



FACULTAD DE MEDICINA “HIPÓLITO UNANUE”

ÁREAS VERDES E INFECCIÓN RESPIRATORIA EN NIÑOS:  
ESTUDIO ECOLÓGICO EN LOS DISTRITOS DE LIMA, PERÚ

Línea de Investigación:

Salud Pública

Tesis para optar el Título Profesional de Médico Cirujano

Autor

Peralta Chiguala, Christopher Ichiro

Asesor

Del Aguila Villar, Carlos Manuel  
(ORCID: 0000-0002-5345-5995)

Jurado

Moloch Arango, Luis Alberto  
Luna Victorio, Laura Esther  
López Gabriel, Wilfredo Gerardo

Lima – Perú

2023

## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b>	<b>4</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>5</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN</b>	<b>6</b>
1.1. Descripción del problema	8
1.2. Formulación del problema	10
1.2.1. <i>Problema general</i>	10
1.2.2. <i>Problemas específicos</i>	10
1.3. Antecedentes	11
1.3.1. <i>Internacionales</i>	11
1.3.2. <i>Nacionales</i>	21
1.4. Objetivos	22
1.4.1. <i>Objetivo general</i>	22
1.4.2. <i>Objetivos específicos</i>	22
1.5. Justificación	22
1.6. Hipótesis	23
<b>II. MARCO TEÓRICO</b>	<b>24</b>
2.1. Bases teóricas sobre el tema de investigación	24
2.1.1. <i>Áreas verdes</i>	24
2.1.2. <i>Infección aguda de las vías respiratorias</i>	25
2.1.3. <i>MP<sub>2.5</sub></i>	27
2.1.4. <i>MP<sub>2.5</sub> e infección respiratoria</i>	27
2.1.5. <i>Áreas verdes e infección respiratoria</i>	29
<b>III. MÉTODO</b>	<b>32</b>
3.1. Tipo de investigación	32
3.2. Ámbito temporal y espacial	33
3.3. Variables	35
3.3.1. <i>Desenlace</i>	35
3.3.2. <i>Exposición</i>	35
3.3.3. <i>Covariables</i>	35

3.4.	Población y muestra	36
3.5.	Instrumentos	36
3.6.	Procedimientos	41
3.7.	Análisis de datos	44
3.7.1.	<i>Análisis espacial</i>	44
3.7.2.	<i>Análisis estadístico</i>	44
3.8.	Consideraciones éticas	45
<b>IV.</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>46</b>
4.1.	Riesgo de infecciones respiratorias agudas a nivel distrital	46
4.2.	Cobertura de áreas verdes a nivel distrital	49
4.3.	Dependencia espacial general	52
4.4.	Patrones locales y áreas de alto riesgo	57
4.5.	Coocurrencia de clústers	60
4.6.	Índice de inequidad	61
4.7.	Análisis bivariado	61
4.8.	Modelo de efectos mixtos	63
<b>V.</b>	<b>DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>	<b>64</b>
<b>VI.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>68</b>
<b>VII.</b>	<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>69</b>
<b>VIII.</b>	<b>REFERENCIAS</b>	<b>70</b>
<b>IX.</b>	<b>ANEXOS</b>	<b>86</b>
9.1.	Anexo A. Matriz de consistencia	86
9.2.	Anexo B. Operacionalización de variables	87
9.3.	Anexo C. Diagrama causal de las variables estudiadas	88

## RESUMEN

**Objetivo:** Evaluar la asociación entre la cobertura de áreas verdes a nivel distrital y el riesgo de infecciones respiratorias agudas (IRA) en niños menores de cinco años. **Método:** Estudio ecológico de cohorte basado en un análisis secundario de datos en Lima, Perú entre 2017 y 2019. Se calculó la incidencia anual acumulada de IRA y el índice de vegetación de diferencia normalizada. La dependencia espacial se examinó mediante las pruebas  $I$  global de Moran y  $G_i^*$  local de Getis-Ord, y la correlación se evaluó con la prueba  $W$  de Kendall. El riesgo relativo (RR) se determinó usando un modelo lineal generalizado de efectos mixtos. **Resultados:** Los datos mostraron una distribución desigual de los casos de IRA, con un riesgo menor en los distritos del centro-oeste de Lima. Se observó una fuerte correlación entre los casos de IRA y factores como la pobreza, la concentración de  $MP_{2.5}$  y la densidad poblacional. Además, se detectó una correlación moderada con la presencia de áreas verdes. Según el modelo de efectos mixtos, los distritos con una extensa cobertura de áreas verdes ( $\geq 10$  % de la superficie distrital) mostraron un menor riesgo de IRA (RR: 0.51, IC 95 %: 0.30 – 0.85). **Conclusiones:** Los resultados indican que una mayor cobertura de áreas verdes en un distrito se asocia con un menor riesgo de IRA en niños menores de cinco años. Este estudio subraya la importancia de las áreas verdes en la promoción de la salud infantil. Se recomienda investigaciones adicionales para informar la planificación y reestructuración eficaz de las áreas verdes urbanas en Lima.

*Palabras clave:* áreas verdes, infecciones respiratorias agudas, estudio ecológico de cohorte, salud infantil, planificación urbana, Perú

## ABSTRACT

**Objective:** To evaluate the association between district-level green space coverage and the risk of acute respiratory infections (ARI) in children under five years old. **Method:** Ecological cohort study conducted in Lima, Peru and based on a secondary data analysis between 2017 and 2019. The annual cumulative incidence of ARI and the normalized difference vegetation index were calculated. Spatial dependence was examined using Moran's I global test and Getis-Ord  $G_i^*$  local test, and correlation was assessed with the Kendall's W test. The relative risk (RR) was determined using a generalized linear mixed-effects model. **Results:** The data showed an uneven distribution of ARI cases, with a lower risk in the central-west districts of Lima. A strong correlation was observed between ARI cases and factors such as poverty,  $PM_{2.5}$  concentration, and population density. In addition, a moderate correlation with the presence of green spaces was detected. According to the mixed-effects model, districts with extensive green space coverage ( $\geq 10\%$  of the district surface) showed a lower risk of ARI (RR: 0.51, 95% CI: 0.30-0.85). **Conclusions:** The results indicate that greater green space coverage in a district is associated with a lower risk of ARI in children under five years old. This study underscores the importance of green spaces in promoting child health. Further research is recommended to inform the effective planning and restructuring of urban green spaces in Lima.

*Keywords:* green spaces; acute respiratory infections; ecological cohort study; child health; urban planning; Peru.

## I. INTRODUCCIÓN

Las infecciones respiratorias siguen siendo un problema prioritario para la salud pública, con altas tasas de mortalidad en el mundo (Roth et al., 2018). La carga de infecciones respiratorias repercute principalmente en población vulnerable, más aún si residen en países en desarrollo (Troeger et al., 2020). A nivel mundial, la mortalidad atribuible a infecciones respiratorias en niños menores de cinco años se estima en 118.9 por cada 100 000 habitantes, presentando una reducción de 67.2 % entre 1990 y 2017 (Troeger et al., 2020). Las estimaciones de la carga de infecciones respiratorias varían notablemente entre regiones. Por ejemplo, África registra incidencias similares a Europa y Asia, pero tiene una mortalidad hasta cien veces mayor (338 frente a 3 casos por 100 000 niños). En Perú, esta cifra es menor que la del promedio mundial (58 casos por 100 000 niños), pero se mantiene como una de las más altas en Latinoamérica (Roth et al., 2018).

Aunque los virus son los microorganismos más frecuentes en las infecciones respiratorias, las complicaciones en la población pediátrica suelen desencadenarse por sobreinfecciones bacterianas. En ese sentido, las intervenciones sanitarias deben prevenir toda posible secuela que medre la calidad de vida en la etapa infantil (Lovie-Toon et al., 2018). Este esfuerzo es claramente de interés internacional y se alinea con los objetivos de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (General Assembly of the United Nations, 2015; Marciniuk et al., 2017).

Históricamente, los factores de riesgo más importantes en las infecciones respiratorias han sido la desnutrición crónica infantil, la cobertura baja de vacunación o antibióticos, la contaminación por quema de combustibles sólidos y la contaminación por contaminantes aéreos (Smith et al., 2000; Troeger et al., 2020). Este último factor ha suscitado mayor interés en las últimas décadas, principalmente por su relación con la expansión urbana (Horne et al., 2018;

Romieu et al., 2002). Se ha observado que la inhalación de partículas finas  $\leq 2.5$  micrómetros de diámetro ( $MP_{2.5}$ ) aumenta la probabilidad de desarrollar infecciones respiratorias en un 15 % (Horne et al., 2018). También se ha evidenciado que, por cada  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de exposición diaria a  $MP_{2.5}$ , la tasa de hospitalizaciones por infecciones respiratorias aumenta en un 0.31 % (Tian et al., 2019).

Este escenario sugiere que la contaminación del aire repercute en la salud respiratoria de la población general, especialmente en los niños (Grigg, 2018; Horne et al., 2018). La Organización Mundial de la Salud (OMS) elaboró en 2008 un informe sobre los niveles sanitariamente aceptables de material particulado como un esfuerzo para combatir la contaminación aérea (Krzyzanowski y Cohen, 2008). Sin embargo, los estudios de intervención para reducir la concentración de partículas finas, además de ser escasos, heterogéneos y con resultados ambiguos, no han incluido a población pediátrica (Burns et al., 2019, 2020). Lo poco que se ha estudiado está en relación con la reducción de las emisiones industriales, vehiculares y residenciales (Burns et al., 2020).

Las áreas verdes han emergido recientemente como un tema de interés global debido a su potencial para mitigar la contaminación del aire (McDonald et al., 2016). Las investigaciones se han enfocado en examinar un efecto preventivo en una variedad de condiciones crónicas, entre ellas las enfermedades cardiovasculares, la diabetes, los trastornos mentales, el asma y la bronquitis crónica (Lambert et al., 2018; Rojas-Rueda et al., 2019). Respecto a la salud respiratoria en los niños, se ha estudiado su relación con enfermedades de origen alérgico (Lambert et al., 2017). No obstante, aún se desconoce si las áreas verdes pueden desempeñar un papel protector frente a las infecciones respiratorias. El conocimiento sobre esta cuestión es todavía emergente, y se requiere de investigaciones que vayan más allá de la población general (Shen y Lung, 2017).

## 1.1. Descripción del problema

Respirar aire limpio es un derecho inherente a la salud (Brunekreef et al., 2012). Sin embargo, en distintas regiones del mundo, la exposición a sustancias nocivas como la materia particulada, compuestos nitrogenados y ozono es alarmantemente alta (Marciniuk et al., 2017). Dichos contaminantes aumentan en la atmósfera debido al crecimiento de la industria, la expansión del parque automotor, la agricultura y la densidad poblacional. Esto lleva a un incremento de enfermedades y reducción de la expectativa de vida (Gouveia et al., 2018). La problemática ha llevado a un crecimiento en la mortalidad por contaminación atmosférica que ha alcanzado niveles alarmantes en los últimos años (Fuller et al., 2022). Por ello, resulta imprescindible la formulación de políticas para reducir la desigualdad en la salud respiratoria.

Dentro de las medidas de desarrollo sostenible se encuentra la creación de entornos urbanos más saludables (Burns et al., 2020), donde las áreas verdes asumen un rol fundamental (Diener y Mudu, 2021). Aunque diversos estudios muestran que la exposición a áreas verdes previene el desarrollo de enfermedades respiratorias (Mueller et al., 2022), estas investigaciones se realizan entornos geográficos heterogéneos y con distintas formas de medición. Esto ha dificultado determinar cuánta cobertura o qué tipo de distribución de áreas verdes sería la más adecuada para la planificación urbana (Mueller et al., 2022).

Aunque un consenso europeo sugiere parámetros específicos para el diseño de áreas verdes (WHO Regional Office for Europe, 2017), estos están basados principalmente en estudios que asocian las áreas verdes con la salud mental, metabólica o cardiovascular. No se dispone aún de información consistente sobre la cantidad de áreas verdes necesaria para prevenir infecciones respiratorias.

Además, la investigación sobre áreas verdes y salud respiratoria es aún incipiente en países de ingresos medios y bajos, que presentan mayor riesgo de morbilidad (Rojas-Rueda et al., 2019). Por ello, es necesario construir evidencia local considerando la particularidad de la geografía y los datos disponibles.

En este contexto, el presente estudio se enfoca en los niños menores de cinco años que viven en Lima entre 2017 y 2019, un período durante el cual se notificaron aproximadamente 1 500 000 casos de infecciones respiratorias agudas en este grupo etario (Centro Nacional de Epidemiología, Prevención y Control de Enfermedades, 2023). Estas infecciones son una de las principales causas de morbilidad en el mundo y pueden tener un impacto negativo en el desarrollo físico y cognitivo de los niños, así como un impacto económico significativo en las familias y en el sistema de salud.

En Lima, la desigualdad socioeconómica es una realidad persistente y endémica. Esta desigualdad se refleja en la división geográfica de la ciudad, con distritos más acomodados y con mayores servicios en contraste con aquellos que enfrentan precariedad y falta de oportunidades. Esta disparidad socioeconómica puede tener graves consecuencias en el riesgo de infecciones respiratorias en la población infantil, derivadas del acceso limitado a atención médica, viviendas insalubres, nutrición inadecuada, contaminación ambiental y estrés psicológico en el entorno familiar.

Varias medidas se han implementado en Lima para reducir el riesgo de infecciones respiratorias en niños menores de cinco años, incluyendo campañas de vacunación, mejoras en la calidad del aire, programas de educación para promover hábitos de higiene, mejoras en el acceso a atención médica y programas de mejora de la vivienda. A pesar de la eficacia de estas medidas, los distritos más desfavorecidos aún presentan altas incidencias de infecciones respiratorias en

niños, evidenciando que aún hay un largo camino por recorrer para abordar completamente este problema de salud en un entorno marcado por la desigualdad socioeconómica.

Ante la falta de evidencia en Perú, esta investigación sugiere que las áreas verdes podrían desempeñar un papel crucial en la protección de los niños contra infecciones respiratorias, especialmente en los distritos vulnerables de Lima. Dado el patrón de desigualdad socioeconómica observado en la distribución de las áreas verdes, se identifica la necesidad de investigar si una mayor cobertura de estas áreas puede ser una estrategia eficaz para reducir el riesgo de infecciones respiratorias agudas en niños menores de cinco años.

## **1.2. Formulación del problema**

### ***1.2.1. Problema general***

¿Los distritos con extensa cobertura de áreas verdes tienen un menor riesgo de infecciones respiratorias agudas en niños menores de cinco años en los distritos de Lima, Perú?

### ***1.2.2. Problemas específicos***

- ¿Cuál es el riesgo de infecciones respiratorias agudas en niños en los distritos de Lima?
- ¿Cuánta cobertura de áreas verdes hay en los distritos de Lima?
- ¿Cuál es la relación espaciotemporal entre el riesgo de infecciones respiratorias agudas, la cobertura de áreas verdes y la concentración promedio de  $MP_{2.5}$  en los distritos de Lima?
- ¿Qué áreas presentan un alto riesgo de infecciones respiratorias agudas, baja cobertura de áreas verdes y altas concentraciones de  $MP_{2.5}$  en los distritos de Lima?

### **1.3. Antecedentes**

La relación entre la cobertura de áreas verdes y el riesgo de infecciones respiratorias agudas aún no se encuentra claramente definida. Es de conocimiento común que las plantas interactúan con los contaminantes atmosféricos, la microbiota y la temperatura ambiental debido a sus características fisiológicas. A pesar de esto, la mayoría de los estudios han centrado su atención en otras afecciones respiratorias, como el asma y la rinitis. Sin embargo, el nivel de evidencia existente es limitado y se basa en gran medida en estudios exploratorios.

Un avance reciente en este campo es la publicación de estudios epidemiológicos que hacen uso de datos geospaciales, lo que permite la creación de diseños de estudios ecológicos más sofisticados y precisos. Diversos estudios respaldan el papel protector de las áreas verdes en relación a la mortalidad respiratoria (Bonyadi et al., 2016; Dehghan et al., 2018; Jennings et al., 2019; Mueller et al., 2022; Sicard et al., 2019). Sin embargo, estos hallazgos presentan limitaciones, ya que los datos agregados no permiten discernir la etiología específica de las enfermedades respiratorias.

En lo que sigue, se describirán los estudios que han enfocado su investigación en la asociación específica entre las áreas verdes y las infecciones respiratorias.

#### ***1.3.1. Internacionales***

Li et al. (2019) realizaron el estudio *Effect of Residential Greenness and Nearby Parks on Respiratory and Allergic Diseases among Middle School Adolescents in a Chinese City*. El objetivo del estudio fue investigar cómo el verdor alrededor de las residencias y la cercanía a los parques afectan a la salud respiratoria en adolescentes en una ciudad china. Se realizó un estudio transversal en 5 643 estudiantes de colegios en Suzhou, China. Se midió el verdor mediante el

NDVI con datos de Landsat a 30 m de resolución espacial, y se recopiló datos sobre distancias de parques urbanos. Se calculó el NDVI promedio con imágenes de marzo, junio, octubre y diciembre de 2014, con *buffers* residenciales a 100 m, 200 m, 500 m y 1000 m. Las distancias de los parques fueron clasificados según sus cuartiles de distribución. El desenlace fue la prevalencia de neumonía, calculado en base al autorreporte de haber sido diagnosticado por un médico. Se incluyeron como covariables la edad, sexo, nivel en hogar de humo de tabaco ambiental, educación de los padres, historia de padres de asma, contaminación aérea, mascotas en casa y presencia de humedad y moho. Se obtuvieron *odds ratios* (OR) comparando los incrementos del rango intercuartílico en el NDVI y la diferencia entre el cuartil Q4 y Q1 de las distancias del hogar al parque. Se observó un menor *odds* de neumonía en *buffers* a 200 m, sin significancia estadística (OR: 0.95, IC 95 %: 0.87-1.05). El *odds* de neumonía fue también menor, pero no significativo, en hogares con los parques más cercanos (OR: 0.92, IC 95 %: 0.74-1.15). En conclusión, los resultados muestran una tendencia a favor de que la cercanía a parques y el nivel de verdor residencial protegen la salud respiratoria de los adolescentes. La cercanía a los parques podría ser un factor más importante que la cantidad de verdor alrededor de la residencia.

Squillaciotti et al. (2020) realizaron el estudio *Greenness Availability and Respiratory Health in a Population of Urbanised Children in North-Western Italy*. El objetivo del estudio fue investigar la relación entre la disponibilidad de espacios verdes y la salud respiratoria en una población de niños en el norte de Italia. Se realizó un estudio transversal en 187 niños de 10 a 13 años de edad en Turín. Se calculó el NDVI con datos de verdor de imágenes Landsat a una resolución de 30 m. Se definió el NDVI promedio en un *buffer* residencial de 300 m. El desenlace fue el autorreporte de haber tenido bronquitis. Las covariables incluidas fueron la presencia de contaminantes aéreos, edad, sexo, índice de masa corporal y presencia de niveles de cotinina en

orina. Se encontró que una mayor exposición (tercer tercil frente a primer tercil) al NDVI se asoció aun menor *odds* de bronquitis (OR: 0.14, IC 95 %: 0.05-0.45). En conclusión, este estudio mostró un efecto positivo de la presencia de verdor en una zona específica de Italia.

Tischer et al. (2017) realizaron el estudio *Urban green and grey space in relation to respiratory health in children*. El objetivo del estudio fue evaluar el efecto de dos índices de entorno urbano sobre las infecciones respiratorias. Se estudió una cohorte de 2472 niños de cuatro años en Asturias, Gipuzkoa, Sabadell y Valencia, España, los cuales se agruparon en dos regiones: eurosiberiana y mediterránea. Se calculó el NDVI a partir de vegetación detectada por Landsat, y datos de uso del suelo verde proporcionado por Urban Atlas. Se construyó dos índices de entorno residencial caracterizados por el verdor del entorno residencial basado en el NDVI obtenido por satélite, y la proximidad residencial a espacios verdes a una distancia de 300 m basada en los patrones de uso del suelo urbano. Se recolectaron datos de bronquitis autorreportados por los padres. Las covariables fueron el sexo, educación materna, alergia materna, lactancia materna, animales domésticos en casa, tabaquismo materno durante el embarazo, tabaquismo pasivo, privación, contaminación atmosférica. Se calculó los OR de NDVI en un *buffer* de 300 m y de la distancia al espacio verde. Respecto a las comparaciones de NDVI, se observó un *odds* de bronquitis sin diferencia estadísticamente significativa (OR: 1.18, IC 95 %: 0.86-1.62). Tampoco hubo diferencias del estimado al estratificarse por región. Respecto a la distancia, no se observó una diferencia estadísticamente significativa en el *odds* de bronquitis en aquellos que residen con áreas verdes a una distancia menor de 300 m. Sin embargo, sí se evidenció una diferencia significativa en la región mediterránea (OR: 0.77, IC 95 %: 0.61-0.98). En conclusión, la proximidad residencial a espacios verdes podría tener un efecto preventivo sobre la bronquitis, pero se requeriría explicar mejor el efecto de las diferencias geográficas.

Maas et al. (2009) realizaron el estudio *Morbidity is related to a green living environment*. El objetivo del estudio fue evaluar la relación entre la morbilidad evaluada por los médicos y la presencia de espacios verdes en el entorno de las personas. Se realizó un estudio transversal en 345 143 personas en Países Bajos. Los datos de morbilidad proceden de historias clínicas electrónicas de 195 médicos de cabecera de 96 consultas. Se obtuvo datos de cobertura verde y se calculó el porcentaje de áreas verdes en un radio de 1-3 km alrededor del código postal de cada hogar. Los desenlaces fueron las prevalencias de infecciones de vías respiratorias altas, y del grupo bronquitis/bronquiolitis/neumonía. Se incluyeron como covariables la edad, sexo, nivel socioeconómico y nivel de urbanidad. Se calculó el OR por cada 10 % de incremento de espacio verde dentro de 1 km de distancia. Se observó que los *odds* de infecciones de vías respiratorias altas (OR: 0.97, IC 95 %: 0.96-0.98) y de bronquitis/bronquiolitis/neumonía (OR: 0.99, IC 95 %: 0.97-1.00) fueron menores por cada unidad de incremento de espacios verdes. En conclusión, este estudio apoya la influencia positiva de las áreas verdes sobre las infecciones respiratorias, y resalta la importancia de la cercanía de los espacios verdes en el hogar, para los niños y los grupos socioeconómicos más bajos.

