



Evaluación de la carga de mortalidad de la contaminación del aire en Lima-Callao

Informe final | 31 de marzo de 2021

Elaborado para:

Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (U.S. Environmental Protection Agency)

Elaborado por:

Industrial Economics, Incorporated

2067 Massachusetts Avenue

Cambridge, MA 02140

617/354-00074

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS

CAPÍTULO 1 | INTRODUCCIÓN

- 1.1 Antecedentes 1-1
- 1.2 Descripción general analítica 1-2
 - 1.2.1 Objetivos de investigación 1-2
 - 1.2.2 Pasos analíticos 1-3
- 1.3 Organización del informe 1-3

CAPÍTULO 2 | DESARROLLO DEL ESCENARIO

CAPÍTULO 3 | ESTIMACIÓN DE LAS EMISIONES

- 3.1 Inventario de emisiones de línea base 3-1
- 3.2 Consideración del incumplimiento 3-3
- 3.3 Resultados de la modelización de las emisiones 3-4

CAPÍTULO 4 | DATOS Y MODELIZACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE

- 4.1 Capas de información de la calidad del aire 4-1
 - 4.1.1 Capa de información de monitoreo de la calidad del aire 4-1
 - 4.1.2 Capa de información de satélites 4-3
 - 4.1.3 Resumen de las capas de información de la calidad del aire 4-3
- 4.2 Modelización de la calidad del aire 4-5

CAPÍTULO 5 | ESTIMACIÓN Y VALORACIÓN DE LA CARGA DE MORTALIDAD

- 5.1 Descripción general del enfoque 5-1
- 5.2 Ingreso de datos 5-2
 - 5.2.1 Población 5-2
 - 5.2.2 Incidencia de mortalidad de referencia 5-2
 - 5.2.3 Funciones de impacto en la salud 5-2
 - 5.2.4 Valoración 5-4

CAPÍTULO 6 | RESULTADOS

- 6.1 Carga de mortalidad total atribuible al PM_{2,5} 6-1
- 6.2 Carga de mortalidad por PM_{2,5} atribuible al transporte 6-2
- 6.3 Carga de mortalidad por PM_{2,5} atribuible a vehículos que no cumplen las normas 6-3

CAPÍTULO 7 | RESUMEN DE RESULTADOS

7.1 Resumen de los resultados 7-1

7.2 Incertidumbres 7-2

7.3 Próximos pasos 7-3

REFERENCIAS

APÉNDICES

Apéndice A | Resultados de las estimaciones de emisiones adicionales

Apéndice B | Procesamiento y mediciones por satélite

Apéndice C | Estimación del impacto en la salud

Apéndice D | Resultados a nivel de distrito

AGRADECIMIENTOS

Industrial Economics, Incorporated (IEc) elaboró este informe para la Oficina de Planificación y Estándares de la Calidad del Aire (OAQPS) de la Agencia de Protección Ambiental de los EE. UU. (US EPA, *por sus siglas en inglés*), conforme al contrato EP-D-14-032 de la USEPA como parte del programa de Colaboración con Megaciudades de la EPA en Lima, Perú. En consonancia con el enfoque de la Colaboración con Megaciudades para la gestión de la calidad del aire, este proyecto fue un esfuerzo de colaboración entre la USEPA, IEc y los colaboradores locales del Ministerio del Ambiente del Perú (MINAM). En particular, IEc agradece el apoyo fundamental de Luis Antonio Ibáñez Guerrero, Katyuska Barja Paredes y Guisselle Castillo Coila del MINAM, que proporcionaron conjuntos de información importante, conocimiento institucional local valioso y consejos útiles. También agradecemos al personal de la USEPA, incluyendo al gerente del Proyecto de Megaciudades en Lima, Paul Almodóvar, así como a Richard Baldauf, Ali Kamal y Ken Davidson por sus aportes al análisis y sus útiles comentarios con respecto a las primeras versiones de este informe.

CAPÍTULO 1 | INTRODUCCIÓN

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) y el Ministerio del Ambiente del Perú (MINAM) contribuyen con la Colaboración con Megaciudades de la USEPA para:

- fortalecer la gestión de la calidad del aire en la región de Lima-Callao mediante la formulación de políticas, extensión a la comunidad y la participación de los interesados;
- apoyar las iniciativas de control de la calidad del aire; y
- crear capacidad técnica en Lima-Callao para los análisis científicos y económicos, y para la planificación de la comunicación para apoyar el desarrollo del plan de gestión de la calidad del aire (AQMP).

Este informe presenta los resultados de las evaluaciones de la carga de mortalidad general actual atribuible a las concentraciones de material particulado fino (PM_{2,5}) en la región. Además de estimar la carga sanitaria total atribuible al PM_{2,5} con respecto a las muertes prematuras, empleamos inventarios de emisiones y técnicas de modelización de la calidad del aire de forma reducida para analizar la carga atribuible a las concentraciones de PM_{2,5} asociadas con las emisiones de los vehículos motorizados en circulación. Asimismo, evaluamos con mayor detenimiento la carga de un subconjunto de estos vehículos (los que no cumplen con los límites de emisiones actuales) y destacamos los beneficios potenciales asociados con un mayor cumplimiento y con el incremento de programas de Inspección y Mantenimiento (I&M) de vehículos.

1.1 ANTECEDENTES

La región metropolitana de Lima-Callao alberga cerca de 10 millones de personas, casi un tercio de la población total del Perú. Esta gran y creciente población está expuesta a concentraciones considerables de contaminantes atmosféricos debido a las emisiones de fuentes como los vehículos automotores. Las condiciones meteorológicas de Lima-Callao, principalmente la corriente oceánica de Humboldt y la Cordillera de los Andes al este, puede agravar esta exposición. La corriente oceánica de Humboldt transporta agua fría desde la punta de América del Sur hacia el norte, lo que reduce las temperaturas atmosféricas y previene la formación de nubes de lluvia (Thiel *et al.*, 2007). La corriente oceánica de Humboldt también es responsable de la niebla constante en Lima-Callao. La niebla, en combinación con la obstrucción de las masas de aire más cálido y húmedo proveniente de la Amazonia que se genera por los Andes, da como resultado inversiones de aire frecuentes en Lima-Callao. Estas inversiones de aire atrapan los contaminantes

ambientales en el nivel superficial, lo que hace que los contaminantes se acumulen en lugar de dispersarse con los vientos costeros. Como resultado, Lima-Callao se encuentra entre las ciudades más contaminadas de América Latina según la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2016).

Las fuentes de transporte son responsables de gran parte de la contaminación del aire de la región. A pesar de que concentra a un tercio de la población del país, Lima-Callao alberga a cerca de dos tercios de la flota vehicular del Perú. Además del tamaño de la flota vehicular, su antigüedad juega un papel importante en la contaminación del aire resultante (MINAM, 2018). Según los datos de vehículos registrados desde 2016-2019, cerca del 34 % de los vehículos que circulan en Lima-Callao tienen una antigüedad de más de 15 años. Estos vehículos más antiguos tienden a tener un bajo ahorro de combustible y carecen de los controles obligatorios de emisiones de los vehículos nuevos. Si bien las estimaciones empíricas de las tasas de incumplimiento son limitadas en la actualidad, los colaboradores del MINAM señalan que, según las pruebas de emisiones, muchos vehículos no cumplen con las normas nacionales de emisiones.

Para abordar las emisiones del sector de transporte, el Gobierno del Perú ha aprobado varias leyes y reglamentos relacionados con las normas de emisiones y los requisitos de inspección vehicular. Por ejemplo, en 2008, Perú estableció el Sistema Nacional de Inspecciones Técnicas Vehiculares, que es responsable de inspeccionar y poner a prueba los vehículos para verificar la seguridad y el cumplimiento de las normas de emisiones. Más recientemente, Perú adoptó las normas de emisiones vehiculares Euro 4 para todos los vehículos nuevos y está considerando implementar la norma Euro 6. Debido a la baja tasa de rotación de la flota vehicular, como lo demuestra la prevalencia de vehículos viejos en circulación, es posible que se necesiten medidas adicionales para abordar las emisiones del sector. En este informe, proporcionamos información sobre la magnitud potencial de estas emisiones de los vehículos en circulación y los resultados adversos para la salud asociados.

1.2 DESCRIPCIÓN GENERAL ANALÍTICA

En esta sección, resumimos nuestro enfoque analítico para estimar la carga de mortalidad asociada con las concentraciones de $PM_{2.5}$ en Lima-Callao. Primero, definimos nuestros objetivos de investigación y, luego, describimos los pasos analíticos que seguimos en el resto del informe.

1.2.1 OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN

En estrecha consulta con el MINAM y la USEPA, desarrollamos tres objetivos de investigación que se abordan en este informe. Primero, nuestro objetivo es cuantificar y valorar las muertes prematuras asociadas con las concentraciones de $PM_{2.5}$ ambiental general en Lima-Callao. En segundo lugar, nuestro objetivo es cuantificar y valorar las muertes prematuras asociadas con las emisiones de los vehículos en circulación de Lima-Callao, para comprender mejor cómo estos contribuyen a la carga general de muertes prematuras. En tercer lugar, nuestro objetivo es cuantificar y valorar las muertes

prematuras asociadas con las emisiones de los vehículos en circulación de Lima-Callao que no cumplen con las normas, para ayudar al MINAM a comprender los potenciales beneficios para la salud que se conseguirían si se prioriza el problema del incumplimiento. Para cada objetivo de investigación, tomamos en consideración los impactos anuales utilizando la información que describe mejor las condiciones recientes de la calidad del aire, la población y la salud básica, así como otros datos relevantes. En el capítulo 7, destacamos áreas adicionales de investigación futura que podrían complementar este informe. Esperamos que el marco analítico que IEc aplicó en este análisis sirva como una guía útil para abordar estos temas de investigación, incluyendo la estimación de los beneficios de las medidas específicas de control de las emisiones del transporte.

