmann F, *et al.* Ambient air pollution: a cause of COPD? *European Respiratory Journal* [Internet]. 2013 Dec 31 [cited 2024 Dec 23];43(1):250-63. Available from: <https://publications.ersnet.org/content/erj/43/1/250>
- 35) Kinney PL. Climate Change, Air Quality, and Human Health. *Am J Prev Med*. 2008 Nov 1;35(5):459-67.
- 36) Weinmayr G, Romeo E, de Sario M, Weiland SK, Forastiere F. Short-Term effects of PM10 and NO2 on respiratory health among children with asthma or asthma-like symptoms: A systematic review and Meta-Analysis. *Environ Health Perspect* [Internet]. 2010 Apr [cited 2024 Dec 23];118(4):449-57. Available from: <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/10.1289/ehp.0900844>
- 37) Horne BD, Joy EA, Hofmann MG, Gesteland PH, Cannon JB, Lefler JS, *et al.* Short-term elevation of fine particulate matter air pollution and acute lower respiratory infection. *Am J Respir Crit Care Med* [Internet]. 2018 Sep 15 [cited 2024 Dec 23];198(6):759-66. Available from: www.atsjournals.org.
- 38) Anderson HR, Favarato G, Atkinson RW. Long-term exposure to air pollution and the incidence of asthma: Meta-analysis of cohort studies. *Air Qual Atmos Health* [Internet]. 2013 Mar 1 [cited 2024 Dec 23];6(1):47-56. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11869-011-0144-5>

- 39) Faustini A, Rapp R, Forastiere F. Nitrogen dioxide and mortality: review and meta-analysis of long-term studies. *European Respiratory Journal* [Internet]. 2014 Aug 31 [cited 2024 Dec 23];44(3):744-53. Available from: <https://publications.ersnet.org/content/erj/44/3/744>
- 40) Chen J, Hoek G. Long-term exposure to PM and all-cause and cause-specific mortality: A systematic review and meta-analysis. *Environ Int*. 2020 Oct 1;143:105974.
- 41) Xie J, Teng J, Fan Y, Xie R, Shen A. The short-term effects of air pollutants on hospitalizations for respiratory disease in Hefei, China. *Int J Biometeorol* [Internet]. 2019 Mar 15 [cited 2024 Dec 23];63(3):315-26. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00484-018-01665-y>
- 42) Giles L V., Barn P, Künzli N, Romieu I, Mittleman MA, van Eeden S, et al. From Good Intentions to Proven Interventions: Effectiveness of Actions to Reduce the Health Impacts of Air Pollution. *Environ Health Perspect* [Internet]. 2011 Jan 1 [cited 2024 Dec 23];119(1):29-36. Available from: <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/10.1289/ehp.1002246>