Bernat et al. (2016) realizaron el estudio *The relation of forest and air pollution with human health in urban territories of Lithuania*. El objetivo del estudio fue evaluar la correlación entre la presencia de bosque y la salud humana en ocho zonas urbanas de Lituania. Se realizó un estudio ecológico en población general residente en ocho zonas urbanas de Lituania. Se recolectó datos de cobertura forestal, bosques recreativos y lejanía de los bosques, provenientes de registros nacionales. Se calculó el porcentaje (cobertura/lejanía) o hectáreas por 1 000 habitantes en zonas urbanas. El desenlace fue la incidencia de infecciones respiratorias agudas de vías superiores por 1 000, cuyos datos fueron obtenidos de un registro nacional entre 2004 y 2013. Se observó una

correlación significativa entre infecciones respiratorias y cobertura ( $r = 0.39$ ), lejanía ( $r = -0.26$ ) y presencia de bosque recreativo ( $r = -0.24$ ). En conclusión, la presencia de áreas verdes estuvo relacionada con una menor incidencia de infecciones respiratorias.

Prist et al. (2016) realizaron el estudio *Landscape, Environmental and Social Predictors of Hantavirus Risk in São Paulo, Brazil*. El objetivo del estudio fue determinar las asociaciones de la incidencia anual de síndrome respiratorio por hantavirus en Sao Paulo, Brasil, entre 1993 y 2012, con métricas de estructura del paisaje (proporción de cobertura de hábitat nativo, número de fragmentos de bosque, y proporción de área plantada con caña de azúcar). Se realizó un estudio ecológico en 645 municipios (población aproximada de 42 millones de personas) con población general de Sao Paulo, Brasil. Se obtuvo datos de cobertura vegetal nativa, y se calculó el porcentaje de cobertura vegetal y fragmentación (número de parches). Se elaboró modelos separados para los dos principales biomas de Sao Paulo: cerrado y bosque atlántico. El desenlace fue la proporción de casos de síndrome pulmonar por hantavirus (SPH). Las covariables fueron el índice de desarrollo humano, temperatura media anual, precipitación total anual y población rural masculina >14 años. Se observó que, en ambos biomas, el riesgo de hantavirus aumentó con la proporción de tierra cultivada para caña de azúcar. Solo en el bosque atlántico, la proporción de cubierta forestal mostró una relación positiva con el riesgo de hantavirus. En el bioma cerrado, se observó un débil efecto negativo de la cobertura del hábitat y los parches sobre el riesgo de hantavirus. En el bosque atlántico, se observó un efecto negativo marginal. Ambos resultados no fueron estadísticamente significativos. En conclusión, los factores paisajísticos y climáticos podrían reducir la incidencia del síndrome respiratorio por hantavirus.

Shen y Lung (2017) realizaron el estudio *Mediation pathways and effects of green structures on respiratory mortality via reducing air pollution*. El objetivo del estudio fue explorar

los efectos de las áreas verdes en la mortalidad respiratoria y sus posibles vías de mediación, a través de la temperatura y los contaminantes atmosféricos primarios y secundarios. Se realizó un estudio ecológico con datos de 48 distritos (población general) del área metropolitana de Taipei, Taiwán, en 2010. Los datos de la estructura de las áreas verdes se construyeron en la proporción de parches de espacios verdes, distancia media entre parches y densidad de parches. Los datos de mortalidad respiratoria se obtuvieron de la base de datos del Ministerio de Salud y Bienestar, y consistieron en datos de mortalidad por neumonía y enfermedades crónicas de las vías respiratorias inferiores. Las covariables fueron los contaminantes del aire y la temperatura media anual. Se usó un método de remuestreo por bootstrap para la simulación de 10 000 muestras. Los coeficientes del modelo de mínimos cuadrados parciales mostraron correlaciones negativas entre mortalidad respiratoria y el porcentaje del parche más grande (-0.131), y la proporción de paisaje (-0.010). La correlación fue positiva con respecto a la distancia entre parches (0.027) y la presencia de fragmentación (0.112). Cabe destacar que los espacios verdes se midieron usando indicadores de métricas de paisaje, con fines de planificación urbana. Los más importantes fueron la proporción del «parche» (definido como una porción de superficie) más extenso, la proporción de paisaje, el nivel de agregación, la distancia entre parches y el nivel de fragmentación. De estos, la proporción de parches extensos y la fragmentación de superficie estuvieron asociados con una menor mortalidad por neumonía. Los resultados sugieren que el diseño de espacios verdes urbanos debe cumplir condiciones de amplitud y cercanía. La presencia de espacios verdes muy fragmentados podría tener un efecto negativo para la salud respiratoria. Tal como indican los autores, es probable que la presencia de pocas vegetaciones, en especial árboles, puedan tener un efecto paradójico al liberar mayor cantidad de partículas contaminantes que las que pueden filtrar. A pesar de que solo

se reportaron datos de mortalidad respiratoria agregada, los autores hallaron una disminución de este indicador en presencia de espacios verdes de área extensa y cercanas entre sí.

Sun et al. (2020) realizaron el estudio *Air pollution associated respiratory mortality risk alleviated by residential greenness in the Chinese Elderly Health Service Cohort*. El objetivo del estudio fue evaluar si el verdor del vecindario residencial modifica la asociación a corto plazo entre la contaminación del aire y la mortalidad respiratoria. Se realizó un cruce de casos en una cohorte de 66 820 adultos mayores de 65 años en Hong Kong. Se midió el NDVI con datos de Landsat a una resolución de 30 m, en 2001 y 2006. Se calculó el NDVI promedio en *buffers* residenciales de 250 m y 500 m. Se dicotomizó el NDVI en bajo y alto verdor y se utilizó un enfoque de cruce de casos estratificado en el tiempo para estimar el exceso de riesgo porcentual de mortalidad respiratoria asociada con  $MP_{2.5}$ ,  $MP_{10}$ ,  $NO_2$  y  $O_3$ . El desenlace fue la mortalidad respiratoria entre 1998 y 2011. Las covariables fueron la temperatura ambiental, humedad relativa, epidemias de gripe, días festivos y contaminación atmosférica. Se evaluó la modificación de efecto del verdor residencial en la asociación entre la contaminación atmosférica y la mortalidad respiratoria. Se observó que las zonas de bajo verdor se asociaron con un mayor riesgo de mortalidad por neumonía atribuido a las interacciones de  $NO_2$  ( $p = 0.049$ ) y  $O_3$  ( $p = 0.025$ ). En conclusión, este estudio sugiere que las zonas de mayor verdor podrían generar menor susceptibilidad respiratoria asociada a la contaminación atmosférica.

Wu et al. (2021) realizaron el estudio *Health-oriented vegetation community design: Innovation in urban green space to support respiratory health*. El objetivo del estudio fue valorar la asociación entre áreas verdes y salud respiratoria en población de Shanghai, China. Se realizó un estudio transversal en 993 adultos con enfermedad respiratoria (incluyendo bronquitis en los últimos cinco años). Se midió el verdor mediante el NDVI, el Índice de Vegetación Ajustado al

Suelo (SAVI), Índice de Vigor Relativo (RVI) y el Índice de Vegetación Mejorado (EVI), a una resolución espacial de 30 m, y se obtuvo datos del tipo de árbol. Se construyeron exposiciones adicionales dentro de un *buffer* de 500 m alrededor de la comunidad, como la proporción de árboles de hoja perenne y árboles de hoja caduca, con respecto a la superficie verde total. El desenlace fue la prevalencia de enfermedad respiratoria. Las covariables incluyeron características socioeconómicas individuales (edad, sexo e índice de masa corporal) y la contaminación aérea alrededor de las comunidades (MP<sub>2.5</sub>, gases de escape de automóviles, polvo de edificios, gases de escape de industrias y olor a basura). Se observó que la prevalencia de enfermedades respiratorias estuvo asociada a diferencias en el NDVI ( $B = -0.789$ ,  $p < 0.05$ ), pero no a la proporción de árboles de hoja perenne ( $B = 0.011$ ,  $p > 0.05$ ) ni a la proporción de árboles de hoja caduca ( $B = 0.025$ ,  $p > 0.05$ ). En conclusión, los resultados del estudio apoyan el efecto positivo general de la cobertura vegetal en las enfermedades respiratorias.

Esposito et al. (2014) realizaron el estudio *Impact of air pollution on respiratory diseases in children with recurrent wheezing or asthma*. El objetivo del estudio fue investigar los efectos de la contaminación relacionada con el tráfico en el desarrollo de infecciones respiratorias en niños italianos que padecen asma o sibilancias en comparación con sujetos sanos. Se realizó un estudio prospectivo en 777 niños de 2 a 18 años (375 con sibilancias recurrentes o asma y 402 sanos). Durante 12 meses, los padres rellenaron un diario clínico de forma diaria para facilitar información sobre los síntomas respiratorios, el tipo de medicación utilizada y el uso de los servicios de salud. Los datos clínicos se combinaron con los resultados obtenidos mediante un sistema de vigilancia de la contaminación atmosférica de los cinco contaminantes más comunes. Las covariables para el ajuste del modelo fueron la edad, sexo, número de hermanos, nivel educativo de los padres y presencia de fumadores en el hogar. Se observó que el riesgo de exacerbaciones de asma fue menor

en niños con sibilancias/asma que vivían a una distancia <300 m de áreas verdes (OR: 0.50, IC 95 %: 0.31-0.80). En niños con sibilancias/asma, se observó un mayor riesgo de neumonía por cada  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de incremento de  $\text{MP}_{10}$  (OR: 1.08, IC 95 %: 1.00-1.17) y  $\text{NO}_2$  (OR: 1.08; IC 95 %: 1.01-1.17). En conclusión, se evidenció una asociación indirecta entre la cercanía a áreas verdes y la prevención de infecciones respiratorias en niños con sibilancias/asma. Esto se puede asumir porque la menor recurrencia de asma o sibilancias en el grupo que vive cerca a áreas verdes puede también equivaler a un menor riesgo de neumonía debido al nivel reducido de contaminantes aéreos.

Meo et al. (2021) realizaron el estudio *Effect of Green Space Environment on Air Pollutants  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_3$ , and Incidence and Mortality of SARS-CoV-2 in Highly Green and Less-Green Countries*. El objetivo del estudio fue evaluar el efecto del entorno de espacios verdes sobre la incidencia y mortalidad por COVID-19. Se realizó un estudio ecológico en 17 países seleccionados al azar, usando la clasificación de verdor según el índice de rendimiento medioambiental (países altamente verdes vs. países menos verdes). Los registros diarios de casos y muertes por COVID-19 se obtuvieron de la OMS, entre enero de 2020 y julio de 2021. Se observó que los casos ( $15\ 713.61 \pm 702.42$  vs.  $3445.59 \pm 108.09$ ) y las muertes ( $297.56 \pm 11.27$  vs.  $72.54 \pm 2.61$ ) relacionados con COVID-19 disminuyeron significativamente en países «altamente verdes» en comparación con países «menos verdes». En conclusión, se observó una posible asociación entre la presencia de mayor verdor con la reducción de la morbimortalidad causada por la COVID-19.

Russette et al. (2021) realizaron el estudio *Greenspace exposure and COVID-19 mortality in the United States: January–July 2020*. El objetivo del estudio fue determinar si la exposición a espacios verdes a nivel de condado se asocia con un menor riesgo de mortalidad por COVID-19. Se realizó un estudio ecológico en 3 049 condados en de Estados Unidos. La exposición a espacios

verdes se construyó usando deciles del índice de área foliar (LAI) que derivaron de imágenes satelitales a través del espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada de 2011 a 2015. Los datos de mortalidad de COVID-19 se obtuvieron de los registros de la Universidad Johns Hopkins. Las covariables fueron la población total media del condado a nivel de condado 2015-2019, la población de mayor edad, la etnia, el hacinamiento en el hogar, afiliación al seguro *Medicaid*, educación e inactividad física. Se halló una asociación dosis-respuesta entre el verdor y la reducción del riesgo de mortalidad por COVID-19. La mortalidad por COVID-19 se asoció negativamente con los deciles LAI 8 (mortality rate ratio [MRR]: 0.82, IC 95 %: 0.72-0.93), 9 (MRR: 0.78, IC 95 %: 0.68-0.89)] y 10 (MRR: 0.59, IC 95 %: 0.50-0.69). Aparte del decil LAI 5, no se encontraron asociaciones entre los deciles LAI restantes y la mortalidad por COVID-19. En conclusión, los condados con una mayor cantidad de espacios verdes pueden tener un riesgo reducido de experimentar mortalidad por COVID-19.

Klompaker et al. (2022) realizaron el estudio *Associations of parks, greenness, and blue space with cardiovascular and respiratory disease hospitalization in the US Medicare cohort*. El objetivo del estudio fue determinar la asociación entre la presencia de áreas verdes y el número de hospitalizaciones por enfermedad respiratoria. Se realizó un estudio de cohorte en pacientes del programa de seguro médico *Medicare* de Estados Unidos (aproximadamente 63 millones de individuos). La cohorte incluyó personas atendidas entre 2000 y 2016, de edad  $\geq 65$  años y que vivían en Estados Unidos. Se identificó a nivel de código postal la cobertura de parques y el verdor promedio por NDVI. Se observó que el valor promedio de NDVI estaba correlacionado negativamente con el porcentaje de cobertura de parques ( $\rho$  de Spearman = -0.23). Luego del ajuste por confusores (incluyendo el  $\text{NO}_2$ ), se halló que el porcentaje de cobertura de parques no se asoció con la hospitalización por enfermedad respiratoria en la población urbana. El aumento del rango

intercuartílico del NDVI tampoco se asoció con la hospitalización por enfermedad respiratoria (hazard ratio [HR]: 0.99, IC 95 %: 0.98-1.00). En el área urbana, un aumento del rango intercuartílico del NDVI se asoció positivamente con la hospitalización por enfermedad respiratoria (HR: 1.02, IC 95 %: 1.00-1.03). En el análisis estratificado, el porcentaje de cobertura de parques se asoció negativamente con la hospitalización por enfermedad respiratoria, para los individuos que vivían en barrios urbanos de bajo nivel socioeconómico. En conclusión, este estudio sugiere que las áreas verdes pueden beneficiar la salud respiratoria. Sin embargo, es necesario considerar que los beneficios pueden estar limitados a ciertos contextos y desenlaces. El resultado más llamativo fue la asociación positiva entre verdor y hospitalización por enfermedad respiratoria, lo que podría ser debido a que la vegetación es una fuente de polen, ozono, compuestos volátiles y otros irritantes respiratorios. Esto se relaciona con una menor tolerancia al polen y la hipótesis de un mayor riesgo de alergia en los habitantes urbanos.

En general, hay evidencia escasa, inconsistente y heterogénea sobre la asociación entre las áreas verdes con infecciones respiratorias en niños. Los estudios revisados representan un nivel de evidencia bajo, con alta probabilidad de sesgo (Mueller et al., 2022). La exposición (áreas verdes) ha sido medida y procesada de distintas formas (siendo el índice más usado el NDVI). De forma similar, el desenlace (infección respiratoria aguda) ha sido medido por autorreporte o comúnmente como un objetivo secundario.

### ***1.3.2. Nacionales***

Actualmente, no se ha encontrado estudios peruanos sobre el efecto de las áreas verdes en las infecciones respiratorias.

## **1.4. Objetivos**

### ***1.4.1. Objetivo general***

Evaluar la asociación entre la cobertura de áreas verdes a nivel distrital y el riesgo de infecciones respiratorias agudas en niños menores de cinco años en los distritos de Lima, Perú

### ***1.4.2. Objetivos específicos***

- Estimar el riesgo de infecciones respiratorias agudas en niños en los distritos de Lima
- Identificar y cuantificar la cobertura de áreas verdes en los distritos de Lima
- Analizar la correlación espaciotemporal entre el riesgo de infecciones respiratorias agudas, la cobertura de áreas verdes y la concentración promedio de MP<sub>2.5</sub> en los distritos de Lima
- Identificar áreas de alto riesgo para infecciones respiratorias agudas, la cobertura de áreas verdes y la concentración promedio de MP<sub>2.5</sub> en los distritos de Lima

## **1.5. Justificación**

Teóricamente, este estudio enriquece la literatura científica al proporcionar evidencia empírica sólida en Perú acerca de la influencia de las áreas verdes urbanas en la salud respiratoria de los niños menores de cinco años. Además, se explora cómo los elementos contextuales, como los factores ambientales, geográficos y sociodemográficos, pueden modular esta asociación. Así, se contribuye a una mayor comprensión de los mecanismos potenciales que vinculan las áreas verdes con la salud respiratoria.

Metodológicamente, aunque el estudio se basa en un análisis secundario de datos existentes, demuestra una aplicación innovadora y reflexiva del diseño de estudio de cohorte a

nivel poblacional. Analizando los distritos de Lima en distintos períodos de tiempo, es posible capturar la evolución de la asociación estudiada y considerar con eficacia los factores de confusión.

Desde un punto de vista práctico, los resultados obtenidos se traducen en recomendaciones tangibles para la promoción y conservación de áreas verdes urbanas, con el objetivo de mejorar la calidad de vida de los habitantes de Lima y potencialmente disminuir el riesgo de enfermedades respiratorias en los niños. Adicionalmente, se proporciona información útil sobre la distribución espacial de las áreas verdes, elemento crucial para una planificación urbana efectiva (Wang y Tassinary, 2019). Se resalta, asimismo, que los beneficios de estas áreas verdes pueden ser multidimensionales, englobando mejoras en el bienestar físico y emocional, incremento de la actividad física y reducción del estrés.

## **1.6. Hipótesis**

Una extensa cobertura de áreas verdes a nivel distrital está asociada con un menor riesgo de infecciones respiratorias agudas en niños menores de cinco años en los distritos de Lima, Perú.

## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Bases teóricas sobre el tema de investigación

#### 2.1.1. Áreas verdes

Las áreas verdes incorporan zonas de vegetación, como parques, jardines y reservas naturales, al entorno urbano (WHO Regional Office for Europe, 2017). Las áreas verdes se basan en diversos conceptos, entre ellos:

- ***Servicios ecosistémicos:*** Se pone de relieve los beneficios que las áreas verdes aportan al entorno urbano, como la purificación del aire y el agua, la captura de carbono y la provisión de hábitat para la vida silvestre (McKinney, 2006).
- ***Salud humana y bienestar:*** Las áreas verdes se han relacionado con numerosos beneficios para la salud física y mental, como la reducción del estrés, la mejora del estado de ánimo y el aumento de la actividad física (Lee y Maheswaran, 2011).
- ***Accesibilidad y equidad:*** Las áreas verdes deben ser accesibles a todos los residentes, independientemente de su estatus socioeconómico o capacidad. Esta teoría subraya la importancia de la distribución equitativa de las áreas verdes en las zonas urbanas (Wolch et al., 2014).
- ***Planificación y diseño urbanos:*** El diseño y la ubicación de las áreas verdes en los entornos urbanos pueden influir enormemente en su uso y eficacia. Los urbanistas y diseñadores deben tener en cuenta el impacto de las áreas verdes en el entorno y diseñarlos para maximizar sus beneficios (Haaland y van den Bosch, 2015).
- ***Interacciones sociales:*** Las áreas verdes pueden ofrecer oportunidades para las interacciones sociales, como reuniones y eventos comunitarios. Este concepto destaca la

importancia de las áreas verdes sociales y orientadas a la comunidad en las zonas urbanas (Chiesura, 2004).

Las áreas verdes cumplen una función importante en la regulación ambiental. El mecanismo de filtración del material particulado está determinado principalmente por la presencia de árboles (McDonald et al., 2016). Actualmente, se ha planteado un modelo que consiste en tres procesos: el flujo aéreo de ingreso, la filtración en la copa de los árboles y la redilución del aire purificado. Primero, el flujo aéreo de ingreso consiste en la llegada de una concentración específica de material particulado, que puede ser medida en función al tiempo y a la velocidad del viento. Segundo, la filtración de material particulado en la copa de los árboles puede ser explicada por el modelo de deposición y resuspensión (Janhäll, 2015). La deposición varía en función a condiciones específicas de la planta, como el área de la hoja y la especie de árbol. Asimismo, varía según las condiciones climáticas, como la velocidad del viento y las precipitaciones. Finalmente, el proceso de redilución se basa en la mezcla del aire purificado con el del medio ambiente, reduciendo el nivel promedio de contaminantes aéreos.

### ***2.1.2. Infección aguda de las vías respiratorias***

Las infecciones respiratorias agudas en niños son una de las causas más comunes de enfermedad y visitas al médico en la infancia (Perin et al., 2022). Estas infecciones pueden ser causadas por virus o bacterias y pueden afectar las vías respiratorias superiores o inferiores (Simoes et al., 2006). El tracto respiratorio superior incluye las vías respiratorias desde las fosas nasales hasta las cuerdas vocales de la laringe, incluidos los senos paranasales y el oído medio. El tracto respiratorio inferior cubre la continuación de las vías respiratorias desde la tráquea y los bronquios hasta los bronquiolos y los alvéolos (Simoes et al., 2006).

La literatura sugiere que los niños son más propensos a contraer infecciones respiratorias debido a su sistema inmunológico aún en desarrollo (Simon et al., 2015). También pueden ser más vulnerables debido a su hábito de compartir juguetes, alimentos y otras superficies con otros niños en la escuela o en el hogar (Aronson y Shope, 2020; Kimberlin et al., 2021). Además, las infecciones respiratorias en niños pueden ser más graves que en adultos debido a su sistema respiratorio aún en desarrollo y su tendencia a respirar más rápido que los adultos (Etzel R et al., 2000). Esto significa que los virus y bacterias pueden propagarse más fácilmente y causar más daño en el sistema respiratorio de los niños.