1.2.2 PASOS ANALÍTICOS

Nuestra metodología se compone de cinco pasos clave:

- **Paso 1: desarrollo del escenario.** Definir los objetivos de investigación y la escala espacial y temporal de nuestros análisis. Especificar las condiciones en un escenario “de normalidad” o “de línea base” y en un escenario “regulatorio” en el que se implementa la regulación propuesta. Con base en estas definiciones de escenarios, desarrollar las capas de información de calidad del aire regulatorias y de línea base.
- **Paso 2: estimación de las emisiones.** Desarrollar u obtener inventarios de las emisiones del sector de transporte. Desarrollar una estimación de la porción de vehículos que no cumplen con las normas. Estimar el exceso de emisiones asociadas con los vehículos que no cumplen con las normas en la flota de Lima-Callao. (Nota: Este paso no es necesario para evaluar la carga total de mortalidad atribuible al PM_{2,5}.)
- **Paso 3: modelización de la calidad del aire.** Obtener y procesar los datos de la calidad del aire, como estimaciones de satélites y datos de monitoreos de calidad del aire, para describir las condiciones de línea base en Lima-Callao. Utilizar métodos de modelización de la calidad del aire para estimar el impacto de las emisiones vehiculares en las concentraciones de PM_{2,5} ambiental.
- **Paso 4: estimación del impacto en la salud.** Cuantificar las muertes prematuras asociadas con las concentraciones de PM_{2,5} utilizando el Programa de Análisis y Mapeo de Beneficios Ambientales, edición comunitaria (BenMAP-CE) y conjuntos de datos relevantes, incluyendo la población, la calidad del aire, la incidencia de mortalidad de referencia y las relaciones concentración-respuesta de los estudios epidemiológicos.
- **Paso 5: valoración.** Aplicar las estimaciones de valoración económica de los valores cuantificados de mortalidad para describir la carga de mortalidad atribuible al PM_{2,5} en términos monetarios.

Estos pasos se describen con mayor detalle a lo largo del informe.

1.3 ORGANIZACIÓN DEL INFORME

El resto de este informe se organiza de la siguiente manera:

- En el capítulo 2, hacemos un breve resumen de nuestras acciones de desarrollo de escenarios, incluyendo la definición de las condiciones de la calidad del aire de línea base y las condiciones regulatorias necesarias para estimar la carga de mortalidad atribuible al $PM_{2.5}$.
- En el capítulo 3, detallamos nuestros métodos para cuantificar las emisiones de la flota de vehículos en circulación, incluyendo la consideración de las estimaciones sobre el incumplimiento de las normas de emisiones que se obtuvieron de manera empírica.
- En el capítulo 4, resumimos los datos disponibles sobre la calidad del aire en Lima-Callao y los métodos para estimar los cambios en la calidad del aire que derivan de los cambios en las emisiones.
- En el capítulo 5, describimos nuestros métodos para realizar la estimación y valoración del impacto en la salud utilizando la herramienta BenMAP-CE de la USEPA, incluyendo los resúmenes de datos clave como la población, la incidencia de mortalidad de referencia, las funciones de impacto en la salud y las estimaciones del valor.
- En el capítulo 6, presentamos los resultados de nuestros análisis de carga de salud, incluyendo una estimación de la mortalidad total por $PM_{2.5}$, una estimación de la mortalidad por $PM_{2.5}$ atribuible al transporte y una estimación asociada con el exceso de mortalidad por $PM_{2.5}$ producto de las emisiones de los vehículos que no cumplen con las normas.
- En el capítulo 7, analizamos los resultados de esta investigación, la información relevante y las limitaciones metodológicas. Además, presentamos recomendaciones sobre los próximos pasos para construir sobre la base de este esfuerzo de investigación colaborativa.
- En los apéndices A a D, analizaremos métodos suplementarios y resultados más allá de las estimaciones primarias que se muestran en el texto principal.

CAPÍTULO 2 | DESARROLLO DEL ESCENARIO

En este capítulo, definimos los escenarios que se evalúan en el resto del informe para estimar el número de muertes prematuras atribuibles a las concentraciones de $PM_{2.5}$ en Lima-Callao. Como se describe en el capítulo 1, un elemento clave del desarrollo de escenarios implica definir el alcance temporal y geográfico. Primero, nos enfocamos en estimar la carga de mortalidad reciente asociada con el $PM_{2.5}$ ambiental. Por lo tanto, empleamos los conjuntos de datos que describen mejor las condiciones en los últimos años, incluyendo la calidad del aire, la población y la incidencia de mortalidad de referencia.¹ En segundo lugar, consideramos las emisiones, la calidad del aire y los impactos en la salud asociados en la región de Lima-Callao. Nos esforzamos en emplear conjuntos de datos con resolución espacial y resultados de informes con una resolución geográfica fina (p. ej., distritos) cuando los datos disponibles lo permiten.² Nuestro análisis no considera las emisiones contaminantes, la calidad del aire y los impactos en la salud fuera de Lima-Callao.

Para el análisis de costo-beneficio regulatorio, solemos definir los escenarios “de normalidad” o “regulatorio”. En un análisis prospectivo de una propuesta de regulación, el escenario “de normalidad” refleja las condiciones como están en el presente (o como se espera que estén en el futuro) sin las propuestas de medidas de control de emisiones en marcha. El escenario “regulatorio” refleja las condiciones que se esperan en el presente o en el futuro si se implementa la regulación propuesta. En el contexto de un análisis de carga (el enfoque de este informe) se define de manera similar a los escenarios “de línea base” y los “de control”. El escenario de línea base refleja las concentraciones recientes de $PM_{2.5}$ que se observaron en la región. Los escenarios de control son representaciones hipotéticas de cuáles serían las concentraciones recientes de $PM_{2.5}$ sin las contribuciones de algunas o todas las fuentes de emisiones. Si bien nuestro escenario de línea base es el mismo en nuestros tres análisis, el escenario de control es diferente para cada corrida. Estos escenarios se resumen en la figura 2-1. Es importante destacar que la calidad del aire es el único ingreso de datos que varía entre los escenarios de línea base y de control.

¹ Nuestras estimaciones no tienen en cuenta los efectos de la pandemia de COVID-19. Además, nuestro análisis no cuantifica los impactos que el virus ha tenido en la calidad del aire, la población y las tasas de mortalidad de referencia en Lima-Callao.

² En Perú, las divisiones administrativas están geográficamente determinadas, de mayor a menor, en regiones, provincias y distritos. Lima y Callao son los nombres tanto de una provincia como de un distrito dentro de una provincia. Este análisis abarca las provincias de Lima y Callao, que son comparables con los estados de los EE. UU. Los distritos que se analizan son comparables con los condados de los EE. UU., y sus tamaños varían entre 1 y 2800 km².

FIGURA 2-1. DEFINICIÓN DE LOS ESCENARIOS DE CALIDAD DEL AIRE

ANÁLISIS	CALIDAD DEL AIRE DE LINEA BASE	CALIDAD DEL AIRE DE CONTROL
Carga total de PM _{2,5}	Descripción reciente de las concentraciones de PM _{2,5} observadas	Concentraciones de PM _{2,5} establecidas en 0 µg/m ³
Carga de PM _{2,5} del sector de transporte		Concentraciones de PM _{2,5} observadas <i>menos las contribuciones del sector de transporte</i>
Carga de PM _{2,5} de los vehículos que no cumplen las normas		Concentraciones de PM _{2,5} observadas <i>menos las contribuciones de los vehículos que no cumplen las normas</i> ³

Al comparar los impactos en la salud estimados entre las condiciones de calidad del aire de línea base y de control, podemos atribuir la carga de mortalidad a varias fuentes. Por ejemplo, al comparar las concentraciones recientes de PM_{2,5} con un escenario hipotético donde reducimos las concentraciones de PM_{2,5} con las que contribuye el sector de transporte, podemos cuantificar la carga de mortalidad asociada con el sector en su conjunto. En los siguientes capítulos, explicamos cómo estimamos la contribución de las fuentes de transporte (y, por separado, de las emisiones vehiculares que no cumplen con las normas) a las concentraciones de PM_{2,5} ambiental.

³ No descartamos todas las emisiones relevantes de PM_{2,5} asociadas con los vehículos que no cumplen las normas, sino que solo evaluamos las emisiones en exceso de los vehículos comparables que cumplen las normas de emisiones vehiculares.

CAPÍTULO 3 | ESTIMACIÓN DE LAS EMISIONES

En este capítulo, explicamos nuestras fuentes de datos y los métodos que utilizamos para describir las emisiones del sector de transporte en Lima-Callao. Si bien el MINAM posee un inventario integral de emisiones para los vehículos en circulación, este parte de la premisa de que las tasas de emisión de estos vehículos son fijas y que representan las tasas de "cumplimiento" de una clase de vehículo determinada (p. ej., autobús o vehículo de pasajeros), un tipo de combustible determinado (p. ej., gasolina o diésel) y una clase de emisión determinada (p. ej., Euro 2 o Euro 6). Sin embargo, los datos que se obtuvieron de una inspección que hizo la Gerencia de Transporte Urbano (GTU) de la Municipalidad de Lima indican que una porción significativa de la flota de vehículos no cumple con las normas. Esto puede deberse a varios factores, incluyendo la potencial manipulación indebida de los dispositivos de control de emisiones, la antigüedad de la flota vehicular y los ciclos de conducción en Lima-Callao. Por lo tanto, es probable que el inventario subestime las emisiones de la flota vehicular. Si bien la verdadera tasa de incumplimiento no se conoce, se espera que sea alta en función de los últimos datos que recogió la GTU. Usamos estos cálculos para actualizar el inventario de emisiones a fin de tener en cuenta las tasas de emisiones que no cumplen las normas que se observan en la región para que refleje mejor la tasa real de emisiones.

