



Contaminación ambiental: Más allá de la salud

Rocío Valdebenito, PhD en Economía Aplicada, University of Illinois Urbana-Champaign. Académica Facultad de Economía y Negocios, UAH y Verónica Vienne, PhD en Economía, University of Manchester. Senior Lecturer in Economics, University of Huddersfield, Reino Unido.



Durante décadas, la contaminación del aire ha sido vista principalmente como un problema de salud pública. La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que la exposición a niveles peligrosos de contaminación provoca alrededor de siete millones de muertes prematuras cada año en el mundo. Sus consecuencias más conocidas incluyen enfermedades respiratorias, cardiovasculares y hospitalizaciones (Brunekreef & Holgate, 2002; Salvi, 2007; Deryugina et al., 2019). Sin embargo, en los últimos años, la literatura ha comenzado a revelar otra cara menos visible de este fenómeno: la contaminación atmosférica también puede deteriorar el

aprendizaje, la productividad y el desarrollo cognitivo, es decir, el aire contaminado no solo tiene efectos en nuestra salud, sino que también impacta en la forma en que pensamos, aprendemos y tomamos decisiones.

La contaminación atmosférica está compuesta por una mezcla de gases—como monóxido de carbono, ozono y óxidos de nitrógeno— y partículas sólidas o líquidas en suspensión, conocidas como material particulado (PM). Entre estas partículas, la medición más dañina se conoce como PM2.5, que son partículas cuyo diámetro es inferior a 2,5 micrómetros. Su pequeño tamaño les

permite penetrar profundamente en el sistema respiratorio e incluso llegar al torrente sanguíneo. Numerosos estudios han mostrado que la exposición a estas partículas puede generar inflamación pulmonar, alterar la presión arterial y afectar el ritmo cardíaco. Más recientemente, investigaciones en neurociencia han evidenciado que la contaminación también puede causar neuroinflamación y estrés oxidativo en el cerebro, reduciendo la memoria de corto plazo, la atención y otras funciones cognitivas (Calderón-Garcidueñas et al., 2014; Underwood, 2017). Estos efectos fisiológicos y neurológicos pueden traducirse en consecuencias significativas para el desempeño escolar y académico.

Una creciente literatura empírica ha comenzado a documentar esta relación. Ebenstein et al. (2016), utilizando datos de Israel, encuentran que un aumento de una desviación estándar en las concentraciones de PM_{2.5} durante el día de un examen redu-

versitario en aproximadamente 8% de una desviación estándar.

En conjunto, estos estudios demuestran que incluso exposiciones breves a contaminación atmosférica pueden deteriorar el rendimiento cognitivo de los estudiantes. No se trata de casos extremos de contaminación crónica, sino de fluctuaciones diarias o semanales que afectan la concentración y el desempeño. Si un día de mala calidad del aire puede reducir significativamente los resultados de una evaluación, es razonable pensar que la exposición acumulada a lo largo de un año escolar—o de una infancia entera—puede tener efectos más duraderos sobre la formación de capital humano.

Una preocupación creciente en esta literatura es si los efectos de corto plazo—como la baja en el puntaje de un examen o la ausencia escolar—se traducen en consecuencias de largo plazo sobre el capital humano. Diversas investigaciones apuntan

Los resultados descritos adquieren particular relevancia en países menos desarrollados o con altos índices de desigualdad. En estos países, la calidad del aire suele ser peor, las familias tienen menos recursos para mitigar los efectos de la contaminación—como el uso de filtros de aire o mejores sistemas de calefacción—, sino que también la capacidad gubernamental para mitigar estos efectos es más limitada (Aguilar-Gómez & Rivera, 2025; Greenstone & Jack, 2015). La desigualdad ambiental se convierte así en una forma más de desigualdad educativa. Los niños que viven en entornos más vulnerables no solo enfrentan escuelas con menos recursos, sino que también están expuestos a peores índices de calidad del aire. Carneiro et al. (2021) muestran que, en Brasil, los efectos negativos de la contaminación son mayores entre los estudiantes de menor nivel socioeconómico y entre aquellos con peores desempeños iniciales, lo que sugiere que la contaminación amplifica las brechas preexistentes.