Existen varias teorías que explican el desarrollo de infecciones respiratorias en los niños. La teoría microbiana señala que estas infecciones son causadas por microorganismos como bacterias, virus, hongos y parásitos que invaden el cuerpo y provocan una respuesta inflamatoria, dando lugar a los síntomas (Dickson et al., 2016). Por su parte, la teoría de la defensa del huésped sugiere que existen mecanismos para protegerse frente a las infecciones, como el sistema inmunitario, las superficies mucosas y las barreras físicas como la piel (Welsh y Mason, 2001). La teoría de la exposición ambiental se centra en el papel de la exposición a contaminantes, alérgenos e irritantes en el desarrollo de infecciones respiratorias (Ferrante et al., 2022). La teoría de la virulencia destaca la importancia de comprender las propiedades de los diferentes patógenos para prevenir y tratar las infecciones (Ewald, 2004). La teoría patogénica propone que la presencia de factores de virulencia en microorganismos específicos contribuyen al desarrollo de infecciones respiratorias (Siegel y Weiser, 2015). La teoría del desarrollo sugiere que estas infecciones están influidas por las etapas de desarrollo del niño (Simon et al., 2015). La teoría de la transmisión microbiana propone que las infecciones pueden propagarse de persona a persona a través de diversos medios (Aronson y Shope, 2020; Kimberlin et al., 2021). Finalmente, la teoría de los

determinantes sociales de la salud afirma que los factores sociales y ambientales en los que vive un niño pueden influir significativamente en su riesgo de desarrollar infecciones respiratorias (Cohen, 1999).

### **2.1.3. *MP<sub>2.5</sub>***

El  $MP_{2.5}$  es un término que se refiere a las partículas en el aire de tamaño menor a  $2.5 \mu\text{m}$ , también conocidas como partículas  $MP_{2.5}$  (Kampa y Castanas, 2008). Estas partículas son uno de los componentes más perjudiciales de la contaminación del aire debido a su pequeño tamaño y su capacidad para penetrar profundamente en los pulmones y el sistema circulatorio. Las partículas  $MP_{2.5}$  son emitidas por una variedad de fuentes, incluyendo la combustión de combustibles fósiles (como el petróleo y el carbón), la agricultura y la industria. También pueden ser generadas por procesos naturales, como la erosión y la actividad volcánica (Kampa y Castanas, 2008).

El  $MP_{2.5}$  tiene un impacto negativo en la salud humana, ya que puede causar una amplia gama de problemas de salud, incluyendo enfermedades respiratorias, cardiovasculares y cáncer (Brook et al., 2010; Kampa y Castanas, 2008). También se ha demostrado que está asociado con un mayor riesgo de muerte prematura (Lelieveld et al., 2015). Para abordar el problema del  $MP_{2.5}$ , se han implementado políticas y programas a nivel local, nacional e internacional para reducir las emisiones y mejorar la calidad del aire. Estos incluyen la regulación de las emisiones de fuentes específicas, la promoción de tecnologías más limpias y la sensibilización sobre la importancia de un aire limpio (Burns et al., 2020).

### **2.1.4. *MP<sub>2.5</sub> e infección respiratoria***

La asociación entre la exposición al  $MP_{2.5}$  y las infecciones respiratorias en niños es un tema de creciente interés en el campo de la salud ambiental. Varios estudios han sugerido que la

exposición al  $MP_{2.5}$  está asociado a un mayor riesgo de infecciones respiratorias en los niños, como bronquitis, neumonía y resfriado común (Mehta et al., 2013; Ziou et al., 2022). Se cree que esto ocurre porque las partículas de  $MP_{2.5}$  pueden irritar e inflamar el sistema respiratorio, facilitando que las bacterias y los virus se arraiguen y causen infecciones (Feng et al., 2016). Además, el  $MP_{2.5}$  puede debilitar el sistema inmunitario, haciéndolo menos eficaz para combatir las infecciones respiratorias (Johnson et al., 2021).

El  $MP_{2.5}$  es uno de los contaminantes aéreos de mayor impacto en la salud, debido a su gran capacidad de penetración pulmonar. Estudios preclínicos han demostrado que este contaminante aéreo puede causar cambios a nivel celular producto de un estrés oxidativo crónico (Dellinger et al., 2001). La interacción de la  $MP_{2.5}$  con las sustancias antioxidantes presentes en el fluido de revestimiento epitelial produce una reducción en su capacidad protectora. A partir de este mecanismo, se hipotetiza que las células epiteliales del tracto respiratorio son más vulnerables ante una exposición a algún patógeno. Adicionalmente, el  $MP_{2.5}$  puede alterar la respuesta inmune mediada por los macrófagos alveolares (Becker y Soukup, 1999; Kaan y Hegele, 2003). Se ha descrito que la exposición de los macrófagos a la  $MP_{10}$  causa una respuesta inmune ineficaz. Esta respuesta alterada se expresa en la disminución de la capacidad fagocitaria y la reducción de la liberación de citoquinas proinflamatorias. La exposición a la  $MP_{2.5}$  sugiere, pues, que los individuos estarían más propensos a las infecciones y sus complicaciones.

Es importante señalar que la relación entre la exposición a  $MP_{2.5}$  y las infecciones respiratorias en los niños sigue siendo un área activa de investigación y se necesitan más estudios para confirmar estos hallazgos. Los niños son especialmente vulnerables a los efectos del  $MP_{2.5}$  porque su sistema respiratorio aún se está desarrollando e inhalan más aire por unidad de peso corporal que los adultos (Bateson y Schwartz, 2007; Kurt et al., 2016). Además, los niños suelen

ser más activos al aire libre y, por tanto, están más expuestos a la contaminación atmosférica exterior (Bateson y Schwartz, 2007).

Sin embargo, aún no se conoce con exactitud el mecanismo por el que el  $MP_{2.5}$  provoca infecciones respiratorias. Algunos investigadores creen que el  $MP_{2.5}$  pueden debilitar el sistema inmunitario, lo que facilita la aparición de infecciones respiratorias (Feng et al., 2016). Otros sugieren que el  $MP_{2.5}$  puede causar daños directos en el sistema respiratorio (Johnson et al., 2021) o alterar la homeostasis de la microbiota nasal (Mariani et al., 2018).

En general, los conocimientos actuales sugieren que la exposición a las  $MP_{2.5}$  es un importante factor de riesgo de infecciones respiratorias en los niños. Reducir la exposición al  $MP_{2.5}$  mediante medidas como la reducción de la contaminación atmosférica y la promoción de políticas de aire limpio puede ayudar a reducir el riesgo de infecciones respiratorias en los niños.

### ***2.1.5. Áreas verdes e infección respiratoria***

El efecto de las áreas verdes en el desarrollo de infecciones respiratorias es un tema de investigación que ha cobrado importancia en los últimos años debido al aumento de la urbanización y la disminución de las áreas verdes en las ciudades (Markevych et al., 2017). Se ha demostrado que las áreas verdes pueden actuar como una barrera contra la contaminación del aire y mejorar la calidad del aire. Por ejemplo, los árboles y la vegetación pueden filtrar partículas y compuestos contaminantes del aire, y también pueden liberar compuestos que mejoran la calidad del aire, como los compuestos volátiles de la hoja (Mueller et al., 2022). Además, las áreas verdes también pueden proporcionar un ambiente fresco y húmedo que puede disminuir la probabilidad de que los virus y bacterias se propaguen en el aire (Grilo et al., 2020). Otro factor importante es que las áreas verdes pueden fomentar la actividad física al aire libre y mejorar la salud en general

(Markevych et al., 2017), lo cual puede disminuir la probabilidad de desarrollar infecciones respiratorias. Sin embargo, es importante señalar que también existe un potencial riesgo de transmisión de enfermedades en áreas verdes, especialmente si no se siguen medidas de higiene adecuadas, como el lavado de manos frecuente y la evitación de contacto con animales y superficies contaminadas.

Diversos estudios sugieren que las áreas verdes tienen un impacto positivo en la salud respiratoria de los niños de las zonas urbanas (Mueller et al., 2022). Los estudios han revelado que los niños que viven cerca de áreas verdes presentan tasas más bajas de asma y otras enfermedades respiratorias, así como una mejor función pulmonar en comparación con los que viven en zonas más urbanizadas (Mueller et al., 2022). Los mecanismos exactos por los que las áreas verdes influyen en la salud respiratoria no se conocen del todo, pero se han identificado varias vías posibles:

Se sabe que las áreas verdes mejoran la calidad del aire al reducir los niveles de contaminación atmosférica (Mueller et al., 2022). Esto se debe a que las áreas verdes absorben y filtran contaminantes, como las partículas, los óxidos de nitrógeno y el ozono, que se sabe que causan problemas respiratorios. Al reducir la exposición a estos contaminantes, las áreas verdes pueden ayudar a reducir el riesgo de infecciones respiratorias en los niños.

Las áreas verdes también ofrecen oportunidades para que los niños practiquen actividad física, que se sabe que tiene un impacto positivo en la salud respiratoria (Nieman y Sakaguchi, 2022). Estudios han mostrado que la actividad física puede aumentar la capacidad pulmonar y mejorar la función de las vías respiratorias (Nieman y Sakaguchi, 2022), reduciendo el riesgo de infecciones respiratorias. Además, se ha demostrado que la actividad física en áreas verdes reduce

los niveles de estrés (Fondell et al., 2011), lo que también puede tener un impacto positivo en la salud respiratoria.

Las áreas verdes proporcionan hábitats para una amplia gama de especies, incluidas plantas y animales. Este aumento de la biodiversidad ha demostrado tener un impacto positivo en la salud respiratoria (Mueller et al., 2022). Estudios han encontrado que la exposición a una mayor variedad de microorganismos y alérgenos en las áreas verdes puede ayudar a fortalecer el sistema inmunitario (Ruokolainen et al., 2017; Selway et al., 2020), reduciendo el riesgo de infecciones respiratorias. Además, se ha demostrado que las plantas aumentan los niveles de bacterias beneficiosas en el aire (Mhuireach et al., 2016), lo que también puede ayudar a mejorar la salud respiratoria.

En términos generales, las áreas verdes tienen un impacto positivo en la salud respiratoria de los niños residentes en zonas urbanas, habiéndose identificado varias vías potenciales. Se cree que la mejora de la calidad del aire, el aumento de la actividad física y el incremento de la biodiversidad contribuyen al impacto positivo de las áreas verdes en la salud respiratoria. Es necesario seguir investigando para comprender plenamente los mecanismos a través de los cuales las áreas verdes repercuten en la salud respiratoria e identificar las mejores formas de diseñar y gestionar las áreas verdes para maximizar sus beneficios para la salud.

### III. MÉTODO

#### 3.1. Tipo de investigación

Se realizó un estudio ecológico de cohorte (Koepsell y Weiss, 2014) basado en un análisis secundario de (1) los registros de infecciones respiratorias agudas del Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica en Salud Pública del Minsa, (2) datos de bandas espectrales del suelo terrestre obtenidos por la misión Sentinel-2, (3) datos de la concentración atmosférica de MP<sub>2.5</sub> generados por Hammer et al. (2020), (4) datos de la Encuesta Nacional de Hogares (ENAH) y (5) registros del XII Censo de Población del Perú. Ninguna variable del presente estudio fue medida o creada directamente por las fuentes originales. Estas fueron construidas usando los datos disponibles, y fueron almacenadas conjuntamente en una nueva y única base de datos. Los instrumentos usados para medir los datos primarios se explican en la sección 3.5.

El estudio presentó las siguientes características: (1) tuvo un enfoque cuantitativo, ya que la medición de las variables se expresó en valores numéricos, (2) empleó un diseño no experimental porque la exposición no fue controlada por el investigador, (3) fue longitudinal, ya que se midió la exposición y el desenlace en dos puntos diferentes del tiempo, (4) fue retrospectivo, puesto que los datos fueron recolectados en el pasado, (5) fue analítico porque hubo grupos de comparación, y (6) fue de tipo ecológico, ya que los datos fueron agregados a nivel poblacional.

La exposición fue la cobertura de áreas verdes a nivel distrital. Se consideró como punto de inicio el mes de marzo de 2017, debido a la mejor calidad de imagen encontrada en el repositorio de Sentinel-2 (principalmente, una menor nubosidad). El desenlace fue el riesgo distrital de infecciones respiratorias agudas, el cual fue observado entre 2017 y 2019. Debido a la edad temprana de la población de estudio, existió una baja probabilidad de migración durante el

seguimiento. Además, se asumió que la cobertura distrital de áreas verdes varió poco en periodos contiguos. Por ello, se consideró que los niños estuvieron expuestos a la misma cobertura de áreas verdes, independientemente del periodo de estudio.

Los métodos para el desarrollo de la presente investigación estuvieron basados en el estudio de Carrasco-Escobar et al. (2020), en el cual se evaluó la correlación espaciotemporal entre los casos de tuberculosis, el nivel de pobreza y el grado de contaminación aérea en la provincia de Lima.

### **3.2. Ámbito temporal y espacial**

El estudio estuvo circunscrito a la provincia de Lima e investigó fenómenos ocurridos entre 2017 y 2019. Lima está compuesta por cinco sectores: Norte, conformado por ocho distritos, Centro, por 15 distritos; Sur, por 11 distritos; y Este, por nueve distritos. Lima se ubica en la costa central del Perú, con una superficie de 2 672 m<sup>2</sup> y una latitud de 12.0464° S y longitud de 77.0428° O. Tiene una distribución socioeconómica desigual. El nivel promedio distrital de pobreza es de 14.8 %, con mayores unidades porcentuales en los sectores norte, este y sur. La principal actividad económica la constituyen los servicios, seguido de la manufactura y el comercio. El clima es subtropical, desértico y húmedo, con temperaturas mínimas de 14°C (12-25°C) entre junio y setiembre, y temperaturas máximas de 25.5°C (16-28°C) entre octubre y mayo. La humedad promedio es de 80 %, alcanzando un pico de 55 % entre mayo y agosto. Su población alcanza los 9 752 000 habitantes, siendo el área más habitada en Perú. La zonificación es urbana, aunque presenta zonas periurbanas en sectores periféricos.



### 3.3. Variables

#### 3.3.1. Desenlace

**Riesgo de infecciones respiratorias agudas en niños menores de cinco años a nivel distrital.** Esta variable se definió como la proporción entre los nuevos casos de infecciones respiratorias agudas y la población total del distrito en el periodo de estudio. El valor se expresó en una unidad de 10 000 niños menores de cinco años.

#### 3.3.2. Exposición

**Cobertura de áreas verdes a nivel distrital.** Se definió como el porcentaje de superficie distrital que está cubierta por áreas verdes. Para el análisis, esta variable se categorizó en dos niveles: «cobertura extensa» y «cobertura limitada». Se estableció un punto de corte del 10 % de la superficie distrital para diferenciar entre estas dos categorías. De este modo, los distritos con un porcentaje de superficie cubierta por áreas verdes igual o superior al 10 % se clasificaron como «cobertura extensa», mientras que aquellos con un porcentaje inferior al 10 % se consideraron de «cobertura limitada».

#### 3.3.3. Covariables

**Concentración de  $MP_{2.5}$  a nivel distrital.** Se definió como el promedio de los valores distritales de la concentración superficial de  $MP_{2.5}$ . Un mayor valor indica un nivel más alto de contaminación aérea en el distrito.

**Índice de pobreza a nivel distrital.** Se definió como el inverso aditivo de todos los valores obtenidos en el primer componente principal. Una mayor puntuación del índice sugiere un mayor nivel de pobreza en el distrito.

*Densidad poblacional de niños menores de cinco años a nivel distrital.* Se definió como el número total de niños menores de cinco años que residen en el distrito, dividido por el área del distrito en términos de superficie.

### **3.4. Población y muestra**

Los distritos de la provincia de Lima conforman el objeto de estudio. El análisis se centrará en cómo las variaciones en la cobertura de áreas verdes entre estos distritos pueden afectar el riesgo de infecciones respiratorias en niños menores de cinco años que residen en dichos distritos.

### **3.5. Instrumentos**

Las bases de datos que se usaron para la construcción de las variables tienen las siguientes características: (1) Estudiaron diferentes objetos o fenómenos, (2) se estructuraron en formato tabular o georreferenciado, y (3) almacenaron una cantidad considerable de datos.

Los registros de infecciones respiratorias agudas en niños menores de cinco años son capturados y procesados por el Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica en Salud Pública del Minsa. La vigilancia de los casos individuales se realiza diariamente en todos los establecimientos de salud del Perú. Los registros individuales son consolidados semanalmente y remitidos a la dependencia institucional de mayor jerarquía, hasta culminar en la Dirección General de Epidemiología. En esta instancia, se elaboran informes semanales a nivel nacional usando como indicador de vigilancia la tasa de notificación, definida como la razón entre el número de episodios notificados hasta la semana actual y la población estudiada. Según la Directiva Sanitaria para la Vigilancia Epidemiológica de las Infecciones Respiratorias Agudas (Soto y Arrasco, 2015), un caso se define como aquella infección que afecta las vías respiratorias altas y duran menos de 15 días, con presencia de tos más rinorrea o fiebre, sin dificultad respiratoria ni

signos de alarma. Los diagnósticos se registran usando la décima revisión de la Clasificación Internacional de Enfermedades, desde el código J00 hasta el J11.1. Los registros de infecciones respiratorias fueron solicitados al Centro Nacional de Epidemiología, Prevención y Control de Enfermedades (CDC), completando un formulario virtual en el portal de acceso a la información pública (<https://www.minsa.gob.pe/portada/transparencia/solicitud/frmFormulario.asp>).

La cobertura del suelo por áreas verdes se identificó y cuantificó usando datos de las bandas espectrales reflejadas por el suelo terrestre, obtenidos por teledetección satelital. Las imágenes son capturadas y procesadas por la misión Sentinel-2 del programa de observación terrestre Copérnico, ejecutada en 2015 por la Agencia Espacial Europea (European Space Agency, 2023). La misión posee dos satélites de órbita sincrónica con el sol, separados a  $180^\circ$ , que observan la superficie con una apertura de 290 km entre las latitudes  $56^\circ$  S y  $84^\circ$  N. Los satélites usan un instrumento multiespectral de alta resolución para capturar, filtrar, procesar y clasificar la radiancia superficial. El instrumento contiene canales que transportan y concentran el haz de luz en dos placas con sensores. Una placa proyecta bandas espectrales visibles y cercanas al infrarrojo (VNIR); la otra placa, bandas infrarrojas de onda corta (SWIR). Las bandas se clasifican según la longitud de onda. El instrumento genera 13 bandas espectrales a resoluciones de 10 m (bandas 2, 3, 4 y 8), 20 m (bandas 5, 6, 7, 8<sup>a</sup>, 11 y 12), y 60 m (bandas 1, 9 y 10). Cada banda espectral muestra una característica de la superficie terrestre (por ejemplo, la banda 1 permite identificar el aerosol en las costas; la banda 9, el vapor de agua). Las imágenes capturadas por el instrumento son procesadas por niveles. El nivel 0 consiste en un análisis de telemetría, identificación de nubosidad y descompresión de los datos. El nivel 1 realiza correcciones radiométricas y geométricas (nivel 1A), así como un suavizado de los datos, conversión a reflectancias, e identificación de píxeles alterados (nivel 1B). El nivel 1C corrige la distorsión óptica de los sensores obteniéndose

reflectancias sobre el nivel de la atmósfera. El nivel 2A depura la luminosidad reflejada por los componentes de la atmósfera (nubes, gases, aerosoles), generando reflectancias confiables para el análisis. Los datos de reflectancia del nivel 1C y 2A se pueden descargar de forma gratuita ingresando al portal de acceso abierto de Copérnico (<https://scihub.copernicus.eu/dhus>). Los datos se presentan en formato georreferenciado en un mapamundi dividido en unidades de superficie terrestre de 100x100 km<sup>2</sup> en proyección UTM/WGS84.

Los datos de la concentración atmosférica de MP<sub>2.5</sub> provienen del Centro de Datos y Aplicaciones Socioeconómicas (SEDAC), uno de los centros de datos del Sistema de Observación de la Tierra de la NASA (Hammer et al., 2022). El SEDAC promueve el uso de datos de teledetección en contextos socioeconómicos para determinar el impacto de los cambios globales en la población. Actualmente dispone de 279 bases de datos y 49 colecciones, abordando disciplinas como la agricultura, el clima, la infraestructura y la salud. Los datos de MP<sub>2.5</sub> se ubican en la colección *Indicadores ambientales derivados de satélites*, y derivan del procesamiento de datos sobre el espesor óptico de aerosoles (Hammer et al., 2020). Esto último se define como la cantidad de luz solar absorbida o dispersada por partículas finas sólidas, concentradas en una columna vertical de atmósfera. El espesor óptico de aerosoles resulta de (1) la radiancia medida por los sensores MODIS, MISR y SeaWiFS y procesada por algoritmos de recuperación basados en las características de las bandas espectrales; y (2) del modelo de transporte químico GEO-Chem, que genera simulaciones diarias de la concentración de aerosoles, e identifica una relación simulada con el MP<sub>2.5</sub>, denominado cociente  $\eta$ . GEO-Chem usa observaciones meteorológicas asimiladas del Reanálisis MERRA-2 de la NASA, y datos de emisiones de aerosol naturales y antropogénicas. Para obtener la concentración atmosférica de MP<sub>2.5</sub>, Hammer et al. (2020) crearon un algoritmo que calibra y combina los datos del espesor atmosférico de aerosoles, tanto de las

fuentes satelitales como la simulada por GEO-Chem. El algoritmo calcula inicialmente la concentración diaria de  $MP_{2.5}$  multiplicando el cociente  $\eta$  por el espesor atmosférico de aerosoles observado o simulado en el día. Los valores diarios de  $MP_{2.5}$  de todas las fuentes se combinan mediante un promedio ponderado mensual. Los valores promedio mensuales se promedian nuevamente con una ponderación similar para obtener un valor anual. Finalmente, se usa un modelo de regresión geográficamente ponderada para reducir el sesgo residual del valor anual de  $MP_{2.5}$ . El modelo incluye valores de  $MP_{2.5}$  medidos con monitores terrestres, obtenidos de la base de datos global de calidad de aire ambiente de la OMS. Los datos finales de  $MP_{2.5}$  se presentan en formato georreferenciado en un mapamundi, el cual contiene celdas a una resolución de  $0.01^\circ$  en proyección WGS84. Los datos pueden descargarse de forma gratuita ingresando al siguiente enlace: <https://sedac.ciesin.columbia.edu/data/set/sdei-global-annual-gwr-pm2-5-modis-misr-seawifs-aod-v4-gl-03/data-download>.