3.1 INVENTARIO DE EMISIONES DE LINEA BASE

Los cálculos en esta sección detallan la implementación, por parte de IEc, del modelo de inventario de emisiones del sector de transporte del MINAM. Este modelo genera estimaciones de las emisiones anuales según el tamaño y la composición de la flota de vehículos en circulación de la región. El modelo resume las emisiones de siete contaminantes en toneladas por año: $PM_{2.5}$, NO_x , CO, hidrocarburos totales, carbón negro, SO_2 y CO_2 . Se derivaron estimaciones para cada combinación de tipo de vehículo, clase de emisión y tipo de combustible (p. ej., automóviles diésel Euro 2). Los detalles adicionales sobre estas características de los vehículos se resumen en la figura 3-1.

FIGURA 3-1. ELEMENTOS INFORMATIVOS DEL INVENTARIO DE EMISIONES DEL TRANSPORTE

VARIABLE	VALORES
Tipo de combustible	Diésel, gasolina de alto octanaje, gasolina de bajo octanaje, gas licuado de petróleo, gas natural
Clase de emisión	Euro 0 (Pre-Euro), Euro 2, Euro 3, Euro 4
Tipo de vehículo	Automóvil, automóvil familiar, camioneta, camión rural, furgoneta, ómnibus, camión de servicio pesado, grúa, motocicleta

Para generar estimaciones de las emisiones para cada grupo de vehículos, el modelo utiliza información sobre los recuentos de vehículos, la distancia promedio conducida por año y los factores de emisión para calcular las estimaciones de las emisiones anuales. En primer lugar, multiplicamos los recuentos de categoría de vehículo por la porción de vehículos que utilizan cada tipo de combustible para estimar los recuentos de vehículos por tipo de combustible y categoría.^{4,5} Después, multiplicamos los recuentos de vehículos por la distancia promedio anual para cada tipo de combustible y categoría de vehículo para estimar la distancia total anual conducida para todos los vehículos por tipo de combustible y categoría.⁶ Luego, multiplicamos las distancias anuales totales por el porcentaje de vehículos en cada nivel Euro teniendo en cuenta el tipo de combustible y la categoría de vehículo específicos para determinar la distancia total anual por tipo de combustible, categoría de vehículo y nivel de emisión Euro.⁷ Por último, aplicamos los factores de emisión a las estimaciones de distancia totales. Los factores de emisión reflejan la tasa de emisiones por unidad de distancia recorrida (p. ej., 0,05 gramos de PM_{2,5} emitidos por kilómetro recorrido). Estos pasos dan como resultado 180 estimaciones de emisiones (todas las combinaciones de nueve categorías de vehículos, cinco tipos de combustible y cuatro niveles Euro). En la figura 3-2 se ilustran ejemplos de cálculos con valores hipotéticos.

⁴ Las estimaciones de los recuentos de las categorías de vehículos derivan de una cifra del registro de vehículos del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) del Perú de 2011 a 2016. Ver https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1483/cap20/ind20.htm

⁵ Las estimaciones de la proporción de vehículos por cada tipo de combustible provienen del Inventario nacional de gases de efecto invernadero del MINAM de 2012. Ver <http://infocarbono.minam.gob.pe/annios-inventarios-nacionales-gei/ingei-2012/>

⁶ Las distancias promedio anuales se obtuvieron del proyecto Planificación ante el Cambio Climático. Ver http://plancperu.org/wp-content/uploads/2016/05/informe_final.pdf. Estos datos se complementan con información de MINAM, en cooperación entre el proyecto CALAC+ y GIZ, sobre la distancia total recorrida por año de los vehículos diésel y a gas dentro de la categoría de automóviles en Lima.

⁷ La información sobre la porción de la flota vehicular de Lima que está dentro de cada nivel Euro se obtuvo del informe del Proyecto de Apoyo a las Medidas de Mitigación Apropriadas para cada País (NAMA). Consulte <http://www.transferproject.org/projects/transfer-partner-countries/peru/>. Los vehículos de más de 15 años se clasifican como emisores en el nivel Euro 0, los vehículos con una antigüedad de entre 15 y 12 años se clasifican como Euro 2, los vehículos con una antigüedad de entre 11 años y un año se clasifican como Euro 3 y los vehículos con menos de un año de antigüedad se clasifican como Euro 4.

FIGURA 3-2. CÁLCULOS ILUSTRATIVOS DE LA ESTIMACIÓN DE EMISIONES

PASO	EJEMPLO:
1	100 000 automóviles * 30 % de uso de combustible diésel = 30 000 automóviles diésel
2	30 000 automóviles diésel * una distancia promedio de 10 000 km = 300 000 000 km recorridos por automóviles diésel
3	300 000 000 km * 10 % de Euro 4 = 30 000 000 km recorridos por automóviles diésel Euro 4
4	30 000 000 km * 0,05 g de PM _{2,5} /km = 1 500 000 g = 1,5 toneladas de PM _{2,5} emitidos cada año por automóviles diésel Euro 4

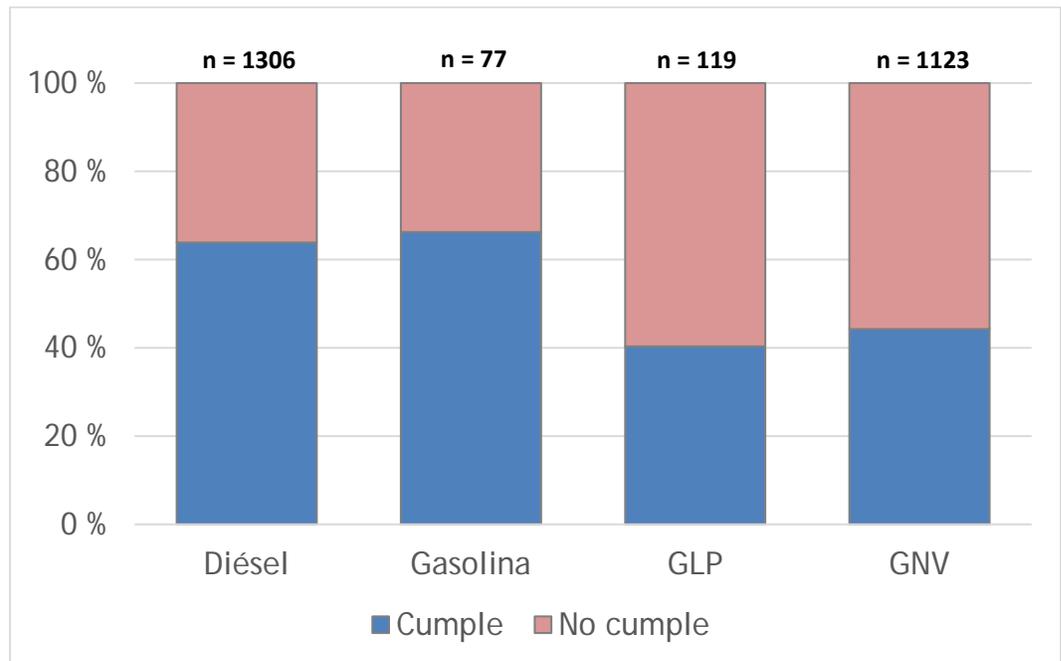
En el ejemplo anterior, se estima que los automóviles diésel Euro 4 emiten 1,5 toneladas de PM_{2,5} al año. Estas estimaciones se compilarían con las emisiones de los otros 179 tipos de vehículos, tipos de combustible y combinaciones de clases de emisiones para obtener las emisiones totales del sector de transporte de la región. Como se señaló anteriormente, el inventario asume implícitamente un cumplimiento perfecto en su aplicación de factores de emisión; es decir, los vehículos no pueden emitir tasas superiores (o inferiores) a las establecidas por cada clase Euro. En la siguiente sección, se explica cómo adaptamos estos valores para considerar el incumplimiento en la flota vehicular.

3.2 CONSIDERACIÓN DEL INCUMPLIMIENTO

La evidencia empírica demuestra que muchos vehículos en circulación en Lima-Callao no cumplen con los Límites Máximos Permisibles de emisiones vehiculares establecidos por el MINAM. Según un análisis de 2 625 vehículos en Lima-Callao que realizó la GTU en 2017, cerca de la mitad de los vehículos examinados no cumplían con los Límites Máximos Permisibles de emisiones vehiculares.⁸ Las tasas de cumplimiento, que se muestran en la figura 3-3, varían según el tipo de combustible del vehículo.

⁸ Decreto Supremo N° 010-2017-MINAM. Para los vehículos diésel, el cumplimiento se determina usando un estándar de opacidad, y para los de gasolina, gas natural y gas licuado de petróleo, el cumplimiento se basa en estándares combinados de CO, CO₂ y HC.

FIGURA 3-3. TASAS DE CUMPLIMIENTO POR TIPO DE COMBUSTIBLE



Nota: GLP = gas licuado de petróleo, GNV = gas natural vehicular, n = tamaño de la muestra.