En América Latina, y particularmente en Chile, la evidencia sobre este vínculo sigue siendo limitada, a pesar de que el país enfrenta uno de los problemas de contaminación más severos de la región. Según el Ministerio del Medio Ambiente (MMA, 2021), varias ciudades chilenas—como Coyhaique, Osorno y Linares—superan ampliamente los estándares nacionales y las recomendaciones de la OMS. Coyhaique, de hecho, es reconocida como la ciudad más contaminada de América Latina. Aunque los niveles de PM_{2.5} en Santiago han disminuido cerca de un 70% desde fines de los años ochenta (Jorquera, 2020), todavía se ubican por encima de los límites establecidos por la normativa chilena. Las fuentes principales de contaminación varían por región: en la capital predominan el transporte y la industria, mientras que en el sur del país la calefacción a leña es el principal responsable de la mala calidad del aire. Adicionalmente, los niveles de contaminación suelen variar sustancialmente durante el año, siendo los meses de invierno los de mayor contaminación ambiental, particularmente en la zona central del país. La



Si la contaminación del aire deteriora el aprendizaje, la asistencia y las trayectorias educativas, entonces las políticas ambientales y las políticas educativas no pueden pensarse por separado”

ce los puntajes en un 1,7% de una desviación estándar. En Canadá, Cook et al. (2023) muestran que incluso en un entorno de baja contaminación como Ottawa, un incremento de solo 1 microgramo por metro cúbico en PM_{2.5} reduce los resultados de exámenes universitarios en un 9% de una desviación estándar. Resultados similares se observan en contextos más contaminados: Graff Zivin et al. (2020) muestran que los incendios agrícolas en China, que elevan temporalmente las concentraciones de PM_{2.5}, reducen los puntajes de los exámenes nacionales en 4,6% de una desviación estándar. En Brasil, Carneiro et al. (2021) hallan que un aumento de 10 microgramos por metro cúbico de PM₁₀ durante los días de evaluación disminuye los resultados de los exámenes de ingreso uni-

a que sí. Persico (2022), utilizando datos de Estados Unidos, encuentra que los niños expuestos a contaminación industrial tienen menor probabilidad de completar la educación secundaria y mayores tasas de pobreza en la adultez. En China, Chen (2025) muestra que la exposición infantil a las emisiones de plantas siderúrgicas redujo la educación alcanzada en 0,11 años en promedio. Ebenstein et al. (2016) también muestra que, diez años después de la exposición, los efectos negativos sobre la educación y los ingresos persisten entre los jóvenes israelíes. Estos hallazgos refuerzan la idea de que la contaminación del aire no solo genera pérdidas inmediatas en el desempeño, sino que puede alterar trayectorias de vida completas.

Figura 1: PM2.5 agosto 2020
Datos Satelitales (Shen et al. 2024)