El índice de pobreza fue construido usando los datos de la ENAHO 2018 (Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2023). La ENAHO tiene como objetivo generar indicadores anuales de pobreza, bienestar y condiciones de vida de los hogares del Perú, permitiendo evaluar tendencias a nivel nacional, departamental y urbanorrural. Los datos se recogen usando una encuesta de opción cerrada, y se relacionan con los doce grupos de consumo más frecuentes en el hogar: (1) recreación y cultura; (2) bebidas alcohólicas y tabaco; (3) restaurantes y hoteles; (4) alojamiento, agua, electricidad, gas y otros combustibles; (5) muebles, artículos para el hogar y mantenimiento de la vivienda; (6) bienes y servicios diversos; (7) salud; (8) educación; (9) prendas de vestir y calzado; (10) comunicaciones; (11) alimentos y bebidas no alcohólicas; y (12) transporte. Las variables relacionadas con estos grupos buscan determinar de qué forma se obtuvo el bien o servicio, categorizándose como gasto, autoconsumo/autosuministro, pago en especie,

donación pública/privada, otros, y no sabe/no gastó. La ENAHO resume, imputa y estandariza todas las características de los grupos de consumo, los cuales están disponibles en el módulo 34 de la encuesta. Las variables se ordenan según el tipo de respuesta. La muestra de la encuesta es representativa y consiste en 36 996 viviendas en 2018. El muestreo se realiza en etapas, usando como unidades de muestreo el centro poblado, el conglomerado y la vivienda. La selección de la unidad de muestreo es aleatoria en cada etapa, usa áreas de selección predefinidas geográficamente, se realiza de forma independiente en cada departamento, y establece estratos para ponderar la muestra. Los datos pueden descargarse libremente en el portal de microdatos del INEI (<https://inei.inei.gob.pe/microdatos/>).

La densidad poblacional de niños menores de cinco años derivó de los registros del XII Censo Nacional de Población (Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2017<sup>a</sup>) y datos de la superficie de los distritos de Lima (Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2019). El empadronamiento en el área urbana ocurrió el 22 de octubre de 2017, y en el área rural, desde el 23 de octubre hasta el 6 de noviembre. El censo empleó la entrevista directa a personas de 12 años o más de edad. En los niños menores de 12 años, la entrevista se realizó a los padres o personas a cargo. El empadronamiento del individuo se realizó en el lugar en el que se encontraba, independientemente de si era su residencia habitual. Los datos fueron recolectados en cédulas que se enviaron al sistema por escáner, para posteriormente procesarlas y realizar actividades de consistencia y control de calidad. Los resultados fueron comparados usando como referencia fuentes internas y externas. El censo logró empadronar a 29 381 884 personas. La omisión censal fue evaluada realizando una encuesta poscensal. La tasa de omisión censal fue de 5.94 %, la cual equivalió a 1 855 501 individuos (Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2017b). Los

datos están disponibles en el Sistema de Consulta de Base de Datos – Redatam: <https://censos2017.inei.gob.pe/pubinei/>.

### **3.6. Procedimientos**

La base de registros de infecciones respiratorias, obtenida del CDC–Minsa entre 2017 y 2019, fue exportada a R. Se agruparon los registros semanales para tener un valor anual y estratificado por grupos etarios (0 a 11 meses y 1 a 4 años). Adicionalmente, se descargaron los registros del censo poblacional, los cuales se presentaron estratificados por edades. Estos se importaron a Stata, y se ordenaron de tal forma que solo se contó con información de la población menor de cinco años en cada distrito de Lima. Los datos procesados del censo fueron exportados en un archivo en formato DTA, el cual fue importado a R para unirlo con la base de datos de infecciones respiratorias, mediante el comando bind. De esta forma, se tuvo los registros de estas infecciones y de la población en una sola fuente. Finalmente, se calculó el riesgo de infecciones respiratorias en niños a nivel distrital. Los datos obtenidos fueron los primeros elementos de la base de datos principal.

La identificación y cuantificación de áreas verdes en el suelo de Lima se logró con los siguientes pasos: Se descargó un archivo en formato shapefile (SHP) de la plataforma nacional de datos georreferenciados Geo Perú (<https://visor.geoperu.gob.pe>), el cual contiene la delimitación poligonal de los bordes de Lima y sus distritos. Debido al peso del archivo, los datos georreferenciados de las bandas espectrales del suelo terrestre no fueron descargados directamente del portal de Copérnico. En cambio, se utilizó Google Earth Engine para obtener los mismos datos, pero con la facilidad de filtrar las bandas espectrales de interés (bandas 8 y 4), para obtener un archivo de menor peso. Los datos fueron descargados en un archivo en formato TIFF, el cual se importó en R. Las imágenes satelitales disponibles para delimitar la superficie de Lima se

encontraron fragmentadas. Para reducir el sesgo, se eligieron los fragmentos de imagen satelital que mostraron los menores rasgos de nubosidad en el periodo de reporte más cercano disponible. Posteriormente, se unieron los fragmentos y se creó un nuevo ráster que se recortó en R, acorde a la delimitación superficial de Lima. Este nuevo ráster se utilizó para calcular el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el cual asignó un número a cada píxel para identificar zonas con presencia de vegetación. El cálculo del NDVI se basó en la diferencia normalizada de dos bandas espectrales (NIR y roja) que, en Sentinel-2, pertenecen a las bandas 8 y 4 respectivamente. La fórmula fue la siguiente:  $NIR-R/NIR+R$ . Para este estudio, se consideró área verde a toda superficie cuyo píxel tuvo un valor NDVI mayor o igual a 0.19. No se pudieron excluir áreas verdes viales (pistas, veredas y carreteras). Sin embargo, estas tienen poca influencia en la salud respiratoria (Shen y Lung, 2017). Luego, el ráster se delimitó según los bordes distritales, y se extrajo para cada distrito el número total de píxeles y el número de píxeles correspondientes a las áreas verdes. El porcentaje del suelo cubierto por áreas verdes se calculó de la siguiente manera:  $(\text{Número de píxeles correspondientes a áreas verdes en el distrito} / \text{Número total de píxeles en el distrito}) * 100$ . Esta nueva variable se categorizó en tercios para el análisis principal. Debido a la naturaleza exploratoria del análisis, la variable también se estudió en su forma numérica y usando categorizaciones alternativas. La nueva variable se anexó a la base de datos principal.

Los datos de  $MP_{2.5}$  fueron descargados del portal SEDAC-NASA. Los datos georreferenciados fueron descargados en formato TIFF, y se delimitaron a la provincia de Lima usando el mismo archivo shapefile empleado en la estimación del riesgo de infecciones respiratorias. Se calculó la concentración promedio anual de  $MP_{2.5}$  para cada distrito, y estos valores fueron añadidos a la base de datos principal.

Los datos para la construcción del índice de pobreza distrital fueron descargados del portal de microdatos del INEI. El archivo de interés estaba dentro del módulo 34, en formato CSV. La base de datos fue importada en R y se filtraron solo las variables relacionadas con los grupos de consumo. Sobre estos datos se aplicó un análisis de componentes principales, y se seleccionó solo el primer componente principal, asumiendo que este aportaba la mayor varianza explicada entre los componentes totales. El índice fue construido aplicando el inverso aditivo a los valores del primer componente principal. Dado que los indicadores socioeconómicos no mostraron variaciones significativas en los recientes años, se usó el índice de pobreza indistintamente para los tres años de estudio. El cálculo del índice estuvo basado en la metodología de Carrasco-Escobar et al. (2020). La variable fue añadida a la base de datos principal.

El cálculo de la densidad poblacional de niños siguió dos etapas. Primero, el número de niños menores de cinco años fue consultado aplicando filtros de búsqueda en la plataforma Redatam. La búsqueda y descarga del reporte se repitió para cada distrito. Los archivos descargados fueron importados en Stata y unidos en una sola base de datos. Los registros fueron ordenados según el distrito de residencia. Segundo, se añadió una columna en la nueva base de datos, en la cual se incluyó la superficie en  $\text{km}^2$  de cada distrito. Finalmente, se dividió el número de niños que vivía en cada distrito por la superficie distrital respectiva. El valor obtenido fue el mismo para los tres años de estudio debido a la poca variación demográfica entre años cercanos. La base de datos fue posteriormente importada en R y fusionada con la base de datos principal.

### 3.7. Análisis de datos

#### 3.7.1. Análisis espacial

El análisis de dependencia espacial permitió identificar qué distritos contiguos mostraban similitud en el riesgo de infecciones respiratorias, así como en el nivel de cobertura de áreas verdes, concentración de MP<sub>2.5</sub> y densidad poblacional. Este método fue un paso inicial para establecer la interacción de estas variables en determinadas regiones de Lima. Para ello se usaron los estadísticos  $I$  de Moran (dependencia global) y  $G_i^*$  de Getis-Ord (dependencia local o identificación de áreas de alto riesgo). Se ponderó la contigüidad espacial distrital bajo el criterio Queen de primer orden. Además, se identificó la correlación entre variables mediante la prueba  $W$  de Kendall. El valor  $p$  se estimó bajo el método de simulación de Monte Carlo.

#### 3.7.2. Análisis estadístico

Se usó el índice de Gini para evaluar la desigualdad en la distribución de casos de infecciones respiratorias a nivel distrital. Posteriormente, se construyeron modelos lineales generalizados de efectos mixtos con distribución binomial negativa. Se consideraron como efectos fijos la concentración de MP<sub>2.5</sub>, el índice de pobreza y la densidad poblacional. Fueron considerados como efectos aleatorios el tiempo (años de estudio) y el espacio (distribución por distritos). Se aplicó un enfoque bayesiano, el cual incluyó información previa sobre el riesgo de infecciones respiratorias en Lima y consideró la dependencia espacial con distritos contiguos (Gilks et al., 1995). Este enfoque «suaviza» la estimación de parámetros debido a que se controla la variabilidad espacial, por lo que se recomienda en estudios epidemiológicos que presentan correlación espacial (Dunson, 2001). La estimación del modelo se realizó mediante el método de aproximación de Laplace anidada integrada (Blangiardo et al., 2013), presentando medidas de

riesgo relativo (RR) con intervalos de confianza al 95 %. Todos los análisis se realizaron en R versión 4.2.2.

### **3.8. Consideraciones éticas**

Los datos que involucran a sujetos humanos provienen de fuentes secundarias de acceso público (Minsa e INEI), los cuales se registraron de forma anónima. Por ello, no se requirió el uso del consentimiento informado ni existió un riesgo de daño a los participantes. Se siguieron los principios éticos de la declaración de Taipéi sobre el uso de biobancos.

La responsabilidad social del estudio radica en dos aspectos: la salud respiratoria de los niños y el cuidado del medio ambiente. Por un lado, se busca contribuir en las propuestas de mitigación de las infecciones respiratorias en niños, mejorando los indicadores de salud pública relacionados con las prioridades nacionales de investigación. Por otro lado, se busca crear conciencia y fomentar acciones positivas para proteger y mejorar las áreas verdes en los distritos de Lima. Específicamente, los resultados del estudio tienen como fin sensibilizar a la sociedad sobre la importancia de las áreas verdes para la salud respiratoria de los niños y el medio ambiente en general. Esto podría representar una oportunidad para involucrar a la comunidad en el cuidado y la protección de las áreas verdes. Finalmente, podría contribuir a la formulación de políticas medioambientales que fomenten la creación, restauración y conservación de áreas verdes en Lima.

## IV. RESULTADOS

### 4.1. Riesgo de infecciones respiratorias agudas a nivel distrital

La incidencia acumulada promedio de infecciones respiratorias en niños por distrito entre 2017 y 2019 en la ciudad de Lima se muestra en la **Tabla 1**. El distrito de Barranco presentó la mayor incidencia con 12 577 casos por cada 10 000 niños, lo que representa el 6.24 % de la incidencia total en Lima durante el periodo de estudio. Le sigue Santa María del Mar con una incidencia promedio de 10 559 casos por cada 10 000 niños (5.24 %). En tercer lugar se encuentra Chaclacayo con una incidencia promedio de 10 059 casos por cada 10 000 niños (4.99 %). San Bartolo ocupa el cuarto lugar con 9 876 casos por cada 10 000 niños (4.9 %), seguido de Pucusana con 9 228 casos por cada 10 000 niños (4.58 %). Por otro lado, los distritos con menor incidencia promedio de infecciones respiratorias en niños son Santiago de Surco con 1 868 casos por cada 10 000 niños (0.93%), Miraflores con 1 101 casos por cada 10 000 niños (0.55 %) y San Isidro con 900 casos por cada 10 000 niños (0.45 %).

**Tabla 1**

*Incidencia acumulada promedio de infecciones respiratorias agudas según distrito, 2017-2019*

Distrito	Incidencia promedio entre 2017-2019	
	(x 10 000 niños)	%
Barranco	12 577	6.24
Santa Maria Del Mar	10 559	5.24
Chaclacayo	10 059	4.99
San Bartolo	9 876	4.90

Pucusana	9 228	4.58
Lima	9 055	4.49
Punta Negra	8 907	4.42
Lince	7 135	3.54
La Victoria	6 061	3.01
Ancon	4 815	2.39
Cieneguilla	4 768	2.37
Lurigancho	4 619	2.29
Rimac	4 560	2.26
Villa Maria Del Triunfo	4 557	2.26
El Agustino	4 530	2.25
San Juan De Miraflores	4 540	2.25
La Molina	4 463	2.21
Villa El Salvador	4 406	2.19
Santa Anita	4 262	2.11
Magdalena Del Mar	4 169	2.07
Independencia	4 030	2.00
Pachacamac	4 033	2.00
Jesus Maria	3 965	1.97
Ate	3 829	1.90
Breña	3 835	1.90
Chorrillos	3 663	1.82
Lurin	3 669	1.82

Los Olivos	3 599	1.79
San Luis	3 397	1.69
San Juan De Lurigancho	3 374	1.67
San Miguel	3 085	1.53
Surquillo	3 084	1.53
Comas	2 998	1.49
Pueblo Libre	2 986	1.48
San Martin De Porres	2 849	1.41
Santa Rosa	2 793	1.39
Carabaylo	2 499	1.24
Puente Piedra	2 356	1.17
Punta Hermosa	2 280	1.13
San Borja	2 238	1.11
Santiago De Surco	1 868	0.93
Miraflores	1 101	0.55
San Isidro	900	0.45

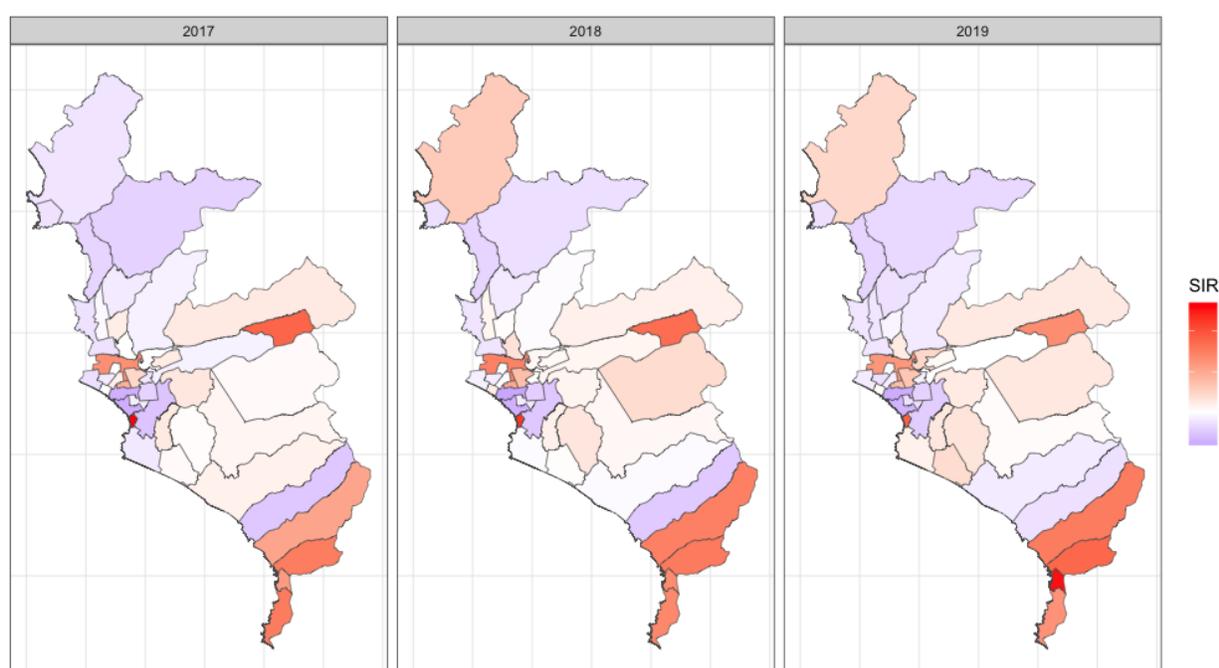
---

El mapa de la razón de incidencia estandarizada de infecciones respiratorias agudas en los distritos de Lima entre 2017 y 2019 se presenta en la **Figura 2**. Se representa visualmente la variabilidad de la incidencia de esta enfermedad en la ciudad. Esta razón de incidencia estandarizada se calcula como la razón entre la incidencia observada en un distrito y la incidencia esperada en la población normal. Los valores altos en el mapa, que se representan en rojo, indican una incidencia mayor que la esperada en la población normal, lo que significa que la incidencia de

la enfermedad es más alta en ese distrito en comparación con el promedio de la ciudad de Lima. Por otro lado, los valores bajos, que se representan en azul, indican una incidencia menor que la esperada en la población normal.

## Figura 2

*Mapa de la razón de incidencia estandarizada de infecciones respiratorias agudas en los distritos de Lima, 2017-2019*



*Nota.* Valores altos (rojo) indican una incidencia mayor que la esperada en la población normal. SIR: *Standardized incidence ratio*

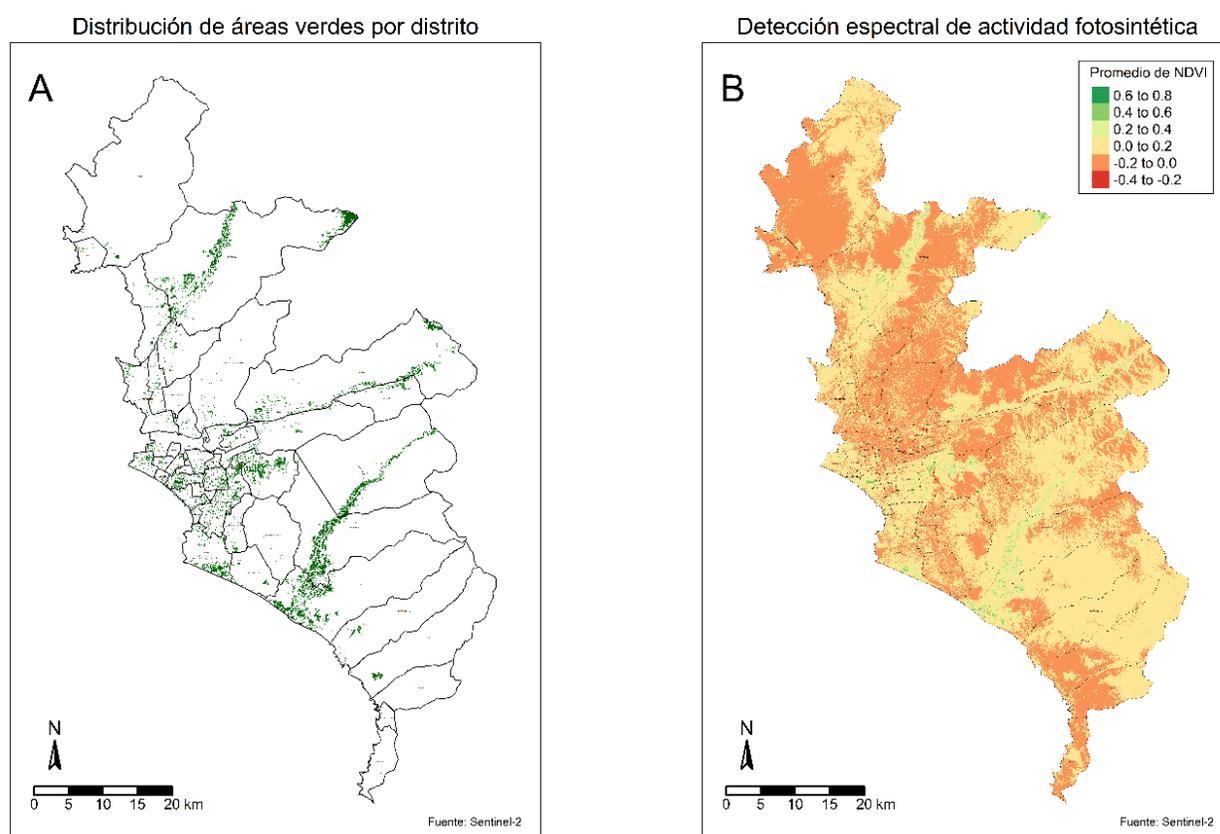
## 4.2. Cobertura de áreas verdes a nivel distrital

La **Figura 3** representa la distribución de áreas verdes en la provincia de Lima detectadas mediante imágenes satelitales del Sentinel-2. En la parte A de la figura, se muestra la distribución de las áreas verdes en la provincia, indicando su ubicación y extensión. Las áreas verdes se

muestran en tonos verdes y se diferencian claramente del resto de la superficie urbana. En la parte B de la figura, se muestra la detección espectral de actividad fotosintética mediante el NDVI. Los tonos verdes representan una alta actividad fotosintética, mientras que los tonos rojos y amarillos representan una actividad fotosintética más baja. Esta imagen permite identificar las áreas con mayor actividad fotosintética en la provincia de Lima, lo que indica una mayor densidad y calidad de vegetación en esas zonas.