Las tasas de cumplimiento se encuentran en un rango que va de 40 % para los vehículos de gas licuado de petróleo a 66 % para los vehículos de gasolina. Utilizamos estos datos para ajustar las estimaciones del inventario de emisiones de modo que se tengan en cuenta las tasas de emisión que probablemente exceden a las cuantificadas en los factores de emisión del modelo. Para cada tipo de combustible, dividimos las distancias anuales totales (por categoría de vehículo, tipo de combustible y clases de emisiones) entre las que cumplen con las normas y las que no. Para los vehículos que cumplen con las normas, aplicamos los factores de emisión convencionales asociados con la categoría del vehículo, el tipo de combustible y las clases de emisiones. Sin embargo, se dio por sentado que los vehículos que no cumplían con las normas emitían a tasas más altas (es decir, más contaminación por kilómetro conducido). Dada la incertidumbre en cuanto a las tasas de emisión reales de los vehículos que no cumplen con las normas, estimamos el posible límite superior e inferior de las emisiones utilizando supuestos alternativos: ⁹

⁹ Al estimar las tasas de incumplimiento, aceptamos como válido un muestreo aleatorio de vehículos que realizó la GTU y la precisión del método de prueba que se utilizó para la inspección. Además, utilizando el siguiente análisis de sensibilidad, exploramos nuestra suposición de que el incumplimiento correspondía a las normas Euro de emisiones más antiguas. IEc evaluó las distribuciones de medidas de inspección de opacidad para los vehículos diésel y las distribuciones de medidas de CO para los vehículos de gasolina, gas natural y gas licuado de petróleo. El aumento porcentual de la opacidad entre los vehículos diésel que cumplen con las normas y los que no cumplen fue comparable con el aumento porcentual de las emisiones de PM_{2.5} que se registró al cambiar del nivel Euro 4-2 al nivel Euro 0. Por lo tanto, IEc determinó que considerar los vehículos que no cumplen las normas en el modelo de inventario proyectando los factores de emisión del diésel por opacidad probablemente

- **Estimación del límite inferior de las emisiones:** se dio por sentado que las emisiones de los vehículos que no cumplían con las normas correspondían a una norma de emisiones más antigua que la que se les había asignado en un inicio. Por ejemplo, la tasa de emisión de un vehículo Euro 4 que no cumple con las normas sería consistente con los factores de emisión de la norma Euro 3.
- **Estimación del límite superior de las emisiones:** se dio por sentado que las emisiones de los vehículos que no cumplían con las normas correspondían al nivel Euro 0.

Cabe destacar que IEc solo ajustó las emisiones de PM_{2,5} y NO_x, es decir, de los precursores de PM_{2,5} ambiental, para dar cuenta del incumplimiento. No pudimos ajustar las emisiones de SO₂ porque los datos no estaban desglosados por niveles Euro. Sin embargo, es razonable suponer que los vehículos que cumplen y no cumplen emiten SO₂ comparable por kilómetro recorrido (para un tipo de combustible y tipo de vehículo dado), ya que las emisiones de SO₂ dependen de la distancia recorrida y el contenido de azufre en el combustible, no de la clase de emisiones.

Para determinar las estimaciones de las emisiones anuales de PM_{2,5} y NO_x para cada tipo de combustible, sumamos las emisiones de los vehículos que cumplen y de los que no cumplen por cada categoría de vehículo y nivel Euro. Por último, IEc sumó los tipos de combustible para determinar las estimaciones de las emisiones anuales totales de PM_{2,5} y NO_x.

3.3 RESULTADOS DE LA MODELIZACIÓN DE LAS EMISIONES

Los resultados del modelo de inventario de emisiones se resumen en la figura 3-4.

FIGURA 3-4. ESTIMACIONES DE LAS EMISIONES VEHICULARES DE PM_{2,5}, NO_x Y SO₂ DE 2018

ESCENARIO		TOTAL DE EMISIONES VEHICULARES (TONELADAS/AÑO)		
		PM _{2,5}	NO _x	SO ₂
Cumplimiento pleno		4092	164 038	21 908
Incumplimiento ajustado	Límite superior	5176	203 564	21 908
	Límite inferior	4297	175 097	21 908

no cambiaría el resultado de manera significativa. Además, el aumento porcentual del CO para vehículos de gasolina, gas natural y petróleo licuado que no cumplen con las normas fue mayor, por varias órdenes de magnitud, que el aumento porcentual de las emisiones de PM_{2,5} que se registró al cambiar del nivel Euro 4-2 al nivel Euro 0. IEc determinó que no sería apropiado proyectar los factores de emisión de la gasolina, el gas natural y el gas licuado de petróleo mediante mediciones de CO para tener en cuenta el incumplimiento.

La implementación del modelo de emisiones del MINAM al asumir como cierto un cumplimiento perfecto da como resultado una estimación de las emisiones de $PM_{2,5}$ de 4092 toneladas por año, emisiones de NO_x de 164 038 toneladas por año y emisiones de SO_2 de 21 908 toneladas por año. Hallamos que considerar el incumplimiento daba como resultado un aumento porcentual de entre 5 y 26 % en las emisiones de $PM_{2,5}$, y de entre 6 y 24 % en las emisiones de NO_x (figuras 3-5 y 3-6). Las emisiones de SO_2 no se ajustaron y, por lo tanto, no varían entre los escenarios ajustados de cumplimiento pleno y de incumplimiento. El apéndice A proporciona más detalles sobre estas estimaciones, incluyendo la porción de emisiones por tipo de combustible del vehículo.

FIGURA 3-5. EMISIONES ESTIMADAS DE $PM_{2,5}$ PRIMARIAS DE 2018

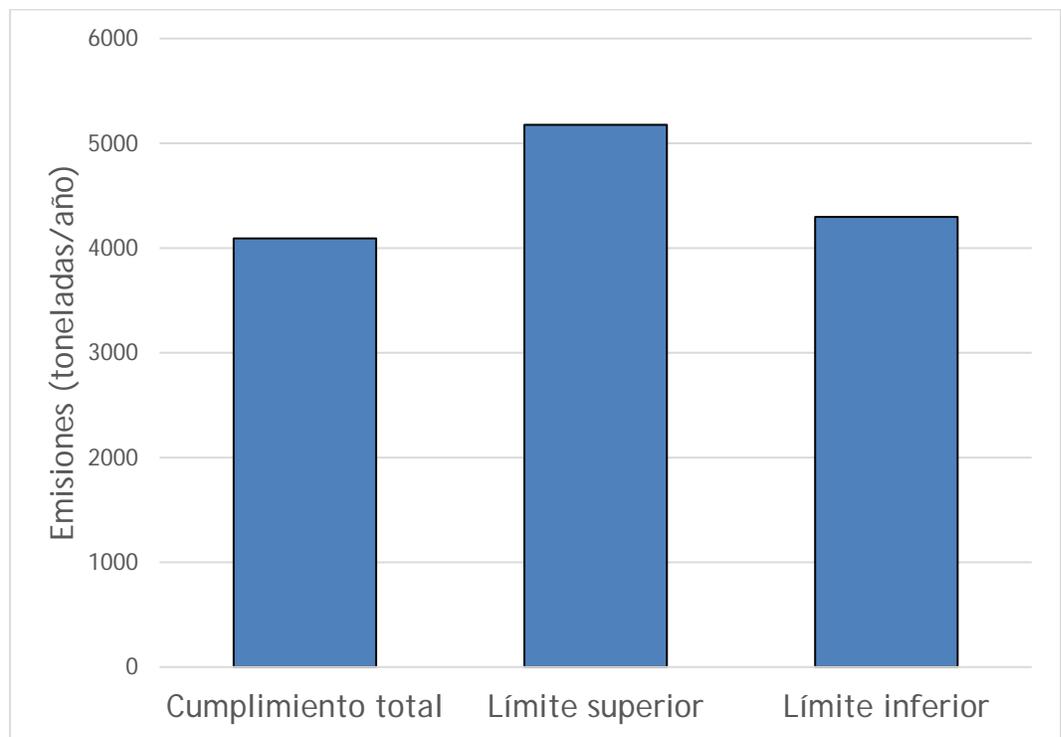
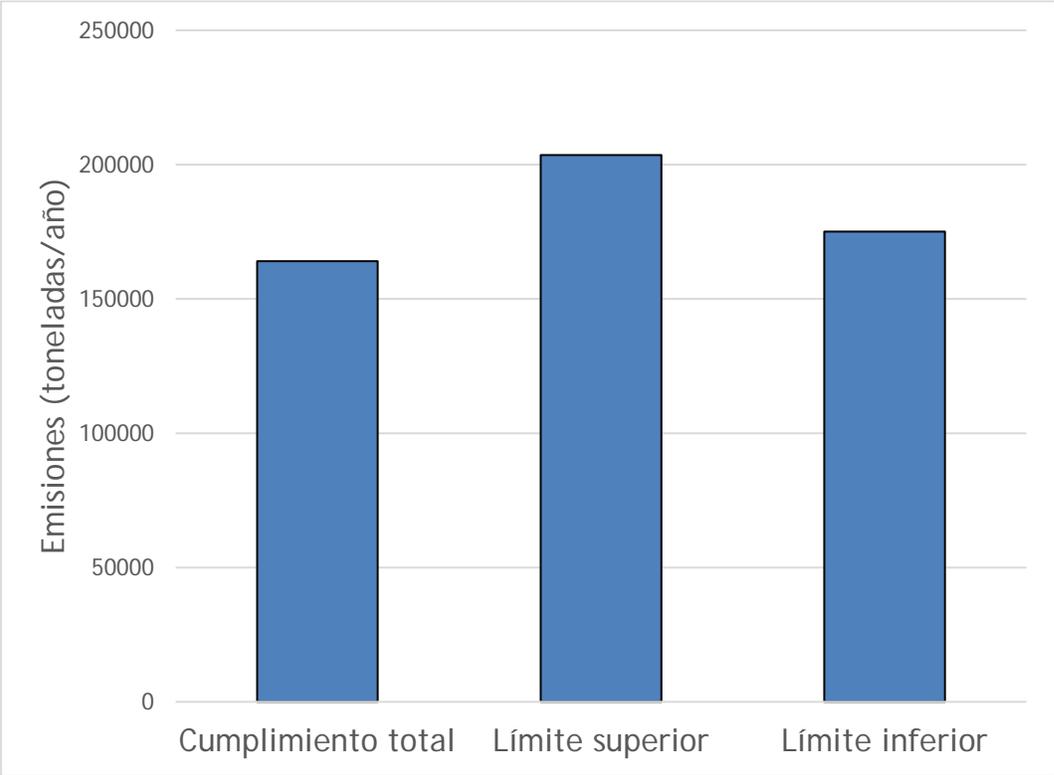


FIGURA 3-6. EMISIONES ESTIMADAS DE NO_x DE 2018



CAPÍTULO 4 | DATOS Y MODELIZACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE

En este capítulo describimos nuestro enfoque para describir las concentraciones recientes de $PM_{2.5}$ en Lima-Callao. Primero, describimos los datos de monitoreo de la calidad del aire disponibles y los datos de PM derivados de satélites en la región, así como nuestros enfoques para fusionar estas dos fuentes de datos. En segundo lugar, describimos nuestro enfoque para estimar la contribución de las fuentes de transporte a las concentraciones de $PM_{2.5}$ ambiental con base en los datos de las emisiones que se describen en el capítulo anterior.