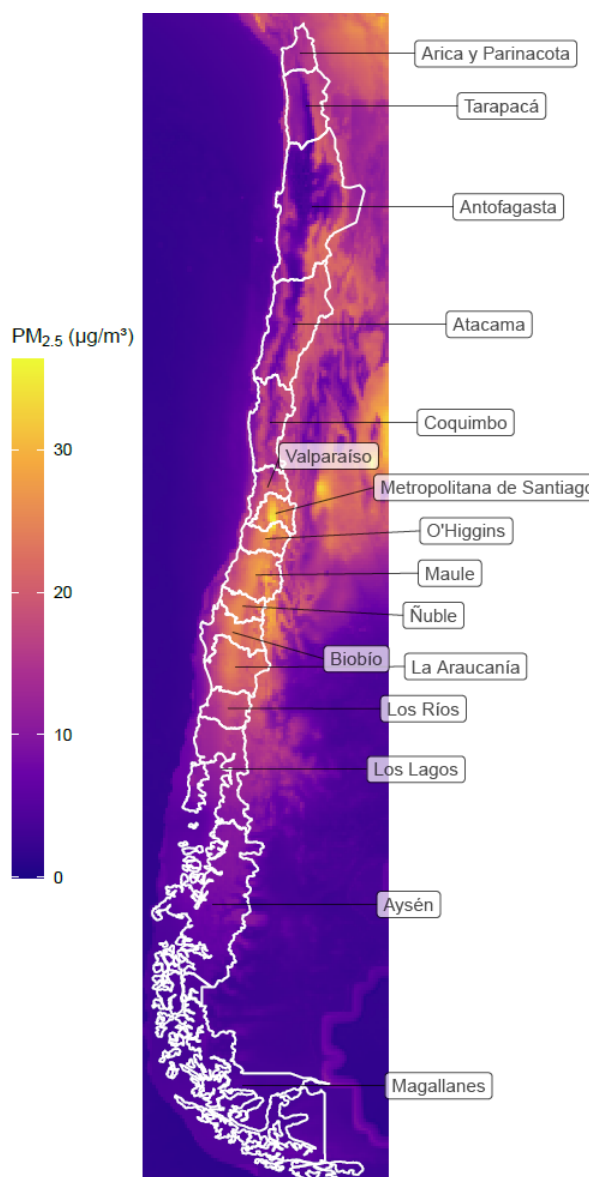


figura 1 muestra datos de imágenes satelitales de la concentración promedio de PM2.5 durante el mes de agosto de 2020, la cual muestra niveles sobre $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la zona centro-sur en relación con el resto del territorio nacional.

A pesar de contar con una red de monitoreo ambiental robusta, el país tiene muy pocos estudios que vinculen directamente la contaminación con resultados educativos. Bharadwaj et al. (2017) mostraron que la exposición prenatal a mayores niveles de monóxido de carbono en Santiago se asocia

con peores resultados en pruebas estandarizadas de cuarto básico. Miller y Vela (2013) analizaron tres regiones del país y encontraron que aumentos en la concentración de PM10 reducen los puntajes de matemáticas, con efectos más pronunciados en los niveles más altos de contaminación. Más recientemente, Hofflinger et al. (2025) analizaron datos de once municipios del centro y sur de Chile y concluyeron que una mayor proporción de días que superan los estándares de calidad del aire se asocia con menores promedios de notas. Si bien estos trabajos son pioneros, sus limitaciones en cobertura

geográfica y temporal impiden generalizar los resultados a nivel nacional, lo que deja abierta una agenda de investigación pendiente.

Además de la limitada evidencia, existe el desafío metodológico de identificar con precisión el efecto causal de la contaminación sobre la educación. Las personas no eligen su lugar de residencia al azar: quienes tienen mayores ingresos suelen vivir en zonas más limpias y con mejores escuelas, lo que complica distinguir los efectos de la contaminación de otros factores socioeco-

nómicos. Por ello, los investigadores han recurrido a estrategias cuasi-experimentales que aprovechan variaciones exógenas en la calidad del aire, como los cambios en la dirección del viento (Deryugina et al., 2019) o los episodios de inversión térmica que atrapan los contaminantes cerca del suelo (Dechezleprêtre et al., 2019). En Chile, algunos trabajos recientes han aplicado enfoques similares para estudiar efectos en salud, utilizando incendios forestales o patrones de viento como fuentes de variación (Arrizaga et al., 2023; Rivera et al., 2024), aunque aún no se ha extendido esta metodología al ámbito educativo.