### Figura 3

*Representación satelital de la distribución de áreas verdes en la provincia de Lima, marzo 2017*

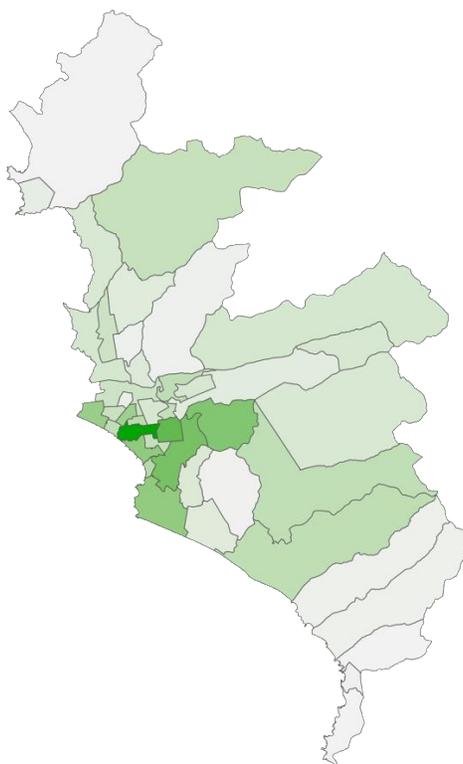


*Nota.* (A) Distribución de áreas verdes. (B) Detección espectral de actividad fotosintética mediante el índice de vegetación de diferencia normalizada.

La **Figura 4** muestra la extensión de la cobertura de áreas verdes en los distritos de Lima con imágenes capturadas en marzo de 2017. Cada distrito está representado por una tonalidad de verde distinta, la cual indica el porcentaje de cobertura de áreas verdes en su superficie. En la figura, se observa que algunos distritos tienen una cobertura alta de áreas verdes, mientras que otros tienen una cobertura baja. En la **Figura 5**, se detalla el porcentaje de esta cobertura. Por ejemplo, los distritos de San Isidro (24.23 %), San Borja (18.13 %), Surco (15.82 %) y La Molina (14.46 %) tienen los porcentajes más altos de áreas verdes, mientras que los distritos de Ancón (0.18 %), Pucusana (0.10 %) y San Bartolo (0.04 %) tienen la cobertura más baja.

#### **Figura 4**

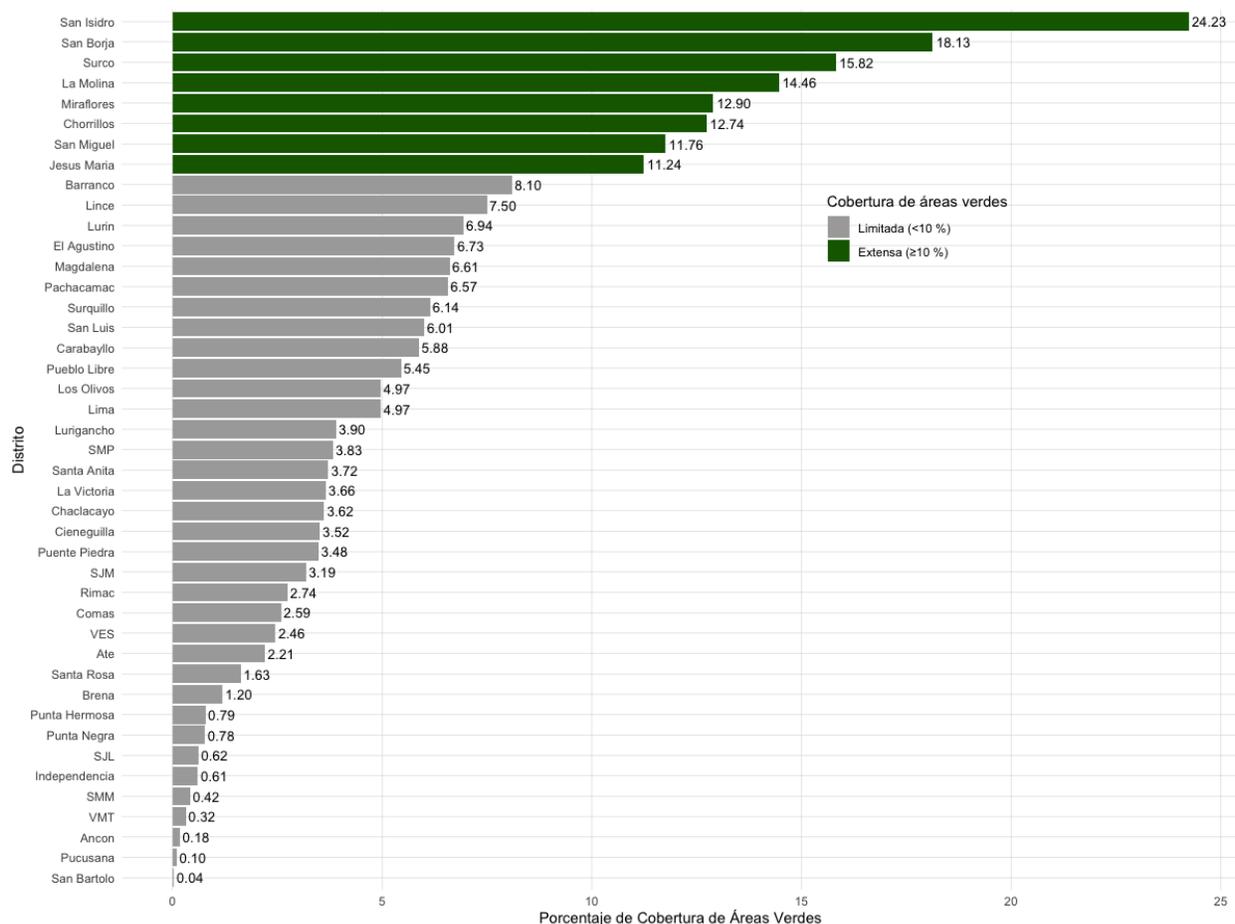
*Cobertura de áreas verdes en los distritos de Lima, marzo 2017*



*Nota.* Un color verde más intenso indica una mayor cobertura de áreas verdes en la superficie del distrito.

**Figura 5**

*Distribución de la cobertura de áreas verdes en los distritos de Lima, marzo 2017*



*Nota.* La cobertura de áreas verdes se calcula como el porcentaje del área del distrito cubierta por superficies verdes.

SJL: San Juan de Lurigancho, SJM: San Juan de Miraflores, SMM: Santa María del Mar, SMP: San Martín de Porres,

VES: Villa El Salvador, VMT: Villa María del Triunfo

### 4.3. Dependencia espacial general

En este análisis, se propuso examinar la distribución espacial de las infecciones respiratorias agudas en diferentes distritos y buscar patrones espaciales que podrían ayudar a identificar factores de riesgo y orientar las intervenciones de salud pública.

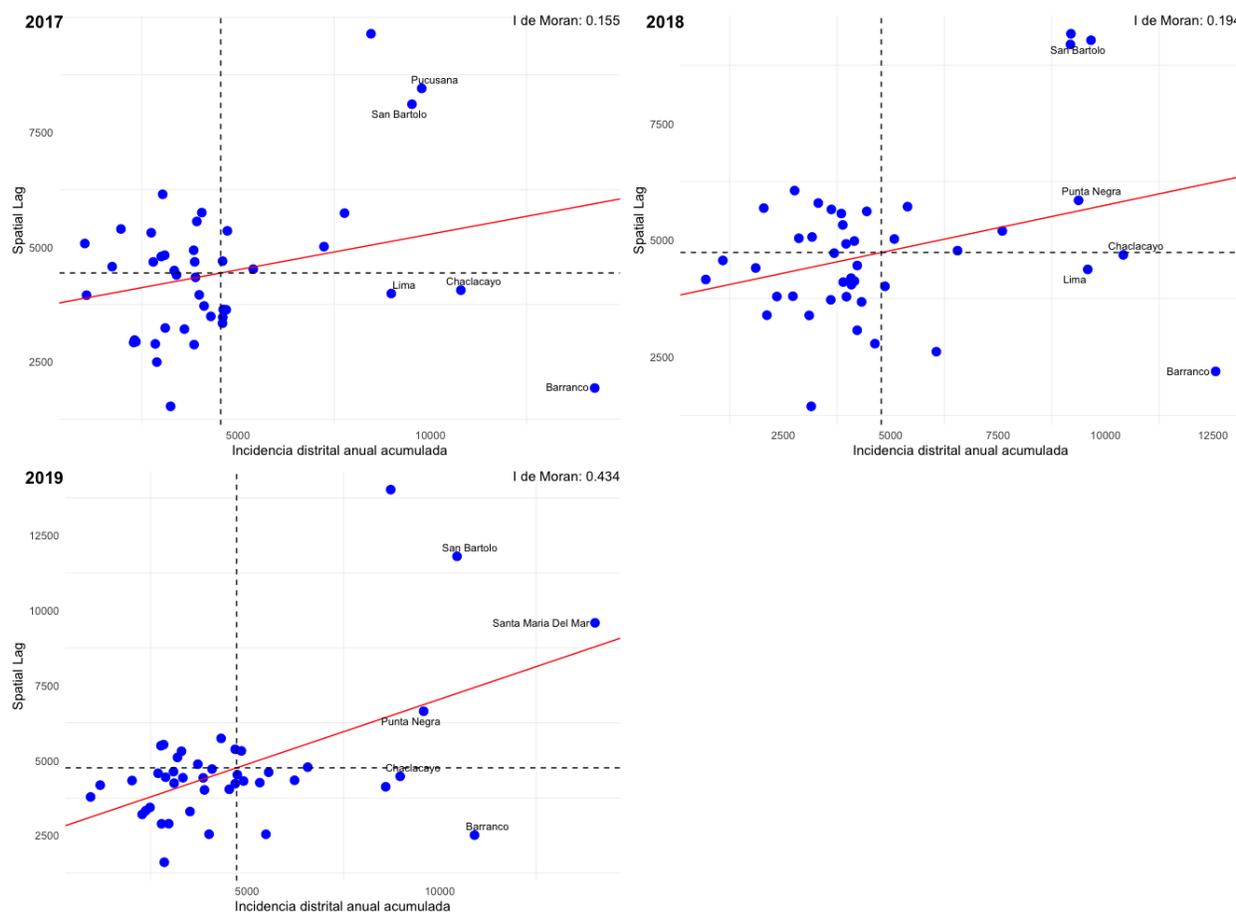
La **Figura 6** exhibe un diagrama de dispersión de Moran, que destaca la autocorrelación espacial de infecciones respiratorias agudas entre las diversas unidades geográficas. En esta ilustración, el punto central representa el valor esperado del índice de Moran, basado en la hipótesis nula de una distribución espacial aleatoria. Los puntos dispersos, por otro lado, retratan los valores observados del índice de Moran en cada distrito.

Resulta notorio que los distritos ubicados en el cuadrante superior derecho denotan una autocorrelación espacial positiva considerable. Este hallazgo apunta a la existencia de factores de riesgo comunes locales o a la transmisión de la enfermedad entre áreas adyacentes. Sin embargo, es importante mencionar que los distritos con autocorrelación espacial positiva, como San Bartolo, Pucusana y Santa María del Mar, son relativamente pocos y se encuentran en la zona costera del sur. Además, la acumulación de datos alrededor del punto de origen sugiere una autocorrelación espacial más ténue, a pesar de la presencia de estos distritos con correlaciones más pronunciadas.

Al observar la evolución de los valores del índice de Moran durante el período de estudio de tres años, se constata una tendencia de incremento progresivo. En 2019, este índice alcanza su cúspide, con un valor  $p$  inferior a 0.001, demostrando una correlación espacial significativa en la incidencia de infecciones respiratorias agudas. A pesar de que los valores del índice de Moran para 2017 y 2018 son menores, aún son significativos ( $p = 0.039$  y  $p = 0.018$ , respectivamente), subrayando la persistencia de la correlación espacial en la incidencia de la enfermedad a lo largo del tiempo.

**Figura 6**

*Dispersión espacial de Moran para la incidencia distrital anual acumulada de infecciones respiratorias agudas, 2017-2019*



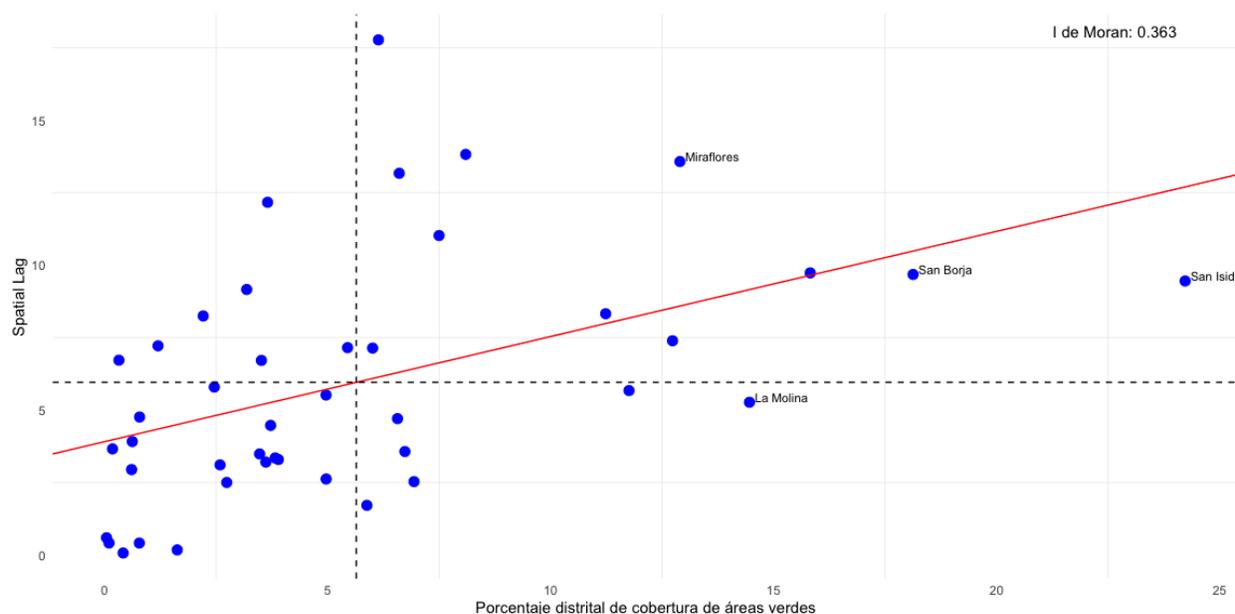
*Nota.* Cada panel muestra el gráfico de dispersión de Moran para las incidencias de infecciones respiratorias agudas en el año correspondiente. Cada punto en los gráficos representa un distrito, con su valor de incidencia de infecciones respiratorias en el eje  $x$  y su valor rezagado espacial en el eje  $y$ . Las líneas rojas son las líneas de regresión, mientras que las líneas discontinuas representan los valores medios. La proximidad de los puntos a la línea de regresión roja y su dispersión en torno a ella proporciona una visualización de la autocorrelación espacial. Valores  $p$  del índice de Moran: 2017 (0.039), 2018 (0.018), 2019 ( $<0.001$ ).

Estos patrones de dependencia espacial observados para las infecciones respiratorias agudas proporcionan una base para investigar los factores ambientales que podrían estar influyendo en su distribución. Como el siguiente paso en el análisis, se examinó la dependencia espacial del porcentaje de cobertura de áreas verdes y las concentraciones de  $MP_{2.5}$  en los distritos. La hipótesis del estudio es que la cobertura de áreas verdes puede afectar la incidencia de infecciones respiratorias agudas al influir en las concentraciones de  $MP_{2.5}$ .

La **Figura 7** destaca la autocorrelación espacial en la cobertura de áreas verdes en el plano distrital, desvelando patrones interesantes de correlación. El cuadrante superior derecho revela una autocorrelación espacial positiva, con un valor p menor a 0.001 y un índice de Moran de 0.363, lo que denota una correlación significativa. Esto sugiere que los distritos que cuentan con una amplia cobertura de áreas verdes, como San Isidro, Miraflores y San Borja, tienden a estar rodeados por otros distritos de características similares.

## Figura 7

*Dispersión espacial de Moran para el porcentaje distrital de cobertura de áreas verdes, marzo 2017*

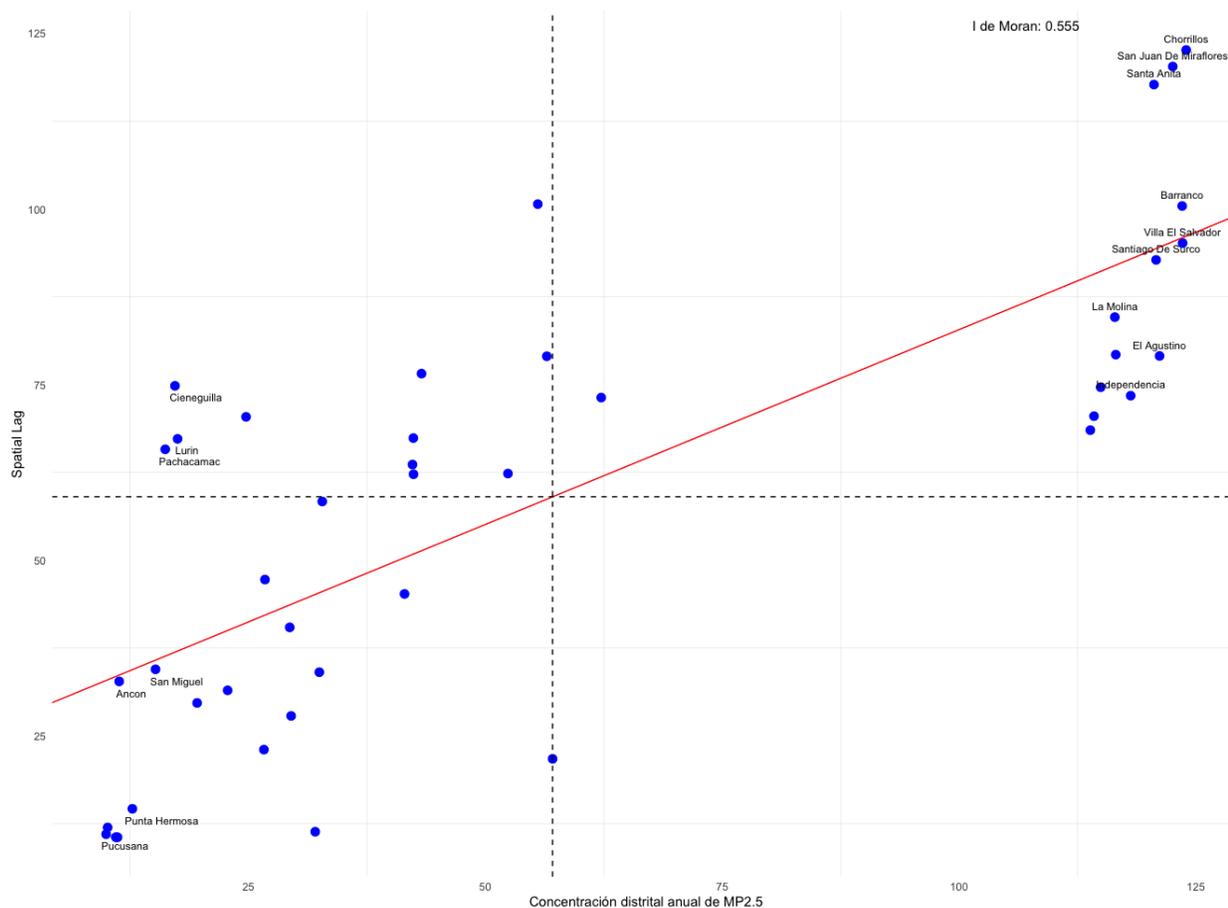


*Nota.* Los puntos etiquetados corresponden a los distritos con mayor cobertura de área verde. Valor  $p < 0.001$

El diagrama de dispersión de Moran para la concentración distrital de  $MP_{2.5}$ , ilustrado en la **Figura 8**, expone una marcada agrupación de puntos en el cuadrante superior derecho. Este agrupamiento insinúa una autocorrelación espacial positiva prominente: distritos con elevadas concentraciones de  $MP_{2.5}$ , incluyendo Chorrillos, San Juan de Miraflores y Barranco, tienden a estar circundados por distritos con características análogas, apuntando a un patrón de distribución espacial contundente. La carencia de distribución aleatoria de los puntos refuerza la existencia de patrones espaciales de agrupación perceptibles y significativos. Acorde a un índice de Moran de 0.555 y un valor  $p$  inferior a 0.001, este análisis robustece la evidencia de la sustancial autocorrelación espacial en la concentración de  $MP_{2.5}$  en Lima.

## Figura 8.

### *Dispersión espacial de Moran para la concentración distrital anual de MP<sub>2.5</sub>, 2018*



*Nota.* El índice de Moran para la concentración de MP<sub>2.5</sub> es de 0.555 ( $p < 0.001$ ), lo que indica una autocorrelación espacial significativa. Los distritos más lejanos a la línea roja se han etiquetado para facilitar su identificación.