4.1 CAPA DE INFORMACIÓN DE CALIDAD DEL AIRE

Varias fuentes de datos proporcionan estimaciones de las concentraciones de $PM_{2.5}$ ambiental en Lima-Callao. A continuación, describimos estas capas de información de calidad del aire y sopesamos los beneficios y limitaciones relativos de cada fuente de datos.

4.1.1 CAPAS GENERADAS DE LOS MONITOREOS DE CALIDAD DEL AIRE

El MINAM proporcionó los datos de monitoreo de Lima-Callao que cubrieron una gama de contaminantes ($PM_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , NO_2 , O_3 y CO) y proyecciones temporales. Las concentraciones de los contaminantes se resumieron en intervalos de tiempo por horas, días, meses y años desde el año 2000.¹⁰ Los monitoreos que se analizaron pertenecen a dos agencias separadas, que son las que los operan: el Ministerio de Salud (MINSA) y el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI).

Para representar de la mejor manera la calidad del aire en el área metropolitana de Lima-Callao, incluyendo los “puntos críticos” de interés para el MINAM (p. ej., las altas concentraciones de contaminantes localizadas en el Callao), utilizamos mediciones horarias del $PM_{2.5}$ de las 10 estaciones de monitoreos en 2019 y complementamos estos valores con mediciones diarias del $PM_{2.5}$ de dos muestreadores activos en el distrito de

¹⁰ Algunos contaminantes y métricas solo están disponibles en determinados años.

Callao.¹¹¹² Luego, combinamos las medidas en un solo conjunto de datos mediante la conversión del PM_{2,5} por hora a promedios diarios para cada período de 24 horas.¹³

La figura 4-1 muestra un mapa de estas estaciones de monitoreo de la calidad del aire en Lima-Callao. Dado que los datos de los monitoreos proporcionan concentraciones en una ubicación fija, utilizamos el método de Promedios de Vecinos de Voronoi (VNA, *por sus siglas en inglés*) en el BenMAP-CE para interpolar las concentraciones de PM_{2,5} en una cuadrícula de 1 km x 1 km (no se muestra en la imagen). El método de VNA calcula un promedio ponderado de distancia inversa para cada celda de la cuadrícula a partir de los datos de monitoreo que rodean el centro de la cuadrícula.¹⁴

¹¹ Los datos de monitoreo diario en el Callao solo están disponibles durante aproximadamente una semana de cada mes en 2019 en el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA).

¹² Además, otros monitores proporcionan datos de años anteriores (p. ej., 27 en 2016); sin embargo, estos datos corren el riesgo de reflejar niveles y distribuciones de calidad del aire más antiguos.

¹³ Después de convertir los datos por hora en promedios diarios, excluimos ocho valores diarios atípicos para tres monitores.

¹⁴ Consulte el apéndice B en el manual del usuario del BenMAP-CE para obtener más información sobre el método VNA: https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-04/documents/benmap-ce_user_manual_march_2015.pdf

FIGURA 4-1. ESTACIONES DE MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE DISPONIBLES EN LIMA-CALLAO (2019)



4.1.2 CAPAS DE INFORMACIÓN DE SATÉLITES

En las zonas que carecen de cobertura de monitoreo, la información satelital puede ser útil para estimar las concentraciones de $PM_{2.5}$ en las capas a utilizar en el presente estudio. Los datos que se obtienen de las áreas con redes de supervisión importantes suelen representar mejor las concentraciones ambientales a nivel del suelo (suponiendo que se cumplen los procedimientos de control de calidad apropiados). Sin embargo, los

datos de satélites siguen desempeñando un papel importante, ya que llenan los vacíos entre las ubicaciones de los datos de monitoreo y ofrecen información sobre la distribución espacial del $PM_{2,5}$ en resoluciones más finas. Lima-Callao tiene una red establecida de monitoreos; sin embargo, la cobertura es más limitada en los distritos exteriores. Por lo tanto, aprovechamos dos estimaciones derivadas de satélites para el área metropolitana de Lima-Callao: una capa estimada de van Donkelaar *et al.* (2016) y una capa estimada de Shaddick *et al.* (2017). Las capas van Donkelaar proporcionan estimaciones anuales de $PM_{2,5}$ con una resolución de 0,01 (1 km x 1 km) para el período de 1998 a 2016 y las capas Shaddick proporcionan estimaciones anuales de $PM_{2,5}$ con una resolución de 0,1 (10 km x 10 km) para 2014 y 2016.

Las capas de van Donkelaar *et al.* (2016) y de Shaddick *et al.* (2017) combinan información de los satélites, simulaciones de modelos y monitoreos a nivel del suelo. Sus métodos se explican con más detalle en el apéndice B. Cabe resaltar que ambas capas incorporan datos de monitoreo de la base de datos de la OMS sobre calidad del aire ambiente, que contiene solo una estación de monitoreo con una estimación medida de manera directa de $PM_{2,5}$ para Lima-Callao.¹⁵ Como tal, si bien las capas pueden proporcionar información sobre la distribución espacial de la contaminación del aire, la magnitud de las concentraciones de $PM_{2,5}$ puede no reflejar con precisión las condiciones reales (según la data de los monitoreos).

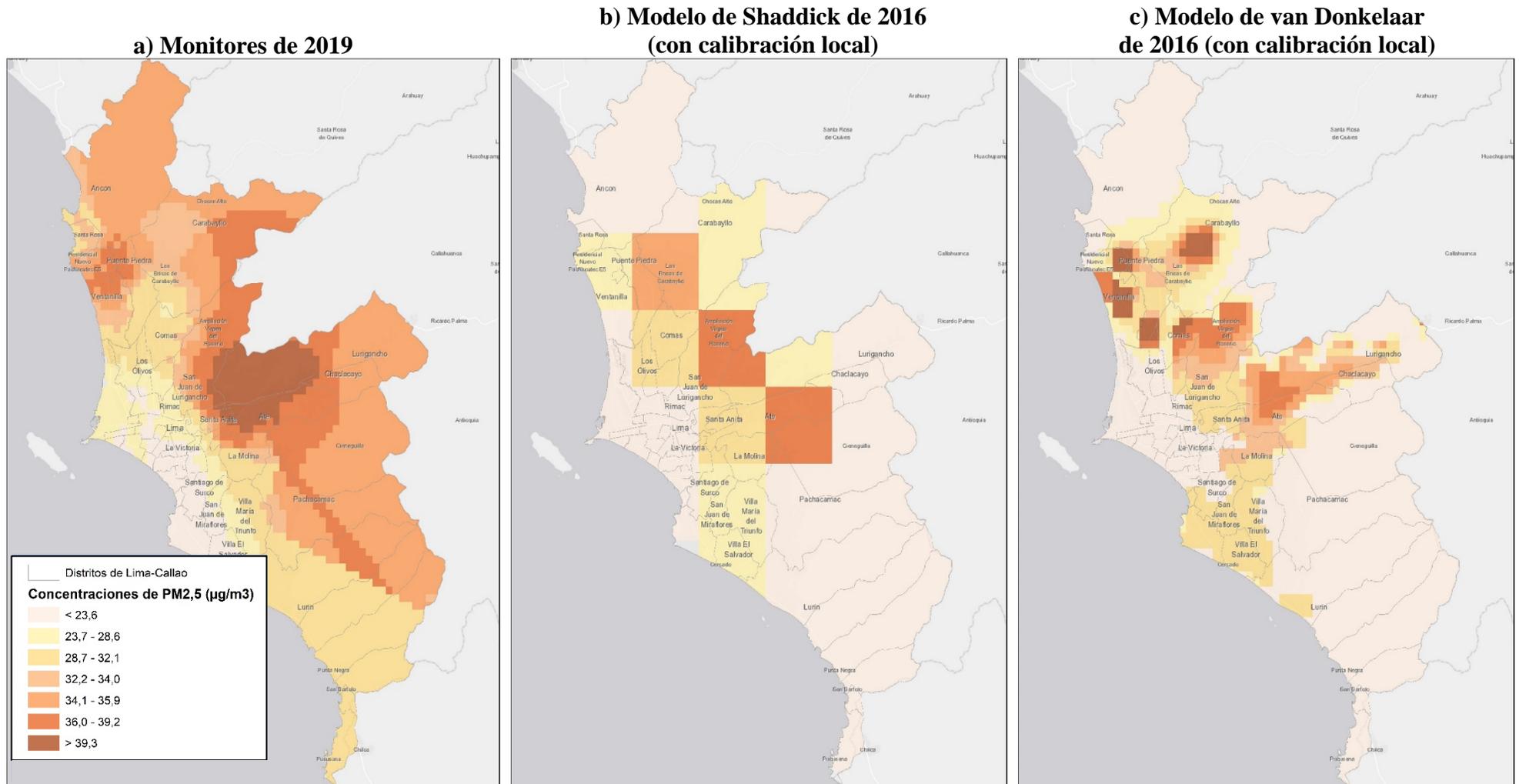
Por tal motivo, IEc realizó una calibración local adicional de las capas de van Donkelaar y Shaddick para 2016 utilizando los datos de doce estaciones de monitoreo del SENAMHI y el MINSA. La calibración de la capa satelital se divide en cuatro etapas: (1) calcular los promedios anuales de $PM_{2,5}$ en las estaciones de los monitoreos, (2) calcular la proporción entre los promedios anuales de $PM_{2,5}$ de las estaciones de monitoreo y del satélite, (3) realizar una interpolación espacial de las proporciones para crear una capa de calibración y (4) multiplicar la capa de calibración por la capa satelital para crear una capa de información de calidad del aire con calibración local. Estos pasos, que se ejecutan en la versión 10.4.1 de ArcMap utilizando el módulo Spatial Analyst, se explican con más detalle en el apéndice B.