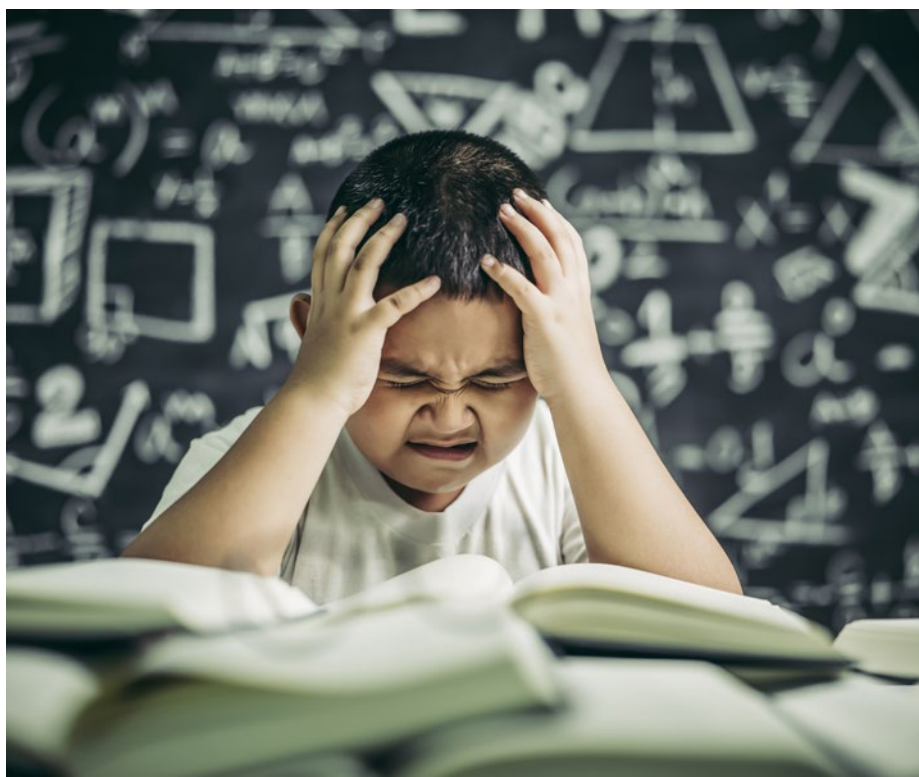
En este contexto, y en conjunto con un grupo de investigadores, nos encontramos desarrollando un proyecto de investigación¹, el cual busca contribuir al desarrollo de evidencia científica en esta materia. En una primera etapa preliminar del proyecto, analizamos a la cohorte completa de alumnos en Chile desde cuarto básico que se gradúan de cuarto medio en 2019. Para cada alumno, encontramos su exposición a PM2.5 en cada mes escolar durante toda esta trayectoria educativa, y analizamos cómo afecta el

PM2.5 a la asistencia escolar y resultados en pruebas estandarizadas como el SIMCE. Analizamos diversas medidas de PM2.5, como el promedio mensual y el número de días sobre el umbral de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, lo que busca medir efectos no-lineales de la contaminación. Además, utilizamos una metodología que busca abordar los desafíos metodológicos descritos con anterioridad, donde aislar efectos causales es complejo. Para ello, nos enfocamos en fenómenos atmosféricos aleatorios que nos permiten encontrar variaciones no predecibles de los niveles de contaminación. Los resultados preliminares muestran que una mayor exposición a PM2.5 está asociada a menores tasas de asistencia mensual, y que existe una reducción significativa en los puntajes SIMCE de cuarto básico, tanto en lenguaje como en matemáticas. Las siguientes etapas del proyecto buscan encadenar estos efectos con un análisis de largo plazo, como lo es el acceso a la educación superior, las tasas de empleabilidad y salarios laborales.

Si la contaminación del aire deteriora el aprendizaje, la asistencia y las trayectorias educativas, entonces las políticas ambien-

tales y las políticas educativas no pueden pensarse por separado. Los esfuerzos por mejorar la calidad del aire tienen beneficios que van mucho más allá de la salud: pueden incrementar el potencial de aprendizaje de toda una generación. En regiones del sur del país, donde la contaminación por calefacción a leña alcanza niveles críticos, invertir en programas de calefacción limpia y eficiencia energética no solo mejora la salud pública, sino también la generación de capital humano. Del mismo modo, la implementación de protocolos escolares ante episodios de contaminación —como sistemas de ventilación controlada y filtros de aire— puede mitigar parte de los daños sobre el proceso de aprendizaje.

En conclusión, la evidencia disponible muestra que respirar aire contaminado afecta la capacidad de aprender. Los efectos pueden parecer pequeños en el corto plazo, pero acumulados a lo largo del tiempo representan pérdidas sustanciales en capital humano. En los países desarrollados, esta relación ha sido ampliamente documentada. En los países en desarrollo, en cambio, la falta de datos y de estudios sistemáticos limita la acción pública y mantiene invisibles los costos educativos de la contaminación. Incorporar la dimensión ambiental en la agenda educativa no es una cuestión secundaria, sino una condición necesaria para garantizar igualdad de oportunidades. El aire que respiramos en las escuelas, los hogares y las ciudades no es un factor neutro: forma parte del entorno de aprendizaje. En tiempos en que se discute la calidad y equidad de la educación, reconocer el rol del entorno puede abrir un nuevo horizonte de políticas que combinen salud, educación y justicia ambiental. **OE**