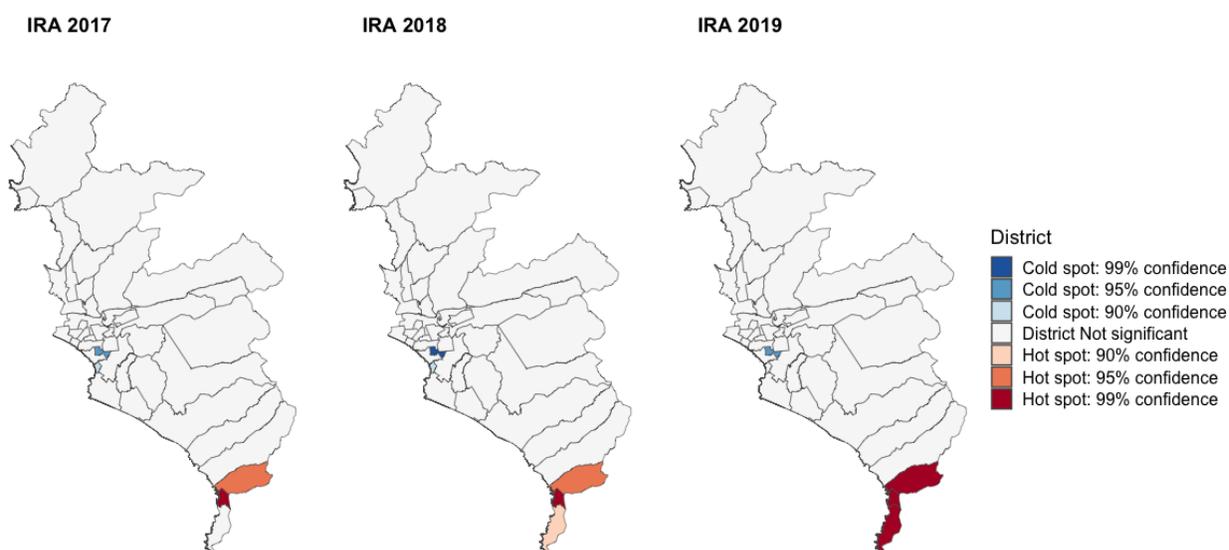
#### 4.4. Patrones locales y áreas de alto riesgo

La **Figura 9** visualiza la distribución de áreas de alto riesgo de infecciones respiratorias agudas en niños menores de cinco años por distrito y por año (2017-2019), según el índice  $G_i^*$  de Getis-Ord. En 2017, se detectaron dos zonas de alto riesgo: San Bartolo y Santa María del Mar, ambas con concentraciones elevadas de incidencia y con un nivel de confianza del 95%. En 2018, se mantuvo un patrón análogo, con San Bartolo y Santa María del Mar resaltando nuevamente

como áreas de alta incidencia. Para 2019, se evidenciaron tres zonas de alto riesgo: San Bartolo, Santa María del Mar y Pucusana, lo que refleja una expansión en la distribución geográfica de la incidencia elevada de infecciones respiratorias agudas.

### Figura 9

*Patrones locales y áreas de alto riesgo por distrito de infecciones respiratorias agudas, 2017-2019*



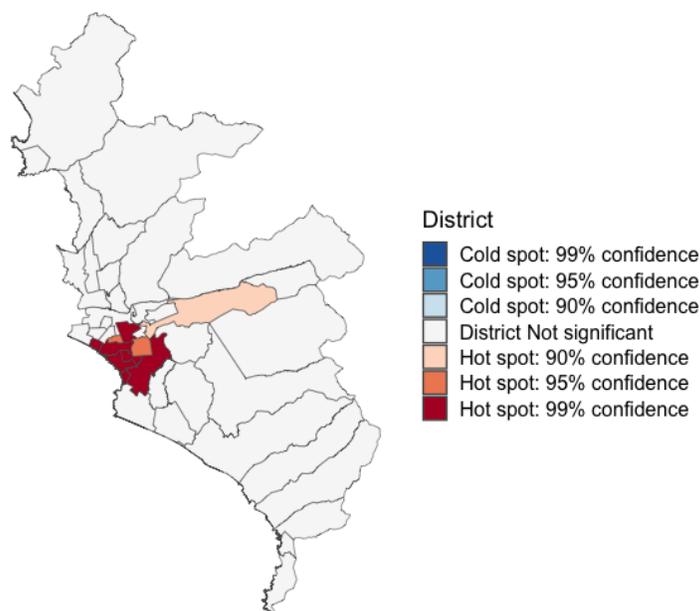
*Nota.* Los mapas de calor fueron calculados con el índice  $G_i^*$  de Getis-Ord. Las áreas en rojo indican áreas de alto riesgo de infección respiratoria, mientras que las áreas en azul indican áreas de bajo riesgo. Los patrones locales se representan en categorías que indican si un distrito tiene una alta o baja incidencia y si está rodeado por otros distritos con una alta o baja incidencia.

El índice  $G_i^*$  de Getis-Ord también se ha utilizado para analizar la distribución espacial de las áreas verdes en diferentes distritos (**Figura 10**). Los resultados obtenidos indican que existen patrones locales y áreas de concentración de áreas verdes en algunos distritos de la ciudad en los años analizados. En términos generales, se observa una tendencia a la concentración de áreas verdes en determinados distritos. Específicamente, los distritos que presentaron patrones locales

de concentración de áreas verdes fueron el distrito de Barranco, Santiago de Surco, San Isidro, Miraflores, Surquillo, San Borja, Magdalena del Mar, Jesús María y Lince.

**Figura 10**

*Patrones locales y áreas de concentración por distrito de áreas verdes*



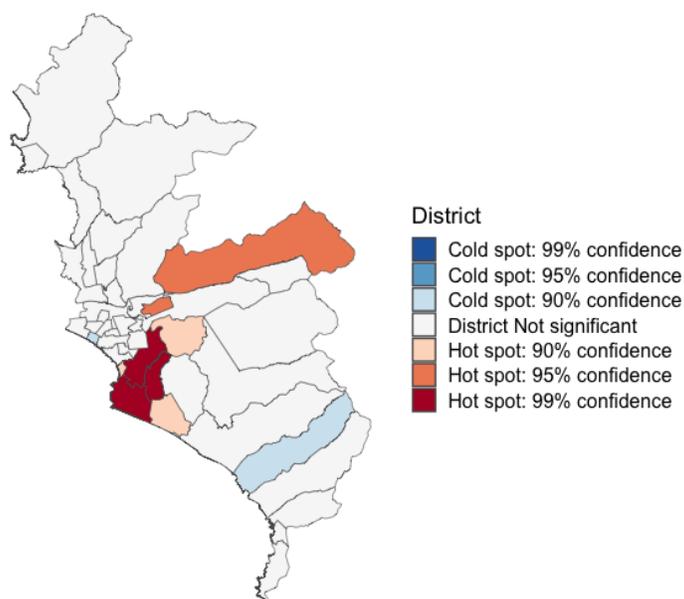
*Nota.* El mapa de calor fue calculado con el índice  $G_i^*$  de Getis-Ord. Las áreas en rojo indican áreas de alta concentración de áreas verdes, mientras que los puntos en azul indican áreas de baja concentración. Los patrones locales se representan en categorías que indican si un distrito tiene una alta o baja concentración de áreas verdes y si está rodeado por otros distritos con una alta o baja concentración.

El índice  $G_i^*$  de Getis-Ord también se usaron para analizar la distribución espacial de  $MP_{2.5}$  (**Figura 11**). Los resultados obtenidos muestran que existen patrones locales y áreas de concentración de  $MP_{2.5}$  en algunos distritos de Lima. En términos generales, se observa una tendencia a la concentración de  $MP_{2.5}$  en Lima Centro. Específicamente, los distritos que

presentaron patrones locales y áreas de alta de concentración de  $MP_{2.5}$  fueron los distritos de Chorrillos, Santiago de Surco y San Juan de Miraflores.

**Figura 11**

*Patrones locales y áreas de concentración por distrito de  $MP_{2.5}$*



*Nota.* El mapa de calor fue calculado con el índice  $G_i^*$  de Getis-Ord. Las áreas en rojo indican áreas de alta concentración de  $MP_{2.5}$ , mientras que los áreas en azul indican áreas de baja concentración. Los patrones locales se representan categorías que indican si un distrito tiene una alta o baja concentración de  $MP_{2.5}$  y si está rodeado por otros distritos con una alta o baja concentración.

#### 4.5. Coocurrencia de clústers

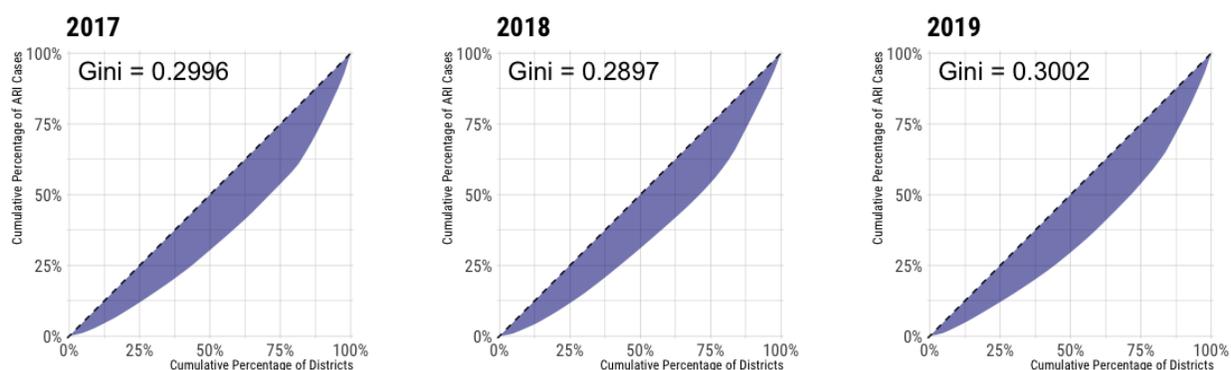
No se observó una coocurrencia estadísticamente significativa de clústers de casos de infecciones respiratorias agudas y cobertura de áreas verdes ( $W$  de Kendall = 0.442,  $p = 0.823$ ), pero sí de casos de infecciones respiratorias agudas y  $MP_{2.5}$  ( $W$  de Kendall = 0.754,  $p = 0.001$ ) y de las tres variables combinadas ( $W$  de Kendall = 0.482,  $p = 0.005$ ).

#### 4.6. Índice de inequidad

Se observó una moderada concentración de casos de infecciones respiratorias agudas en los distritos de Lima (rango del índice de Gini entre 2017 y 2019 = 0.2897-0.3002) (**Figura 12**).

**Figura 12**

*Desigualdad de casos de infecciones respiratorias agudas en los distritos de Lima, 2017-2019*



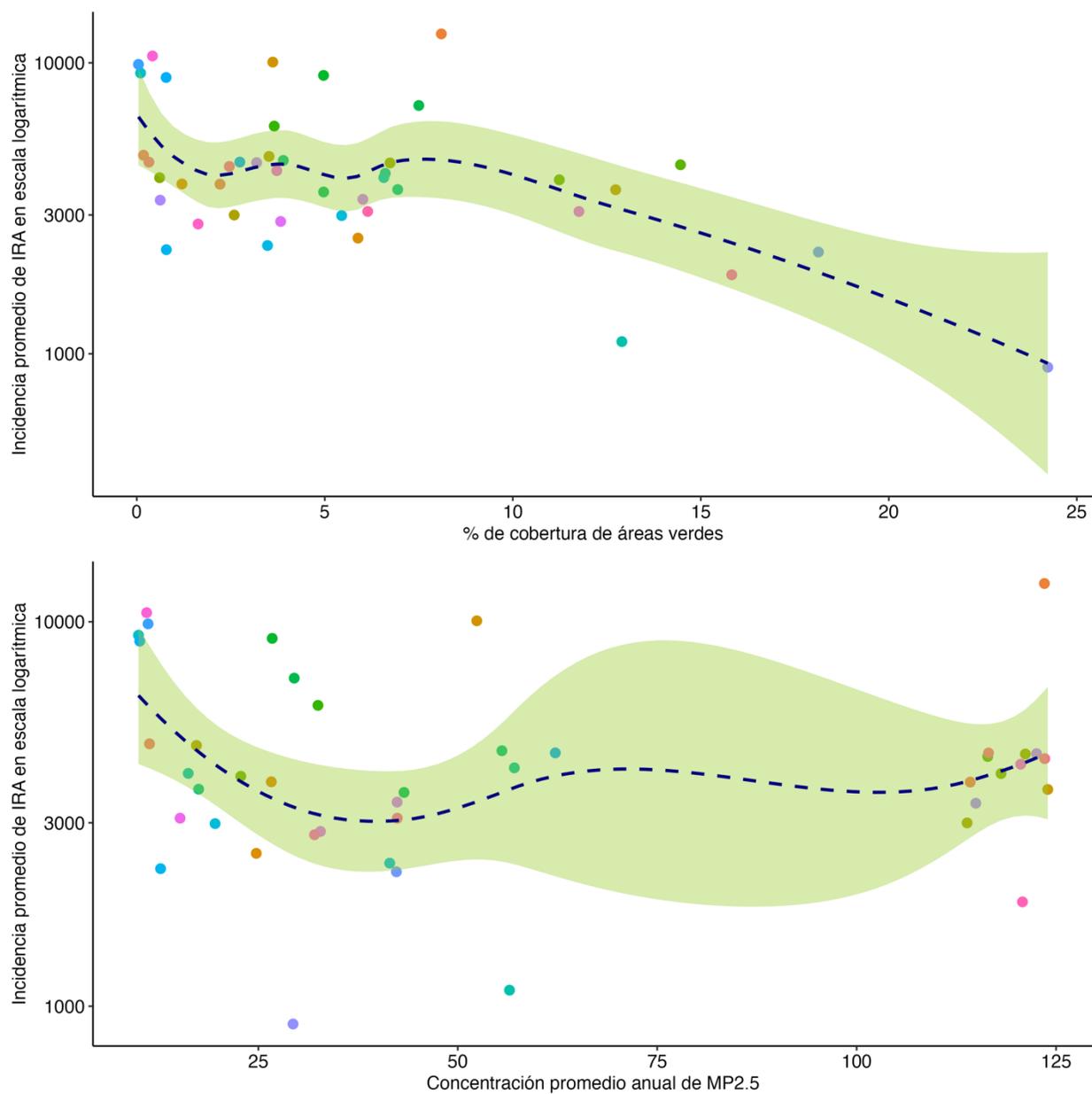
*Nota.* La curva de Lorenz representa la distribución real de los casos de infecciones respiratorias agudas en los distritos de Lima y su desviación de la línea diagonal indica el nivel de inequidad en la distribución de estos casos. La distancia entre la línea diagonal y la curva de Lorenz indica el nivel de desigualdad en la distribución de los casos de infecciones respiratorias agudas en los distritos de Lima. Cuanto mayor sea la distancia entre la curva de Lorenz y la línea diagonal, mayor será el nivel de inequidad en la distribución de los casos de infecciones respiratorias agudas en los diferentes distritos de Lima.

#### 4.7. Análisis bivariado

La **Figura 13** muestra los resultados de la distribución bivariada de la incidencia de infecciones respiratorias según la concentración de  $MP_{2.5}$  y la cobertura de áreas verdes. Se observa una relación inversa entre la cobertura de áreas verdes y la incidencia de infecciones respiratorias. Sin embargo, no se observa una relación clara entre la concentración de  $MP_{2.5}$  y la incidencia de infecciones respiratorias.

**Figura 13**

*Relación entre la incidencia distrital de infecciones respiratorias, áreas verdes y  $MP_{2.5}$*



*Nota.* Los puntos en colores representan los distritos de Lima, distribuidos en el eje de abscisas (porcentaje de cobertura de áreas verdes y concentración de  $MP_{2.5}$ ) y ordenada ( $\log$  de casos por 10 000 niños). La línea discontinua azul representa una línea de regresión *spline*; y la banda verde, el intervalo de confianza al 95 %.

#### 4.8. Modelo de efectos mixtos

El modelo de efectos mixtos mostró que los distritos con una cobertura extensa de áreas verdes estuvieron asociados con un menor riesgo de infecciones respiratorias agudas en los niños (RR: 0.51, IC 95 %: 0.30 - 0.85). La estimación no varió luego de ser ajustada por la concentración de MP<sub>2.5</sub>, el índice de pobreza, la densidad poblacional y los efectos aleatorios espaciotemporales (ubicación geográfica y año).

**Tabla 2**

*Estimaciones del modelo binomial negativo bayesiano con efectos mixtos espaciotemporales*

Cobertura de áreas verdes en el distrito	No ajustado			Ajustado		
	RR	DE	IC 95 %	RR	DE	IC 95 %
Limitada (<10 % de superficie)	Ref.			Ref.		
Extensa (≥10 % de superficie)	0.51	0.18	<b>0.36 - 0.73</b>	0.51	0.27	<b>0.30 - 0.85</b>

*Nota.* RR: riesgo relativo, DE: desviación estándar, IC 95 %: intervalo de confianza al 95 %, Ref.: valor de referencia. El modelo fue ajustado por la concentración de MP<sub>2.5</sub>, índice de pobreza, densidad poblacional y los efectos aleatorios espaciotemporales (ubicación geográfica y año).

## V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Hasta donde se sabe, este es el primer estudio peruano que investiga la influencia de las áreas verdes en la salud respiratoria de los niños. Se pudo evidenciar que la cobertura distrital de áreas verdes está asociada con el riesgo de infecciones respiratorias agudas en esta población. Específicamente, se encontró que los distritos con una cobertura extensa de áreas verdes tenían un menor riesgo de infecciones respiratorias agudas en comparación con los distritos con cobertura limitada. Esta asociación fue controlada por otros factores de importancia, incluyendo la concentración de  $MP_{2.5}$ , el índice de pobreza distrital y la densidad poblacional de niños menores de cinco años, lo que sugiere que la asociación encontrada es independiente de estos factores.

Los resultados sugieren que la cobertura de áreas verdes en un entorno urbano puede tener un efecto protector en las infecciones respiratorias, lo que es consistente con la evidencia de estudios previos en niños (Squillacioti et al., 2020) y adultos (Bernat et al., 2016; Maas et al., 2009; Prist et al., 2016; Shen y Lung, 2017; Sun et al., 2020; Wu et al., 2021). Sin embargo, es necesario destacar que otros estudios en niños tuvieron estimaciones no significativas e inconsistentes (Li et al., 2019; Tischer et al., 2017). En general, la mayoría de estos estudios presentaron asociaciones marginales y se les atribuye un alto riesgo de sesgo por el uso de diseños limitados (Mueller et al., 2022). Esto se puede deber a que la medición de las áreas verdes suele ser compleja. Los estudios previos comúnmente han empleado un diseño ecológico con datos satelitales, los cuales permiten medir las áreas verdes a través del NDVI u otros indicadores. El presente estudio adoptó la misma metodología, pero también aplicó una variante de los estudios de cohorte para atribuir temporalidad y con ello una relación causal más clara. El estudio también se diferencia por el uso de un modelo de regresión más robusto, el cual mejora la predicción de la incertidumbre al controlar factores altamente complejos como los relacionados con la variabilidad espaciotemporal.

A pesar de la poca evidencia empírica en infecciones respiratorias, el presente estudio refuerza la hipótesis de que las áreas verdes pueden proteger a los niños contra estas enfermedades. A través de la reducción de los contaminantes aéreos, la exposición frecuente a las áreas verdes mejoraría el *clearance* de las vías respiratorias, disminuiría su inflamación y conservaría la función celular inmunológica (Mueller et al., 2022). Además, es bastante conocido que las áreas verdes pueden promover estilos de vida activos y saludables, lo que también puede contribuir a la prevención de enfermedades respiratorias (Mueller et al., 2022). Finalmente, las áreas verdes han mostrado tener un efecto positivo en el bienestar mental y emocional (White et al., 2021), lo que puede fortalecer el sistema inmunológico y reducir la susceptibilidad a las infecciones (Mueller et al., 2022). Sin embargo, es importante notar que algunos estudios sugieren que las áreas verdes pueden generar un efecto inverso por la presencia de alérgenos como el polen, los cuales inflaman las vías respiratorias y predisponen a enfermedades como el asma, un detonante de posibles infecciones (Sharma et al., 2022). Aún así, se debe mejorar la investigación para determinar la posible relación dosis-respuesta que genera la exposición a las áreas verdes, así como su estudio en diferentes grupos de niños, como aquellos con asma.

La influencia de las áreas verdes sobre la concentración de  $MP_{2.5}$  no pudo ser determinada en este estudio. Sin embargo, ya existe evidencia al respecto. Un estudio ecológico realizado durante la pandemia de COVID-19 determinó que los países con mayor verdor disminuían significativamente la concentración de  $MP_{2.5}$  y otros contaminantes aéreos (Meo et al., 2021). Más aún, se ha observado que la cobertura de áreas verdes, en especial de árboles, tiene una mejor respuesta en entornos con mayor contaminación (Chen et al., 2019). Es necesario que futuros estudios en el contexto peruano puedan determinar un análisis más robusto, como los realizados mediante modelos de ecuaciones estructurales (Shen y Lung, 2017), para confirmar el efecto

mediador de las áreas verdes sobre las infecciones respiratorias. Desafortunadamente, un aspecto no menos llamativo en este estudio fue la distribución desigual de áreas verdes en los distritos de Lima. Esta heterogeneidad en la distribución refleja la desigualdad socioeconómica y de políticas públicas en la ciudad (Avelar et al., 2019). Los distritos con mayor presencia de áreas verdes suelen ser aquellos con mayores recursos y una planificación urbana más eficiente. En contraste, los distritos con menor cantidad de espacios verdes a menudo corresponden a áreas con una infraestructura urbana menos desarrollada y con recursos más limitados. Estas discrepancias ponen de manifiesto la necesidad de políticas urbanísticas más equitativas que fomenten la creación y conservación de áreas verdes.