4.1.3 RESUMEN DE LAS CAPAS DE INFORMACIÓN DE CALIDAD DEL AIRE

La figura 4-2 muestra las tres capas de información finales que se utilizaron para evaluar la carga de mortalidad por $PM_{2,5}$ ambiental en Lima-Callao. La figura 4-2 (a) muestra los datos del monitoreo de 2019 interpolados en una cuadrícula de 1 km x 1 km. La capas de información del monitoreo de 2019 tuvo una concentración de $PM_{2,5}$ diaria promedio de $33,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con una concentración mínima y máxima de $16,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $46,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. La figura 4-2 (b) muestra la capa del modelo de Shaddick de 10 km x 10 km de 2016 con calibración local usando los datos del monitoreo (consulte el apéndice B). La capa del modelo de Shaddick tuvo una concentración de $PM_{2,5}$ diaria

¹⁵ Organización mundial de la salud. *WHO Global Ambient Air Quality Database (Update 2018)*; OMS: Ginebra, 2018: <https://www.who.int/airpollution/data/cities/en/>

promedio de $21,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con una concentración mínima y máxima de $11,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $36,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Por último, la figura 4-2 (c) muestra la capa del modelo de van Donkelaar de $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ calibrada usando los datos de los monitoreos (consulte el apéndice B). La capa del modelo de van Donkelaar tuvo una concentración anual promedio de $\text{PM}_{2,5}$ de $21,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con una concentración mínima y máxima de $10,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $53,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente.

FIGURA 4-2. CAPAS DE INFORMACIÓN DE CALIDAD DEL AIRE¹⁶

¹⁶ Existen varias formas de interpolar entre monitores para desarrollar una capa de información de calidad del aire. La figura 4-2a se desarrolló utilizando el procedimiento de interpolación predeterminado del BenMAP-CE, el método de promedios de vecinos de Voronoi (VNA). El método de interpolación de VNA puede o no reflejar con precisión las condiciones a nivel del suelo en Lima-Callao.

4.2 MODELIZACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE

En la sección anterior, presentamos las fuentes de datos y los métodos que se utilizaron para describir las concentraciones recientes de PM_{2,5} en la región de Lima-Callao. Las capas de información de calidad del aire que se obtuvieron como resultado se utilizan para evaluar la carga de mortalidad asociada con todas las fuentes de PM_{2,5}. Para evaluar la carga de mortalidad atribuible al transporte, necesitábamos un medio para cuantificar el efecto de las emisiones del transporte en las concentraciones de PM_{2,5} ambiental. Empleamos la forma reducida de una técnica de modelización de la calidad del aire que se utilizó en estudios anteriores encargados por el MINAM: el Factor Emisión-Concentración (FEC). Los FEC que se utilizaron en este informe se desarrollaron para las emisiones vehiculares en la región de Valparaíso, Chile.¹⁷ Aunque existen FEC para Lima, estos no son específicos para el sector de transporte. Después de consultar con el MINAM, decidimos utilizar los FEC de Valparaíso, ya que esta región costera y montañosa puede ser similar al área metropolitana de Lima-Callao en cuanto a los aspectos meteorológicos y topográficos importantes. Los FEC se calculan con la siguiente ecuación:

$$FEC_i^t = \left(\frac{\delta C_i^t}{\delta E^t} \right)^{-1} \approx \frac{E_i^t}{C^t}$$

donde FEC_i^t es el factor emisión-concentración en la zona i para el año t en toneladas/($\mu\text{g}/\text{m}^3$), C_i^t es la concentración de PM_{2,5} ambiental en la zona i para el año t en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y E_i^t es la emisión de contaminantes en la zona i para el año t . En la figura 4-3 se muestran los FEC para contaminantes específicos con respecto a las emisiones vehiculares.

FIGURA 4-3. FACTORES EMISIÓN-CONCENTRACIÓN (FEC) PARA CONTAMINANTES ESPECÍFICOS

CONTAMINANTE	FEC (TONELADA/AÑO POR $\mu\text{g}/\text{m}^3$)
PM _{2,5}	1148,106
SO ₂	15 220,700
NO _x	18 867,925

¹⁷ GreenLab, 2011: <https://silo.tips/download/estudio-co-beneficios-de-la-mitigacion-de-gei>

Estimamos la contribución total de las emisiones vehiculares de NO_x, SO₂ y PM_{2,5} a las concentraciones de PM_{2,5} ambiental primario de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$C_p = \left(\frac{1}{FEC_p} \right) * E_p,$$

donde C es la contribución a la concentración de PM_{2,5} ambiental del contaminante p , FEC_p es el factor emisión-concentración del contaminante p y E_p son las emisiones primarias del contaminante p . Estimamos las contribuciones a las concentraciones de PM_{2,5} ambiental para los escenarios de cumplimiento pleno, el límite superior de incumplimiento y el límite inferior de incumplimiento. Por último, aislamos la contribución de las emisiones que no cumplen las normas al restar el total de las emisiones en cumplimiento pleno de las emisiones vehiculares en incumplimiento, tal como se muestra a continuación:

$$C_{nc} = C_{nc_ajustado} - C_{total}$$

donde C_{nc} son las emisiones que no cumplen las normas, $C_{nc_ajustado}$ es el total de las emisiones vehiculares ajustadas para el incumplimiento y C_{total} son las emisiones vehiculares totales en el supuesto de que haya un cumplimiento pleno. Esto estimó las emisiones que no cumplen las normas en lugar del total de emisiones de los vehículos que no cumplen las normas. Un vehículo que no cumple las normas tiene un porcentaje de emisiones que sí las cumple (es decir, emisiones que habrían existido aun si el vehículo cumpliera con las normas) y un porcentaje de emisiones que exceden las normas. Para abordar la carga de mortalidad por incumplimiento, determinamos la contribución del exceso de emisiones únicamente. Los resultados de los cálculos del FEC se muestran en la figura 4-4.

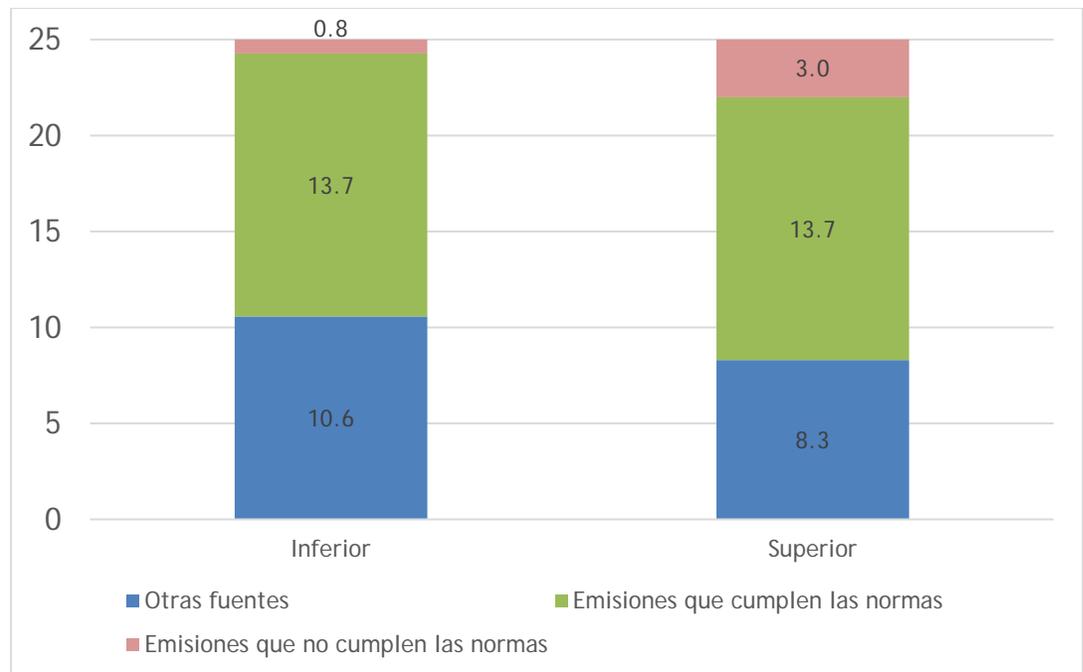
FIGURA 4-4. CONTRIBUCIÓN DE EMISIONES PRODUCIDAS POR EL TRANSPORTE Y LOS VEHÍCULOS QUE NO CUMPLEN LAS NORMAS A LAS CONCENTRACIONES DE PM_{2,5} AMBIENTAL

ESCENARIO	CONTRIBUCIÓN DE LAS EMISIONES VEHICULARES A LAS CONCENTRACIONES DE PM _{2,5} AMBIENTAL (µg/m ³)				CONTRIBUCIÓN DE LAS EMISIONES QUE NO CUMPLEN LAS NORMAS	
	PM _{2,5}	NO _x	SO ₂	TOTAL		
Cumplimiento pleno	3,56	8,69	1,44	13,70	N/C	
Incumplimiento ajustado	Límite superior	4,51	10,79	1,44	16,74	3,04
	Límite inferior	3,74	9,28	1,44	14,46	0,76

La figura 4-5 muestra las contribuciones relativas del sector de transporte (emisiones que cumplen y que no cumplen las normas) y de otras fuentes a las concentraciones de $PM_{2.5}$ ambiental. Estimamos la contribución de otras fuentes, tanto antropogénicas como no antropogénicas, restando la contribución total de vehículos a las concentraciones de $PM_{2.5}$ ambiental del promedio anual de 2016 de concentraciones de $PM_{2.5}$ ambiental en Lima-Callao¹⁸.