Referencias

- Aguilar-Gómez, S., & Rivera, N. M. (2025). Air Pollution in the Global South: An Overview of Its Sources and Impacts. En *Oxford Research Encyclopedia of Economics and Finance*.
- Arrizaga, R., Clarke, D., Cubillos, P. P., & Ruiz-Tagle V., C. (2023). *Wildfires and Human Health: Evidence from 15 Wildfire Seasons in Chile*. Inter-American Development Bank.
- Bharadwaj, P., Gibson, M., Zivin, J. G., & Neilson, C. (2017). Gray Matters: Fetal Pollution Exposure and Human Capital Formation. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 4(2), 505-542.
- Brunekreef, B., & Holgate, S. T. (2002). Air pollution and health. *The Lancet*, 360(9341), 1233-1242.
- Calderón-Garcidueñas, L., Torres-Jardón, R., Kulesza, R. J., Park, S.-B., & D'Angiulli, A. (2014). Air pollution and detrimental effects on children's brain. The need for a multidisciplinary approach to the issue complexity and challenges. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8.
- Carneiro, J., Cole, M. A., & Strobl, E. (2021). The Effects of Air Pollution on Students' Cognitive Performance: Evidence from Brazilian University Entrance Tests. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 8(6), 1051-1244.
- Chen, P. (2025). Industrialization and pollution: The long-term Impact of early-life exposure on human capital formation. *Journal of Public Economics*, 241, 105270.
- Cook, N., Heyes, A., & Rivers, N. (2023). Clean Air and Cognitive Productivity: Effect and Adaptation. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 10(5), 1265-1308.
- Dechezleprêtre, A., Rivers, N., & Balazs, S. (2019). The economic cost of air pollution: Evidence from Europe (OECD Economics Department Working Papers No. 1584; OECD Economics Department Working Papers, Vol. 1584).
- Deryugina, T., Heutel, G., Miller, N. H., Molitor, D., & Reif, J. (2019). The Mortality and Medical Costs of Air Pollution: Evidence from Changes in Wind Direction. *American Economic Review*, 109(12), 4178-4219.
- Ebenstein, A., Lavy, V., & Roth, S. (2016). The Long-Run Economic Consequences of High-Stakes Examinations: Evidence from Transitory Variation in Pollution. *American Economic Journal: Applied Economics*, 8(4), 36-65.
- Graff Zivin, J., Liu, T., Song, Y., Tang, Q., & Zhang, P. (2020). The unintended impacts of agricultural fires: Human capital in China. *Journal of Development Economics*, 147, 102560.
- Greenstone, M., & Jack, B. K. (2015). Envirodevonomics: A Research Agenda for an Emerging Field. *Journal of Economic Literature*, 53(1), 5-42.
- Hofflinger, Á., Boso, Á., Álvarez, B., & Garrido, J. (2025). Breathing dirty air, struggling in school: The case of air pollution and Student Learning in Chile. *Population and Environment*, 47(1), 2.
- Jorquera, H. (2020). Ambient particulate matter in Santiago, Chile: 1989-2018: A tale of two size fractions. *Journal of Environmental Management*, 258, 110035.
- Miller, S. J., & Vela, M. A. (2013). The Effects of Air Pollution on Educational Outcomes: Evidence from Chile. IDB Working Paper, 468.
- Persico, C. (2022). Can Pollution Cause Poverty? The Effects of Pollution on Educational, Health and Economic Outcomes. NBER Working Paper, No. 30559.
- Rivera, N. M., Ruiz-Tagle, J. C., & Spiller, E. (2024). The health benefits of solar power generation: Evidence from Chile. *Journal of Environmental Economics and Management*, 126, 102999.
- Salvi, S. (2007). Health effects of ambient air pollution in children. *Paediatric Respiratory Reviews*, 8(4), 275-280.
- Shen, S., Li, C., Van Donkelaar, A., Jacobs, N., Wang, C., & Martin, R. V. (2024). Enhancing Global Estimation of Fine Particulate Matter Concentrations by Including Geophysical a Priori Information in Deep Learning. *ACS ES&T Air*, 1(5), 332-345.
- Underwood, E. (2017). The polluted brain. *Science*, 355(6323), 342-345.