Pese a los resultados favorables, el estudio presenta algunas limitaciones. Primero, existe el sesgo de selección, dado que las personas que eligen vivir cerca de áreas verdes podrían diferir de las que no lo hacen, lo que podría conllevar a factores de confusión no considerados en el análisis. En segundo lugar, se presenta el sesgo de medición, en el que la medida de la cobertura de áreas verdes puede no reflejar completamente la exposición real de las personas a estas áreas, ya que no considera cómo interactúan las personas con ellas. Además, existen variables no medidas que pueden influir en el análisis, como otros tipos de contaminantes aéreos (por ejemplo,  $MP_{10}$ ,  $NO_2$  y  $O_3$ ), el estilo de vida o las características de la vivienda. Otro aspecto a considerar es la causalidad inversa, dado que es posible que las familias que tienen una mejor salud sean más propensas a elegir vivir cerca de áreas verdes, en lugar de que la exposición a las áreas verdes conduzca directamente a una mejor salud. Además, los resultados del estudio podrían no ser generalizables a otras poblaciones que viven en diferentes contextos ambientales o culturales. Finalmente, los datos agrupados pueden generar conclusiones no aplicables a un individuo al no considerar las diferencias en exposición y susceptibilidad individual.

No obstante, el estudio tiene fortalezas que contribuyen a la solidez de sus resultados. El diseño ecológico de cohorte permite evaluar la relación entre la exposición a la densidad de áreas verdes y el riesgo de infecciones respiratorias en un período de tiempo determinado. Además, se ajustaron factores de confusión potenciales en el análisis. El estudio también utilizó una gran cantidad de datos, lo que aumenta la validez y la generalización de los resultados a la población. Asimismo, el modelo de regresión bayesiana negativa con efectos mixtos permitió controlar factores espaciotemporales no medidos, lo cual mejora la precisión de las estimaciones. En especial, el modelo se ajustó por la concentración de  $MP_{2.5}$ , un contaminante atmosférico comúnmente relacionado con enfermedades respiratorias. Por último, el estudio permite la replicabilidad de su metodología al ofrecer datos de acceso libre y procedimientos detallados para la generación de variables complejas.

Los resultados del estudio tienen implicancias importantes para la salud pública. En primer lugar, sugieren que la creación o mantenimiento de áreas verdes en áreas urbanas podría tener un impacto positivo en la salud respiratoria de los niños, por lo que es importante que los planificadores urbanos consideren la inclusión de áreas verdes en sus diseños. En segundo lugar, fomentar el acceso a áreas verdes podría ser importante para reducir el riesgo de infecciones respiratorias, especialmente en áreas urbanas que pueden tener menos áreas verdes disponibles. En tercer lugar, se destaca la importancia de educar a la población sobre los beneficios de las áreas verdes para la salud respiratoria, para que más personas y sus hijos puedan buscar activamente estos espacios y utilizarlos de manera efectiva. Por último, la contaminación del aire sigue siendo un problema de salud creciente en muchas áreas urbanas, por lo que este estudio resalta la necesidad de políticas urgentes para su mitigación.

## VI. CONCLUSIONES

Este estudio evidencia una asociación entre la cobertura de áreas verdes en los distritos de Lima y el riesgo de infecciones respiratorias agudas en niños menores de cinco años. Este vínculo persiste incluso tras ajustar factores como la concentración de  $MP_{2.5}$ , el índice de pobreza distrital, la densidad poblacional de niños y los efectos espaciotemporales aleatorios. De estos hallazgos se desprende la importancia de las áreas verdes en la planificación urbana. Fomentar su accesibilidad podría mejorar la salud respiratoria de la población. Sin embargo, aún es crucial seguir investigando en este campo. Un entendimiento más profundo de la relación entre la exposición a áreas verdes y la salud respiratoria permitirá diseñar intervenciones más eficaces y pertinentes en contextos urbanos. Este estudio reafirma el valor de las áreas verdes como recurso crucial para la salud pública.

## VII.RECOMENDACIONES

En base a los resultados del estudio, se proponen las siguientes recomendaciones:

1. Promover la planificación urbana orientada a la creación y conservación de áreas verdes.
2. Fomentar el acceso a estas áreas verdes, asegurando su disponibilidad para todos los habitantes.
3. Implementar campañas de educación para informar a la población sobre los beneficios de las áreas verdes en la salud respiratoria.
4. Abordar de manera activa la contaminación del aire en áreas urbanas, en paralelo a la creación y conservación de espacios verdes.
5. Integrar estos enfoques en las políticas de salud pública para reducir el riesgo de infecciones respiratorias.
6. Continuar con la investigación en este campo para determinar más precisamente los mecanismos subyacentes de la asociación observada en este estudio.
7. Evaluar la efectividad de intervenciones basadas en áreas verdes en la prevención de enfermedades respiratorias a través de futuros estudios longitudinales y ensayos controlados.

## VIII. REFERENCIAS

- Aronson, S. S., y Shope, T. R. (Eds.). (2020). *Managing Infectious Diseases in Child Care and Schools, 5th Ed: A Quick Reference Guide*. American Academy of Pediatrics.  
<https://doi.org/10.1542/9781610020510>
- Avelar, S., Zah, R., y Tavares-Corrêa, C. (2009). Linking socioeconomic classes and land cover data in Lima, Peru: Assessment through the application of remote sensing and GIS. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 11(1), 27–37.  
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2008.05.001>
- Bateson, T. F., y Schwartz, J. (2007). Children's Response to Air Pollutants. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 71(3), 238–243.  
<https://doi.org/10.1080/15287390701598234>
- Becker, S., y Soukup, J. M. (1999). Exposure to urban air particulates alters the macrophage-mediated inflammatory response to respiratory viral infection. *Journal of Toxicology and Environmental Health. Part A*, 57(7), 445–457. <https://doi.org/10.1080/009841099157539>
- Bernat, A., Marozas, V., y Žalkauskas, R. (2016). The relation of forest and air pollution with human health in urban territories of Lithuania. *Acta Biologica Universitatis Daugavpiliensis*, 16(2), 155–163.  
[https://www.researchgate.net/publication/314116212\\_The\\_relation\\_of\\_forest\\_and\\_air\\_pollution\\_with\\_human\\_health\\_in\\_urban\\_territories\\_of\\_Lithuania](https://www.researchgate.net/publication/314116212_The_relation_of_forest_and_air_pollution_with_human_health_in_urban_territories_of_Lithuania)
- Blangiardo, M., Cameletti, M., Baio, G., y Rue, H. (2013). Spatial and spatio-temporal models with R-INLA. *Spatial and Spatio-Temporal Epidemiology*, 7, 39–55.  
<https://doi.org/10.1016/j.sste.2013.07.003>

- Bonyadi, Z., Ehrampoush, M. H., Ghaneian, M. T., Mokhtari, M., y Sadeghi, A. (2016). Cardiovascular, respiratory, and total mortality attributed to PM2.5 in Mashhad, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(10), 570. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5574-y>
- Brook, R. D., Rajagopalan, S., Pope, C. A., Brook, J. R., Bhatnagar, A., Diez-Roux, A. V., Holguin, F., Hong, Y., Luepker, R. V., Mittleman, M. A., Peters, A., Siscovick, D., Smith, S. C., Whitsel, L., y Kaufman, J. D. (2010). Particulate Matter Air Pollution and Cardiovascular Disease. *Circulation*, 121(21), 2331–2378. <https://doi.org/10.1161/CIR.0b013e3181d8e3e1>
- Brunekreef, B., Annesi-Maesano, I., Ayres, J. G., Forastiere, F., Forsberg, B., Künzli, N., Pekkanen, J., y Sigsgaard, T. (2012). Ten principles for clean air. *European Respiratory Journal*, 39(3), 525–528. <https://doi.org/10.1183/09031936.00001112>
- Burns, J., Boogaard, H., Polus, S., Pfadenhauer, L. M., Rohwer, A. C., van Erp, A. M., Turley, R., y Rehfuss, E. (2019). Interventions to reduce ambient particulate matter air pollution and their effect on health. *The Cochrane Database of Systematic Reviews*, 5(5), CD010919. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD010919.pub2>
- Burns, J., Boogaard, H., Polus, S., Pfadenhauer, L. M., Rohwer, A. C., van Erp, A. M., Turley, R., y Rehfuss, E. A. (2020). Interventions to reduce ambient air pollution and their effects on health: An abridged Cochrane systematic review. *Environment International*, 135, 105400. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105400>
- Carrasco-Escobar, G., Schwalb, A., Tello-Lizarraga, K., Vega-Guerovich, P., y Ugarte-Gil, C. (2020). Spatio-temporal co-occurrence of hotspots of tuberculosis, poverty and air

- pollution in Lima, Peru. *Infectious Diseases of Poverty*, 9(1), 32. <https://doi.org/10.1186/s40249-020-00647-w>
- Centro Nacional de Epidemiología, Prevención y Control de Enfermedades. (2023). *Boletines epidemiológicos*. <https://www.dge.gob.pe/portalnuevo/publicaciones/boletines-epidemiologicos/>
- Chen, M., Dai, F., Yang, B., y Zhu, S. (2019). Effects of neighborhood green space on PM2.5 mitigation: Evidence from five megacities in China. *Building and Environment*, 156, 33–45. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.03.007>
- Chiesura, A. (2004). The role of urban parks for the sustainable city. *Landscape and Urban Planning*, 68(1), 129–138. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2003.08.003>
- Cohen, S. (1999). Social Status and Susceptibility to Respiratory Infections. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 896(1), 246–253. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1999.tb08119.x>
- Dehghan, A., Khanjani, N., Bahrapour, A., Goudarzi, G., y Yunesian, M. (2018). The relation between air pollution and respiratory deaths in Tehran, Iran- using generalized additive models. *BMC Pulmonary Medicine*, 18(1), 49. <https://doi.org/10.1186/s12890-018-0613-9>
- Dellinger, B., Pryor, W. A., Cueto, R., Squadrito, G. L., Hegde, V., y Deutsch, W. A. (2001). Role of free radicals in the toxicity of airborne fine particulate matter. *Chemical Research in Toxicology*, 14(10), 1371–1377. <https://doi.org/10.1021/tx010050x>
- Dickson, R. P., Erb-Downward, J. R., Martinez, F. J., y Huffnagle, G. B. (2016). The Microbiome and the Respiratory Tract. *Annual Review of Physiology*, 78(1), 481–504. <https://doi.org/10.1146/annurev-physiol-021115-105238>

- Diener, A., y Mudu, P. (2021). How can vegetation protect us from air pollution? A critical review on green spaces' mitigation abilities for air-borne particles from a public health perspective - with implications for urban planning. *Science of The Total Environment*, 796, 148605. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148605>
- Dunson, D. B. (2001). Commentary: Practical Advantages of Bayesian Analysis of Epidemiologic Data. *American Journal of Epidemiology*, 153(12), 1222–1226. <https://doi.org/10.1093/aje/153.12.1222>
- Esposito, S., Galeone, C., Lelii, M., Longhi, B., Ascolese, B., Senatore, L., Prada, E., Montinaro, V., Malerba, S., Patria, M. F., y Principi, N. (2014). Impact of air pollution on respiratory diseases in children with recurrent wheezing or asthma. *BMC Pulmonary Medicine*, 14(1), 130. <https://doi.org/10.1186/1471-2466-14-130>
- Etzel R, Chen D, Halonen M, Holladay S, Jarabek A M, Landreth K, Peden D B, Pinkerton K, Smialowicz R J, y Zoetis T. (2000). Workshop to identify critical windows of exposure for children's health: Immune and respiratory systems work group summary. *Environmental Health Perspectives*, 108(suppl 3), 483–490. <https://doi.org/10.1289/ehp.00108s3483>
- European Space Agency. (2023). *Sentinel Online*. <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/home>
- Ewald, P. W. (2004). Evolution of virulence. *Historical Aspects of Infectious Diseases, Part I*, 18(1), 1–15. [https://doi.org/10.1016/S0891-5520\(03\)00099-0](https://doi.org/10.1016/S0891-5520(03)00099-0)
- Feng, S., Gao, D., Liao, F., Zhou, F., y Wang, X. (2016). The health effects of ambient PM2.5 and potential mechanisms. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 128, 67–74. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.01.030>

- Ferrante, G., Fasola, S., Cilluffo, G., Piacentini, G., Viegi, G., y La Grutta, S. (2022). Addressing Exposome: An Innovative Approach to Environmental Determinants in Pediatric Respiratory Health. *Frontiers in Public Health*, 10. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpubh.2022.871140>
- Fondell, E., Lagerros, Y. T., Sundberg, C. J., Lekander, M., Balter, O., Rothman, K. J., y Balter, K. (2011). Physical Activity, Stress, and Self-Reported Upper Respiratory Tract Infection. *Medicine y Science in Sports y Exercise*, 43(2). [https://journals.lww.com/acsm-msse/Fulltext/2011/02000/Physical\\_Activity,\\_Stress,\\_and\\_Self\\_Reported\\_Upper.11.aspx](https://journals.lww.com/acsm-msse/Fulltext/2011/02000/Physical_Activity,_Stress,_and_Self_Reported_Upper.11.aspx)
- Fuller, R., Landrigan, P. J., Balakrishnan, K., Bathan, G., Bose-O'Reilly, S., Brauer, M., Caravanos, J., Chiles, T., Cohen, A., Corra, L., Cropper, M., Ferraro, G., Hanna, J., Hanrahan, D., Hu, H., Hunter, D., Janata, G., Kupka, R., Lanphear, B., ... Yan, C. (2022). Pollution and health: A progress update. *The Lancet Planetary Health*, 6(6), e535–e547. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(22\)00090-0](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(22)00090-0)
- General Assembly of the United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development* | Department of Economic and Social Affairs. <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- Gilks, W. R., Richardson, S., y Spiegelhalter, D. (1995). *Markov Chain Monte Carlo in Practice*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b14835>
- Gouveia, N., Junger, W. L., y ESCALA investigators. (2018). Effects of air pollution on infant and children respiratory mortality in four large Latin-American cities. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)*, 232, 385–391. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.125>

- Grigg, J. (2018). Air Pollution and Respiratory Infection: An Emerging and Troubling Association. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 198(6), 700–701. <https://doi.org/10.1164/rccm.201804-0614ED>
- Grilo, F., Pinho, P., Aleixo, C., Catita, C., Silva, P., Lopes, N., Freitas, C., Santos-Reis, M., McPhearson, T., y Branquinho, C. (2020). Using green to cool the grey: Modelling the cooling effect of green spaces with a high spatial resolution. *Science of The Total Environment*, 724, 138182. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138182>
- Haaland, C., y van den Bosch, C. K. (2015). Challenges and strategies for urban green-space planning in cities undergoing densification: A review. *Urban Forestry y Urban Greening*, 14(4), 760–771. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.07.009>
- Hammer, M. S., van Donkelaar, A., Li, C., Lyapustin, A., Sayer, A. M., Hsu, N. C., Levy, R. C., Garay, M. J., Kalashnikova, O. V., Kahn, R. A., Brauer, M., Apte, J. S., Henze, D. K., Zhang, L., Zhang, Q., y Ford, B. (2022). *Global Annual PM2.5 Grids from MODIS, MISR and SeaWiFS Aerosol Optical Depth (AOD), 1998-2019, V4.GL.03*. NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC). <https://doi.org/10.7927/fx80-4n39>
- Hammer, M. S., van Donkelaar, A., Li, C., Lyapustin, A., Sayer, A. M., Hsu, N. C., Levy, R. C., Garay, M. J., Kalashnikova, O. V., Kahn, R. A., Brauer, M., Apte, J. S., Henze, D. K., Zhang, L., Zhang, Q., Ford, B., Pierce, J. R., y Martin, R. V. (2020). Global Estimates and Long-Term Trends of Fine Particulate Matter Concentrations (1998–2018). *Environmental Science y Technology*, 54(13), 7879–7890. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c01764>
- Horne, B. D., Joy, E. A., Hofmann, M. G., Gesteland, P. H., Cannon, J. B., Lefler, J. S., Blagev, D. P., Korgenski, E. K., Torosyan, N., Hansen, G. I., Kartchner, D., y Pope, C. A. (2018). Short-Term Elevation of Fine Particulate Matter Air Pollution and Acute Lower

- Respiratory Infection. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 198(6), 759–766. <https://doi.org/10.1164/rccm.201709-1883OC>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2017a). *Ficha técnica del Censo de Población y Vivienda* 2017. <https://censos2017.inei.gob.pe/pubinei/censos/Cpv2017/Fichacensal2017.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2017b). *Informe de los censos nacionales 2017: Características de la población*. [https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1539/cap01.pdf](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1539/cap01.pdf)
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2019). *Compendio estadístico de Lima 2019*. [https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1714/Libro.pdf](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1714/Libro.pdf)
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2023). *Encuesta Nacional de Hogares (ENAHO)*. <https://www.gob.pe/institucion/inei/campa%3%B1as/8600-encuesta-nacional-de-hogares-enaho>
- Janhäll, S. (2015). Review on urban vegetation and particle air pollution – Deposition and dispersion. *Atmospheric Environment*, 105, 130–137. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.01.052>
- Jennings, V., Gragg, R. S., Brown, C. P., Hartel, D., Kuehler, E., Sinykin, A., Johnson, E., y Kondo, M. (2019). Structural Characteristics of Tree Cover and the Association with Cardiovascular and Respiratory Health in Tampa, FL. *Journal of Urban Health: Bulletin of the New York Academy of Medicine*, 96(5), 669–681. <https://doi.org/10.1007/s11524-019-00380-2>

- Johnson, N. M., Hoffmann, A. R., Behlen, J. C., Lau, C., Pendleton, D., Harvey, N., Shore, R., Li, Y., Chen, J., Tian, Y., y Zhang, R. (2021). Air pollution and children's health—A review of adverse effects associated with prenatal exposure from fine to ultrafine particulate matter. *Environmental Health and Preventive Medicine*, 26(1), 72. <https://doi.org/10.1186/s12199-021-00995-5>
- Kaan, P. M., y Hegele, R. G. (2003). Interaction between respiratory syncytial virus and particulate matter in guinea pig alveolar macrophages. *American Journal of Respiratory Cell and Molecular Biology*, 28(6), 697–704. <https://doi.org/10.1165/rcmb.2002-0115OC>
- Kampa, M., y Castanas, E. (2008). Human health effects of air pollution. *Proceedings of the 4th International Workshop on Biomonitoring of Atmospheric Pollution (With Emphasis on Trace Elements)*, 151(2), 362–367. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.06.012>
- Kimberlin, D. W., Brady, M. T., Long, S. S., y Jackson, M. A. (2021). *Red Book 2018-2021: Report of the Committee on Infectious Diseases*. American Academy of Pediatrics. <https://books.google.com.pe/books?id=SIrJtAEACAAJ>
- Klompaker, J. O., Laden, F., Browning, M. H. E. M., Dominici, F., Ogletree, S. S., Rigolon, A., Hart, J. E., y James, P. (2022). Associations of parks, greenness, and blue space with cardiovascular and respiratory disease hospitalization in the US Medicare cohort. *Environmental Pollution*, 312, 120046. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120046>
- Koepsell, T. D., y Weiss, N. S. (2014). Ecological Studies. In T. D. Koepsell y N. S. Weiss (Eds.), *Epidemiologic Methods: Studying the Occurrence of Illness* (Second, pp. 451–453). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195150780.003.0012>
- Krzyzanowski, M., y Cohen, A. (2008). Update of WHO air quality guidelines. *Air Quality, Atmosphere y Health*, 1(1), 7–13. <https://doi.org/10.1007/s11869-008-0008-9>

- Kurt, O. K., Zhang, J., y Pinkerton, K. E. (2016). Pulmonary health effects of air pollution. *Current Opinion in Pulmonary Medicine*, 22(2). [https://journals.lww.com/co-pulmonarymedicine/Fulltext/2016/03000/Pulmonary\\_health\\_effects\\_of\\_air\\_pollution.10.aspx](https://journals.lww.com/co-pulmonarymedicine/Fulltext/2016/03000/Pulmonary_health_effects_of_air_pollution.10.aspx)
- Lambert, K. A., Bowatte, G., Tham, R., Lodge, C. J., Prendergast, L. A., Heinrich, J., Abramson, M. J., Dharmage, S. C., y Erbas, B. (2018). Greenspace and Atopic Sensitization in Children and Adolescents-A Systematic Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(11), 2539. <https://doi.org/10.3390/ijerph15112539>
- Lambert, K. A., Bowatte, G., Tham, R., Lodge, C., Prendergast, L., Heinrich, J., Abramson, M. J., Dharmage, S. C., y Erbas, B. (2017). Residential greenness and allergic respiratory diseases in children and adolescents—A systematic review and meta-analysis. *Environmental Research*, 159, 212–221. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.08.002>
- Lee, A. C. K., y Maheswaran, R. (2011). The health benefits of urban green spaces: A review of the evidence. *Journal of Public Health (Oxford, England)*, 33(2), 212–222. <https://doi.org/10.1093/pubmed/fdq068>
- Lelieveld, J., Evans, J. S., Fnais, M., Giannadaki, D., y Pozzer, A. (2015). The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature*, 525(7569), 367–371. <https://doi.org/10.1038/nature15371>
- Li, L., Hart, J. E., Coull, B. A., Cao, S., Spengler, J. D., y Adamkiewicz, G. (2019). Effect of Residential Greenness and Nearby Parks on Respiratory and Allergic Diseases among Middle School Adolescents in a Chinese City. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(6). <https://doi.org/10.3390/ijerph16060991>