La concentración promedio anual de $PM_{2.5}$ para 2016 fue de $25,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Las emisiones vehiculares contribuyen entre el 67 y el 58 % (límites superior e inferior) de las concentraciones de $PM_{2.5}$ ambiental, y las emisiones que no cumplen las normas contribuyen entre el 12 y el 3 % (límites superior e inferior).

FIGURA 4-5. CONTRIBUCIÓN DEL SECTOR TRANSPORTE Y OTRAS FUENTES A LAS CONCENTRACIONES PROMEDIO DE $PM_{2.5}$ DE 2016



Observamos que las contribuciones de $PM_{2.5}$ que se muestran en la figura 4-5 reflejan los efectos *promedio* en la región. Si bien este análisis evalúa el impacto de las emisiones del transporte y las contribuciones a la contaminación del aire a nivel regional y distrital, las investigaciones han demostrado que la contaminación del aire puede ser significativamente más alta dentro de las zonas cercanas a las grandes carreteras y otras instalaciones de transporte, sobre todo en los primeros 150 a 300 metros, en comparación

¹⁸ El promedio anual se estimó en el BenMAP-CE utilizando los datos de los monitores de 2016 y se ponderó según la población y el espacio. Se espera que la categoría de otras fuentes incluya las fuentes de emisiones tanto antropogénicas como no antropogénicas.

con las concentraciones de contaminación del aire a nivel distrital (Karner *et al.*, 2010). Las personas que viven, trabajan y van a la escuela dentro de estas zonas cercanas a las carreteras tienen un mayor riesgo de sufrir los efectos adversos para la salud, incluyendo la mortalidad prematura (Health Effects Institute, 2010). Por consiguiente, confiar en los análisis de la calidad del aire a nivel distrital puede subestimar los impactos de las fuentes de transporte en la carga de mortalidad general para la población de Lima-Callao.

CAPÍTULO 5 | ESTIMACIÓN Y VALORACIÓN DE LA CARGA DE MORTALIDAD

En este capítulo, explicamos los métodos que utilizamos para evaluar la carga de mortalidad asociada con las concentraciones de PM_{2.5} en Lima-Callao. En total, realizamos tres análisis de beneficios para la salud:

1. La carga total de mortalidad de las concentraciones actuales de PM_{2.5} en Lima-Callao
2. La contribución de las emisiones del transporte a la carga total de mortalidad
3. La contribución de las emisiones de los vehículos que no cumplen las normas a la carga de mortalidad total

Para estos análisis, utilizamos el Programa de Análisis y Mapeo de Beneficios Ambientales, edición comunitaria (BenMAP-CE), versión 1.5.2.0 de la USEPA, un programa de código abierto que cuantifica y valora los efectos adversos para la salud asociados con los cambios en las concentraciones de contaminantes. El resto de este capítulo proporciona una descripción general de nuestro enfoque, incluyendo nuestras fuentes de datos para entradas clave como la población, las tasas de incidencia de referencia y las funciones de concentración-respuesta de la literatura epidemiológica. Por último, ofreceremos una descripción general de nuestro enfoque de valoración.

5.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ENFOQUE

Utilizamos el BenMAP-CE para estimar el impacto de las concentraciones de PM_{2.5} sobre la mortalidad prematura mediante la evaluación de la diferencia en el riesgo de esos criterios de valoración en los escenarios de línea base y de control que se presentaron en el capítulo 2. El BenMAP-CE se basa en las funciones de impacto en la salud para cuantificar el cambio en la incidencia de impactos adversos en la salud que derivan de los cambios en las concentraciones de contaminantes ambientales.

$$\Delta y = y_o \cdot (1 - e^{-\beta \cdot \Delta PM}) \cdot Pop$$

donde Δy es el cambio en la incidencia del efecto adverso para la salud, y_o es la tasa de incidencia de referencia para el efecto sobre la salud, beta (β) es un coeficiente derivado de una estimación del riesgo relativo (RR) asociado con un cambio en la exposición (es decir, en la concentración de contaminantes) como se expresa en las funciones de

concentración-respuesta, ΔPM es el cambio en las concentraciones de material particulado fino, y Pop es la población expuesta.¹⁹

5.2 INGRESO DE DATOS

Nos basamos en múltiples fuentes de datos para parametrizar e implementar la función genérica del impacto en la salud que se presentó anteriormente. Estas fuentes de datos se describen a continuación.

5.2.1 POBLACIÓN

El MINAM proporcionó datos poblacionales a nivel de distrito del sistema estadístico nacional de Perú (INEI) para el período de 2005 a 2015, así como datos de una proyección sobre la población nacional desde 1950 hasta 2070 en incrementos de cinco años. Ambos conjuntos de datos poblacionales incluyen una estratificación por edades en rangos de cinco años. Para tener en cuenta el crecimiento de la población desde 2015 (el año de la estimación poblacional más reciente a nivel distrital), se proyectó la población distrital de 2015 al año 2020 aplicando las tasas de crecimiento nacionales específicas para cada edad. Finalmente, formateamos estos datos para usarlos en el BenMAP-CE.

5.2.2 INCIDENCIA DE MORTALIDAD DE REFERENCIA

Las tasas de incidencia de mortalidad de referencia se calcularon procesando los datos del Centro Nacional de Epidemiología, Prevención y Control de Enfermedades (CNEPCE) del Ministerio de Salud del Perú (MINSA). Estos datos incluyen el cálculo de una serie de criterios de valoración de mortalidad y morbilidad desde 1986 hasta 2016. Los datos de mortalidad se reportan por distrito, género y edad en incrementos de cinco años. Para este análisis, nos centramos en la incidencia de mortalidad de los siguientes criterios de valoración: Enfermedad Isquémica del Corazón (IHD, *por sus siglas en inglés*), Infección Aguda de las vías Respiratorias Inferiores (LRI, *por sus siglas en inglés*), Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica (COPD, *por sus siglas en inglés*), cáncer de pulmón, enfermedad cerebrovascular y causas naturales (en adelante, enfermedades no transmisibles [NCD, *por sus siglas en inglés*] más LRI). Estos criterios de valoración se seleccionaron para que concuerden con las funciones de impacto en la salud que se describen en la siguiente sección.

Antes de utilizarlos en el BenMAP-CE, convertimos los datos de recuento de mortalidad en tasas de incidencia (casos por persona por año). Primero, formateamos los datos de mortalidad para alinearlos con el nivel de agregación en el conjunto de datos poblacionales (año, distrito, criterio de valoración y grupo de edad). Después dividimos los recuentos entre la población de distritos y edades específicos de los años

¹⁹ Según la forma funcional de la función de concentración-respuesta subyacente, la forma funcional de la función de impacto en la salud puede diferir. ΔPM también se puede reemplazar con las concentraciones de otros contaminantes (p. ej., ozono) o condiciones (p. ej., temperatura).

correspondientes. Para minimizar la variabilidad entre los años, estimamos las tasas de incidencia para un período de cinco años (de 2011 a 2015). En algunos casos, agregamos las tasas de incidencia de diversas causas para alinearlas con las definiciones de los criterios de valoración en las funciones de impacto en la salud (descritas a continuación). Por ejemplo, Tapia *et al.* (2020) refleja la mortalidad respiratoria y circulatoria.

5.2.3 FUNCIONES DE IMPACTO EN LA SALUD

Como se describió anteriormente, las funciones de impacto en la salud proporcionan el marco cuantitativo para estimar los cambios en el estado de salud que resultan de los cambios en las concentraciones de contaminantes, incorporando los datos sobre la población y la incidencia de referencia. Estas funciones derivan de las relaciones de concentración-respuesta publicadas en la investigación epidemiológica, que brindan información sobre la magnitud del efecto de un contaminante en la salud. Por ejemplo, un estudio puede sugerir que, por cada cambio de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el $\text{PM}_{2.5}$, podemos esperar que la incidencia de mortalidad de referencia cambie en un 6 %. La figura 5-1 resume las funciones de impacto en la salud que seleccionamos para evaluar la carga de mortalidad.

FIGURA 5-1. FUNCIONES DE IMPACTO EN LA SALUD DEL BENMAP-CE

AUTOR	GRUPO DE CRITERIOS DE VALORACIÓN DE LA MORTALIDAD	EDADES
Burnett <i>et al.</i> (2018)	Enfermedades no transmisibles más la infección de las vías respiratorias inferiores (NCD + LRI)	De 25 a 99
	Enfermedad cerebrovascular	De 25 a 99
	Enfermedad pulmonar obstructiva crónica (COPD)	De 25 a 99
	Enfermedad isquémica del corazón (IHD)	De 25 a 99
	Cáncer de pulmón	De 25 a 99
	Infección de las vías respiratorias inferiores (LRI)	De 25 a 99
Tapia <i>et al.</i> (2020)	Todas las enfermedades respiratorias y circulatorias	De 0 a 99

Dos estudios epidemiológicos proporcionan las relaciones concentración-respuesta que se resumen en la figura 5-1. En primer lugar, utilizamos las funciones de impacto en la salud del Modelo de mortalidad por exposición global (GEMM) precargadas en el BenMAP-CE. El GEMM es una familia de funciones que desarrollaron Burnett *et al.* (2018) para estimar la carga mundial de morbilidad atribuible a la exposición al $\text{PM}_{2.5}$ en todo el rango de exposición mundial. El GEMM consta de funciones de riesgo para seis criterios de valoración de la mortalidad: NCD + LRI, enfermedad cerebrovascular, COPD, IHD,

cáncer de pulmón y LRI.²⁰ Cabe destacar que el GEMM es una función metaanalítica que se desarrolló a partir de estudios de PM_{2,5} de alta calidad realizados a nivel mundial. Además, las funciones no son lineales. Es decir, la magnitud del efecto del PM_{2,5} sobre las muertes prematuras depende de las concentraciones de PM_{2,5} observadas. En general, las funciones sugieren que el efecto mínimo del PM_{2,5} disminuye cuando las concentraciones son más altas.