- Lovie-Toon, Y. G., Chang, A. B., Newcombe, P. A., Vagenas, D., Anderson-James, S., Drescher, B. J., Otim, M. E., y O'Grady, K.-A. F. (2018). Longitudinal study of quality of life among children with acute respiratory infection and cough. *Quality of Life Research: An International Journal of Quality of Life Aspects of Treatment, Care and Rehabilitation*, 27(4), 891–903. <https://doi.org/10.1007/s11136-017-1779-y>
- Maas, J., Verheij, R. A., de Vries, S., Spreeuwenberg, P., Schellevis, F. G., y Groenewegen, P. P. (2009). Morbidity is related to a green living environment. *Journal of Epidemiology and Community Health*, 63(12), 967. <https://doi.org/10.1136/jech.2008.079038>
- Marciniuk, D., Schraufnagel, D., Ferkol, T., Fong, K., Joos, G., y Varela, V. (2017). *Forum of International Respiratory Societies. The Global Impact of Respiratory Disease—Second Edition*. Sheffield, European Respiratory Society, 2017. [https://static.physoc.org/app/uploads/2019/04/22192917/The\\_Global\\_Impact\\_of\\_Respiratory\\_Disease.pdf](https://static.physoc.org/app/uploads/2019/04/22192917/The_Global_Impact_of_Respiratory_Disease.pdf)
- Mariani, J., Favero, C., Spinazzè, A., Cavallo, D. M., Carugno, M., Motta, V., Bonzini, M., Cattaneo, A., Pesatori, A. C., y Bollati, V. (2018). Short-term particulate matter exposure influences nasal microbiota in a population of healthy subjects. *Environmental Research*, 162, 119–126. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.12.016>
- Markevych, I., Schoierer, J., Hartig, T., Chudnovsky, A., Hystad, P., Dzhambov, A. M., de Vries, S., Triguero-Mas, M., Brauer, M., Nieuwenhuijsen, M. J., Lupp, G., Richardson, E. A., Astell-Burt, T., Dimitrova, D., Feng, X., Sadeh, M., Standl, M., Heinrich, J., y Fuentes, E. (2017). Exploring pathways linking greenspace to health: Theoretical and methodological guidance. *Environmental Research*, 158, 301–317. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.06.028>

- McDonald, R., Kroeger, T., Boucher, T., LongZhu, W., y Salem, R. (2016). Planting healthy air: A global analysis of the role of urban trees in addressing particulate matter pollution and extreme heat. *Planting Healthy Air: A Global Analysis of the Role of Urban Trees in Addressing Particulate Matter Pollution and Extreme Heat*. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20163365297>
- McKinney, M. L. (2006). Urbanization as a major cause of biotic homogenization. *Urbanization*, 127(3), 247–260. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2005.09.005>
- Mehta, S., Shin, H., Burnett, R., North, T., y Cohen, A. J. (2013). Ambient particulate air pollution and acute lower respiratory infections: A systematic review and implications for estimating the global burden of disease. *Air Quality, Atmosphere y Health*, 6(1), 69–83. <https://doi.org/10.1007/s11869-011-0146-3>
- Meo, S. A., Almutairi, F. J., Abukhalaf, A. A., y Usmani, A. M. (2021). Effect of Green Space Environment on Air Pollutants PM2.5, PM10, CO, O3, and Incidence and Mortality of SARS-CoV-2 in Highly Green and Less-Green Countries. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(24), 13151. <https://doi.org/10.3390/ijerph182413151>
- Mhureach, G., Johnson, B. R., Altrichter, A. E., Ladau, J., Meadow, J. F., Pollard, K. S., y Green, J. L. (2016). Urban greenness influences airborne bacterial community composition. *Science of The Total Environment*, 571, 680–687. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.037>
- Mueller, W., Milner, J., Loh, M., Vardoulakis, S., y Wilkinson, P. (2022). Exposure to urban greenspace and pathways to respiratory health: An exploratory systematic review. *Science of The Total Environment*, 829, 154447. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154447>

- Nieman, D. C., y Sakaguchi, C. A. (2022). Physical activity lowers the risk for acute respiratory infections: Time for recognition. *Journal of Sport and Health Science*, 11(6), 648–655. <https://doi.org/10.1016/j.jshs.2022.08.002>
- Perin, J., Mulick, A., Yeung, D., Villavicencio, F., Lopez, G., Strong, K. L., Prieto-Merino, D., Cousens, S., Black, R. E., y Liu, L. (2022). Global, regional, and national causes of under-5 mortality in 2000–19: An updated systematic analysis with implications for the Sustainable Development Goals. *The Lancet Child y Adolescent Health*, 6(2), 106–115. [https://doi.org/10.1016/S2352-4642\(21\)00311-4](https://doi.org/10.1016/S2352-4642(21)00311-4)
- Prist, P. R., Uriarte, M., Tambosi, L. R., Prado, A., Pardini, R., D´Andrea, P. S., y Metzger, J. P. (2016). Landscape, Environmental and Social Predictors of Hantavirus Risk in São Paulo, Brazil. *PLOS ONE*, 11(10), e0163459. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0163459>
- Rojas-Rueda, D., Nieuwenhuijsen, M. J., Gascon, M., Perez-Leon, D., y Mudu, P. (2019). Green spaces and mortality: A systematic review and meta-analysis of cohort studies. *The Lancet. Planetary Health*, 3(11), e469–e477. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(19\)30215-3](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(19)30215-3)
- Romieu, I., Samet, J. M., Smith, K. R., y Bruce, N. (2002). Outdoor air pollution and acute respiratory infections among children in developing countries. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 44(7), 640–649. <https://doi.org/10.1097/00043764-200207000-00010>
- Roth, G. A., Abate, D., Abate, K. H., Abay, S. M., Abbafati, C., Abbasi, N., Abastabar, H., Abd-Allah, F., Abdela, J., Abdelalim, A., Abdollahpour, I., Abdulkader, R. S., Abebe, H. T., Abebe, M., Abebe, Z., Abejie, A. N., Abera, S. F., Abil, O. Z., Abraha, H. N., ... Murray, C. J. L. (2018). Global, regional, and national age-sex-specific mortality for 282 causes of death in 195 countries and territories, 1980–2017: A systematic analysis for the Global

- Burden of Disease Study 2017. *The Lancet*, 392(10159), 1736–1788.  
[https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)32203-7](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)32203-7)
- Ruokolainen, L., Paalanen, L., Karkman, A., Laatikainen, T., von Hertzen, L., Vlasoff, T., Markelova, O., Masyuk, V., Auvinen, P., Paulin, L., Alenius, H., Fyhrquist, N., Hanski, I., Mäkelä, M. J., Zilber, E., Jousilahti, P., Vartiainen, E., y Haahtela, T. (2017). Significant disparities in allergy prevalence and microbiota between the young people in Finnish and Russian Karelia. *Clinical y Experimental Allergy*, 47(5), 665–674.  
<https://doi.org/10.1111/cea.12895>
- Russette, H., Graham, J., Holden, Z., Semmens, E. O., Williams, E., y Landguth, E. L. (2021). Greenspace exposure and COVID-19 mortality in the United States: January–July 2020. *Environmental Research*, 198, 111195. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111195>
- Selway, C. A., Mills, J. G., Weinstein, P., Skelly, C., Yadav, S., Lowe, A., Breed, M. F., y Weyrich, L. S. (2020). Transfer of environmental microbes to the skin and respiratory tract of humans after urban green space exposure. *Environment International*, 145, 106084.  
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106084>
- Sharma, S., Tasnim, N., Agadi, K., Asfeen, U., y Kanda, J. (2022). Vulnerability for Respiratory Infections in Asthma Patients: A Systematic Review. *Cureus*, 14(9), e28839.  
<https://doi.org/10.7759/cureus.28839>
- Shen, Y.-S., y Lung, S.-C. C. (2017). Mediation pathways and effects of green structures on respiratory mortality via reducing air pollution. *Scientific Reports*, 7, 42854.  
<https://doi.org/10.1038/srep42854>
- Sicard, P., Khaniabadi, Y. O., Perez, S., Gualtieri, M., y De Marco, A. (2019). Effect of O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> on cardiovascular and respiratory diseases in cities of France, Iran and Italy.

- Environmental Science and Pollution Research International*, 26(31), 32645–32665.  
<https://doi.org/10.1007/s11356-019-06445-8>
- Siegel, S. J., y Weiser, J. N. (2015). Mechanisms of Bacterial Colonization of the Respiratory Tract. *Annual Review of Microbiology*, 69(1), 425–444. <https://doi.org/10.1146/annurev-micro-091014-104209>
- Simoes, E. A. F., Cherian, T., Chow, J., Shahid-Salles, S. A., Laxminarayan, R., y John, T. J. (2006). Acute Respiratory Infections in Children. In D. T. Jamison, J. G. Breman, A. R. Measham, G. Alleyne, M. Claeson, D. B. Evans, P. Jha, A. Mills, y P. Musgrove (Eds.), *Disease Control Priorities in Developing Countries* (2nd ed.). The International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank.  
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK11786/>
- Simon, A. K., Hollander, G. A., y McMichael, A. (2015). Evolution of the immune system in humans from infancy to old age. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 282(1821), 20143085. <https://doi.org/10.1098/rspb.2014.3085>
- Smith, K. R., Samet, J. M., Romieu, I., y Bruce, N. (2000). Indoor air pollution in developing countries and acute lower respiratory infections in children. *Thorax*, 55(6), 518–532.  
<https://doi.org/10.1136/thorax.55.6.518>
- Soto, M., y Arrasco, J. (2015). *Directiva Sanitaria para la Vigilancia Epidemiológica de las Infecciones Respiratorias Agudas*. <http://bvs.minsa.gob.pe/local/MINSA/3266.pdf>
- Squillaciotti, G., Bellisario, V., Levra, S., Piccioni, P., y Bono, R. (2020). Greenness Availability and Respiratory Health in a Population of Urbanised Children in North-Western Italy. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(1), 108.  
<https://doi.org/10.3390/ijerph17010108>

- Sun, S., Sarkar, C., Kumari, S., James, P., Cao, W., Lee, R. S.-Y., Tian, L., y Webster, C. (2020). Air pollution associated respiratory mortality risk alleviated by residential greenness in the Chinese Elderly Health Service Cohort. *Environmental Research*, 183, 109139. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109139>
- Tian, Y., Liu, H., Wu, Y., Si, Y., Li, M., Wu, Y., Wang, X., Wang, M., Chen, L., Wei, C., Wu, T., Gao, P., y Hu, Y. (2019). Ambient particulate matter pollution and adult hospital admissions for pneumonia in urban China: A national time series analysis for 2014 through 2017. *PLoS Medicine*, 16(12), e1003010. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1003010>
- Tischer, C., Gascon, M., Fernández-Somoano, A., Tardón, A., Lertxundi Materola, A., Ibarluzea, J., Ferrero, A., Estarlich, M., Cirach, M., Vrijheid, M., Fuertes, E., Dalmau-Bueno, A., Nieuwenhuijsen, M. J., Antó, J. M., Sunyer, J., y Dadvand, P. (2017). Urban green and grey space in relation to respiratory health in children. *European Respiratory Journal*, 49(6), 1502112. <https://doi.org/10.1183/13993003.02112-2015>
- Troeger, C. E., Khalil, I. A., Blacker, B. F., Biehl, M. H., Albertson, S. B., Zimsen, S. R. M., Rao, P. C., Abate, D., Admasie, A., Ahmadi, A., Ahmed, M. L. C. B., Akal, C. G., Alahdab, F., Alam, N., Alene, K. A., Alipour, V., Aljunid, S. M., Al-Raddadi, R. M., Alvis-Guzman, N., ... Reiner, R. C. (2020). Quantifying risks and interventions that have affected the burden of lower respiratory infections among children younger than 5 years: An analysis for the Global Burden of Disease Study 2017. *The Lancet Infectious Diseases*, 20(1), 60–79. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(19\)30410-4](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(19)30410-4)
- Wang, H., y Tassinary, L. G. (2019). Effects of greenspace morphology on mortality at the neighbourhood level: A cross-sectional ecological study. *The Lancet. Planetary Health*, 3(11), e460–e468. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(19\)30217-7](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(19)30217-7)

- Welsh, D. A., y Mason, C. M. (2001). Host defense in respiratory infections. *Medical Clinics of North America*, 85(6), 1329–1347. [https://doi.org/10.1016/S0025-7125\(05\)70383-7](https://doi.org/10.1016/S0025-7125(05)70383-7)
- White, M. P., Elliott, L. R., Grellier, J., Economou, T., Bell, S., Bratman, G. N., Cirach, M., Gascon, M., Lima, M. L., Löhmus, M., Nieuwenhuijsen, M., Ojala, A., Roiko, A., Schultz, P. W., van den Bosch, M., y Fleming, L. E. (2021). Associations between green/blue spaces and mental health across 18 countries. *Scientific reports*, 11(1), 8903. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87675-0>
- WHO Regional Office for Europe. (2017). *Urban green spaces: A brief for action*. World Health Organization. Regional Office for Europe. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/344116>
- Wolch, J. R., Byrne, J., y Newell, J. P. (2014). Urban green space, public health, and environmental justice: The challenge of making cities ‘just green enough.’ *Landscape and Urban Planning*, 125, 234–244. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.01.017>
- Wu, J., Yang, M., Xiong, L., Wang, C., y Ta, N. (2021). Health-oriented vegetation community design: Innovation in urban green space to support respiratory health. *Landscape and Urban Planning*, 205, 103973. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103973>
- Ziou, M., Tham, R., Wheeler, A. J., Zosky, G. R., Stephens, N., y Johnston, F. H. (2022). Outdoor particulate matter exposure and upper respiratory tract infections in children and adolescents: A systematic review and meta-analysis. *Environmental Research*, 210, 112969. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.112969>

## IX. ANEXOS

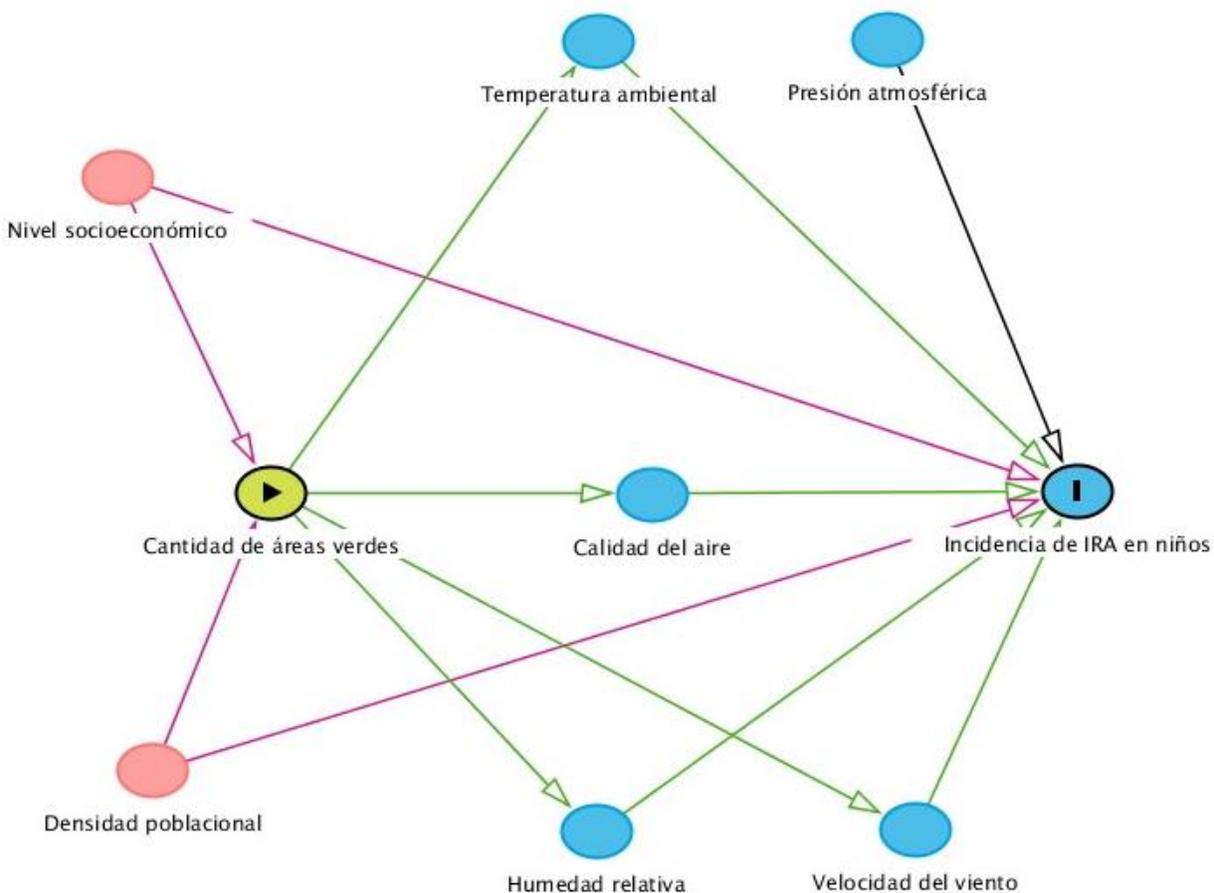
## 9.1. Anexo A. Matriz de consistencia

Problema	Objetivo	Hipótesis	VARIABLES	Método
<p><b>General</b></p> <p>¿Los distritos con extensa cobertura de áreas verdes tienen un menor riesgo de infecciones respiratorias agudas en niños menores de cinco años en los distritos de Lima, Perú?</p> <hr/> <p><b>Específicos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ¿Cuál es el riesgo de infecciones respiratorias agudas en niños en los distritos de Lima?</li> <li>- ¿Cuánta cobertura de áreas verdes hay en los distritos de Lima?</li> <li>- ¿Cuál es la concentración promedio de MP<sub>2.5</sub> en los distritos de Lima?</li> <li>- ¿Cuál es la relación espaciotemporal entre el riesgo de infecciones respiratorias agudas, la cobertura de áreas verdes y la concentración promedio de MP<sub>2.5</sub> en los distritos de Lima?</li> <li>- ¿Qué áreas presentan un alto riesgo de infecciones respiratorias agudas, baja cobertura de áreas verdes y altas concentraciones de MP<sub>2.5</sub> en los distritos de Lima?</li> </ul>	<p><b>General</b></p> <p>Evaluar la asociación entre la cobertura de áreas verdes a nivel distrital y el riesgo de infecciones respiratorias agudas en niños menores de cinco años en los distritos de Lima, Perú</p> <hr/> <p><b>Específicos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Estimar el riesgo de infecciones respiratorias agudas en niños en los distritos de Lima</li> <li>- Identificar y cuantificar la cobertura de áreas verdes en los distritos de Lima</li> <li>- Analizar la correlación espaciotemporal entre el riesgo de infecciones respiratorias agudas, la cobertura de áreas verdes y la concentración promedio de MP<sub>2.5</sub> en los distritos de Lima</li> <li>- Identificar áreas de alto riesgo para infecciones respiratorias agudas, la cobertura de áreas verdes y la concentración promedio de MP<sub>2.5</sub> en los distritos de Lima</li> </ul>	<p>Una extensa cobertura de áreas verdes a nivel distrital está asociada con un menor riesgo de infecciones respiratorias agudas en niños menores de cinco años en los distritos de Lima, Perú.</p>	<p><b>Desenlace</b></p> <p>Riesgo de infecciones respiratorias agudas a nivel distrital</p> <hr/> <p><b>Exposición</b></p> <p>Cobertura de áreas verdes a nivel distrital</p> <hr/> <p><b>Covariables</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Concentración de MP<sub>2.5</sub> a nivel distrital</li> <li>- Índice de pobreza a nivel distrital</li> <li>- Densidad poblacional de niños a nivel distrital</li> </ul>	<p><b>Tipo de investigación</b></p> <p>Estudio ecológico de cohorte basado en un análisis secundario de datos entre 2017-2019</p> <hr/> <p><b>Objeto de estudio</b></p> <p>Distritos de Lima</p> <hr/> <p><b>Instrumentos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Base de datos CDC Minsa (2017-2019)</li> <li>- Sentinel-2 (2017)</li> <li>- Censo nacional (2017)</li> <li>- Base de datos SEDAC NASA (2018)</li> <li>- ENAHO (2018)</li> </ul> <hr/> <p><b>Análisis de datos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Análisis espacial:</i> I global de Moran, Gi* local de Getis-Ord, W de Kendall</li> <li>- <i>Análisis estadístico:</i> Índice de Gini, estimación de riesgo relativo con enfoque bayesiano mediante modelos lineales generalizados de efectos mixtos con distribución binomial negativa.</li> </ul>

## 9.2. Anexo B. Operacionalización de variables

Variable	Definición operacional	Tipo y escala	Categoría/Valor	Fuente
<b>Desenlace</b> Riesgo de infecciones respiratorias agudas a nivel distrital	Número de casos incidentes de infecciones respiratorias agudas sobre la población de niños en el distrito	<b>Numérica discreta, de razón</b>	Casos x 10 000 niños menores de cinco años	CDC Minsa (2017-2019)
<b>Exposición</b> Cobertura de áreas verdes a nivel distrital	Porcentaje de superficie distrital cubierto por áreas verdes	<b>Catagórica, ordinal</b>	Limitada (<10 %) Extensa (≥10 %)	Sentinel-2 (2017)
<b>Covariable</b> Concentración de MP <sub>2.5</sub> a nivel distrital	Concentración promedio de MP <sub>2.5</sub> en la superficie del distrito	<b>Numérica continua, de razón</b>	μg/m <sup>3</sup>	SEDAC NASA (2018)
<b>Covariable</b> Índice de pobreza a nivel distrital	Inverso aditivo de los valores del primer componente principal	<b>Numérica continua, de intervalo</b>	Valor adimensional	ENAH0 (2018)
<b>Covariable</b> Densidad poblacional de niños a nivel distrital	Número de niños que viven en el distrito sobre la superficie distrital	<b>Numérica discreta, de razón</b>	Hab/km <sup>2</sup>	Censo Nacional (2017)

### 9.3. Anexo C. Diagrama causal de las variables estudiadas



*Nota.* Las variables están esquematizadas en un modelo de causa-efecto. El círculo verde representa la exposición; el círculo azul etiquetado, el desenlace; los demás círculos azules, covariables sin relación en el modelo de interés; los círculos rosados, variables confusoras. Este diagrama permite entender qué variables son necesarias en el análisis para controlar el posible efecto confusor y obtener una asociación independiente entre las variables de interés.