En segundo lugar, utilizamos las estimaciones de mortalidad respiratoria y circulatoria atribuible al PM_{2,5} de Tapia *et al.* (2020).²¹ Si bien estas estimaciones son específicas de Lima, Perú, el estudio evalúa la mortalidad asociada con las exposiciones de corto plazo al PM_{2,5}. Así pues, prevemos que el estudio subestimaré los impactos totales del PM_{2,5} debido a una fuerte evidencia empírica de que gran parte del efecto del contaminante se asocia con su exposición a largo plazo.

²⁰ Aunque las funciones específicas por edad del GEMM se presentan en Burnett *et al.* (2018), utilizamos las funciones para todas las edades (de 25 a 99) para capturar los efectos en toda la población. Del mismo modo, Burnett *et al.* (2018) proporcionan estimaciones con y sin una cohorte masculina china incluida en su metaanálisis. Utilizamos las funciones del GEMM con la cohorte masculina china porque estas estimaciones se basan, en parte, en los niveles más altos de exposición al PM_{2,5} que experimenta la cohorte china. Estas concentraciones más altas pueden ser relevantes para las condiciones de calidad del aire en Lima-Callao.

²¹ Encontramos el estudio de Tapia *et al.* (2020) mediante la realización de una revisión de la literatura para estudios epidemiológicos de PM_{2,5} en Lima-Callao, Perú o América del Sur utilizando una búsqueda amplia de palabras clave en Google Scholar y PubMed. Encontramos 17 artículos y resúmenes potencialmente relevantes. Luego, reducimos esta lista a tres candidatos potenciales para el cálculo del impacto en la salud en el BenMAP-CE: Hansel *et al.* (2018), Tapia *et al.* (2019) y Tapia *et al.* (2020). Los tres estudios se seleccionaron debido a sus criterios de valoración respiratorios y cardiovasculares relevantes. Hansel *et al.* (2018) proporcionaron funciones que relacionan la exposición al PM_{2,5} con la morbilidad del asma, incluyendo el asma no controlada, la calidad de vida adversa relacionada con el asma, la utilización de la atención médica y los días escolares perdidos. Tapia *et al.* (2019) proporcionaron funciones que relacionan la exposición al PM_{2,5} con las visitas a las salas de urgencias por problemas cardiorrespiratorios y Tapia *et al.* (2020) proporcionaron funciones que relacionan la exposición al PM_{2,5} con la mortalidad cardiorrespiratoria. No aplicamos las otras funciones que encontramos, ya que son para los criterios de valoración de morbilidad y este informe se centra únicamente en la carga de mortalidad.

5.2.4 VALORACIÓN

Sobre la base de la indicación del MINAM, valoramos la mortalidad mediante el valor de la vida estadística (value per statistical life, VSL) estimado del Seminario de Marzi (2017). El VSL representa la contribución al ingreso nacional por cada muerte evitada, lo que se denomina capital humano. Este enfoque valora los efectos de la mortalidad teniendo en cuenta la productividad laboral de las personas y sus ingresos futuros. Los autores sintetizan las estimaciones por edad y sexo utilizando una tasa de descuento del 8 %. El valor promedio resultante, \$0,14 millones (\$ de 2017), se aplica a las muertes prematuras para reflejar los costos de la mortalidad atribuible al PM_{2,5}. Como se señala en los capítulos siguientes, esta estimación está asociada a cierta incertidumbre, y las metodologías de valoración alternativas pueden dar lugar a estimaciones diferentes. Por ejemplo, el análisis del MINAM sobre las normas Euro 6 incluyó un rango de estimaciones de \$0,14 millones a \$1,6 millones (\$ de 2017).²²

²² Una alternativa al enfoque del capital humano sería utilizar una estimación de la disposición a pagar (willingness to pay, WTP) por las reducciones del riesgo de mortalidad, por ejemplo, las proporcionadas por Robinson *et al.* (2018). El VSL representa la WTP de las personas por las reducciones incrementales de su riesgo anual de muerte y se entiende generalmente como un enfoque más completo para valorar la reducción del riesgo de mortalidad. Robinson *et al.* (2018) extrapola un VSL específico de Perú de \$1,21 millones (\$ de 2015) a partir de la base de VSL de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD) (\$3 millones) utilizando la relación del ingreso nacional bruto per cápita entre Perú y los países de la OECD. Aunque no conocemos ningún estudio sobre la WTP realizado en Perú, el estudio de Robinson *et al.* proporciona métodos y resultados para transferir los valores de la VSL a países sin estimaciones primarias. Los autores sintetizan las estimaciones disponibles en otros países y trasladan estos valores a Perú, entre otros muchos países, teniendo en cuenta las diferencias del ingreso per cápita, un factor clave que influye en la WTP y la VSL. Utilizamos el enfoque del capital humano basado en la indicación del MINAM.

CAPÍTULO 6 | RESULTADOS

En este capítulo, presentamos los resultados de nuestros análisis de carga de mortalidad utilizando los métodos y fuentes de datos descritos en los capítulos anteriores. Primero, presentamos los impactos en la mortalidad cuantificados y valorados que se asocian con las concentraciones totales de $PM_{2,5}$ en Lima-Callao. En segundo lugar, presentamos los resultados específicos del sector de transporte. Por último, estimamos la carga asociada con el exceso de emisiones de los vehículos que no cumplen las normas en la región. En el apéndice D, presentamos estos resultados estratificados según el distrito de Lima-Callao.

6.1 CARGA DE MORTALIDAD TOTAL ATRIBUIBLE AL $PM_{2,5}$

Estimamos que las emisiones de $PM_{2,5}$ ambiental en Lima-Callao causan más de 10 000 muertes al año. Estos resultados, que se resumen en la figura 6-1, varían según la función de impacto en la salud que se seleccione y la capa de información de calidad del aire de línea base. Los resultados de las NCD y LRI del GEMM son nuestras estimaciones preferidas. Este factor inducible por hipoxia (HIF) recoge una gama más amplia de muertes atribuibles a la contaminación del aire en relación con las cinco estimaciones del GEMM por causas específicas, es decir, cinco Causas de Muerte (COD, *por sus siglas en inglés*), y los resultados locales de Tapia *et al.* (2020). Además, el estudio de Tapia *et al.* solo tiene en cuenta la exposición de corto plazo al $PM_{2,5}$ e ignora los impactos considerables a largo plazo de la contaminación del aire en la mortalidad. Los resultados son bastante estables en las capas de información de calidad del aire; son los datos del monitoreo de 2019 (12 016 muertes) los que presentan la mayor carga en relación con las capas de Shaddick y van Donkelaar (10 556 y 10 838, respectivamente). Para lo que resta de este informe, presentamos la capa de Shaddick y los resultados de las NCD y LRI del GEMM como nuestras estimaciones principales. Destacamos los resultados de la capa de Shaddick, ya que sus datos son más recientes y se generaron utilizando un modelo de la OMS que se basa en los métodos anteriores de van Donkelaar. El modelo estima la relación espacialmente variable entre las mediciones en tierra de $PM_{2,5}$ y los factores de los diversos modelos de calidad del aire (consulte el apéndice B para obtener más detalles).

FIGURA 6-1. CARGA DE MORTALIDAD ESTIMADA ATRIBUIBLE AL PM_{2,5}

CAUSA DE LA MORTALIDAD	MUERTES PREMATURAS		
	MONITOREOS	SHADDICK	VAN DONKELAAR
GEMM: NCD + LRI	12 016	10 556	10 838
GEMM: 5 COD	7 425	6 517	6 514
Infección de las vías respiratorias inferiores	4 022	3 538	3 531
Enfermedad isquémica del corazón	1 486	1 321	1 338
Enfermedad cerebrovascular	987	843	841
Cáncer de pulmón	590	524	508
COPD	339	292	296
Tapia: Respiratorio y circulatorio (exposición de corto plazo)	1 486	1 245	1 272

El total de muertes atribuibles al PM_{2,5}, estimado en 10 556, representa el costo anual de la contaminación del aire en la región. En la medida en que la calidad del aire, la población y las tasas de referencia de muerte sean relativamente comparables a lo largo del tiempo, prevemos que estos impactos adversos ocurrirán cada año. Los costos asociados con estas muertes ascienden a \$12 700 millones anuales (\$ de 2015).²³ Cabe señalar que estos costos son independientes de la fuente: tanto las fuentes antropogénicas (p. ej., la industria o el transporte) como las no antropogénicas (p. ej., la sal marina o el polvo de la corteza) contribuyen al total de las concentraciones de PM_{2,5} ambiental en la región. En las siguientes secciones, presentamos la carga asociada con las fuentes de transporte.

6.2 CARGA DE MORTALIDAD POR PM_{2,5} ATRIBUIBLE AL TRANSPORTE

Las emisiones de los vehículos en circulación en Lima-Callao provocan entre 5 150 y 6 200 muertes prematuras cada año. Estos resultados se resumen en la figura 6-2 junto con los costos económicos asociados. Es importante tener en cuenta que la contribución de las emisiones vehiculares al PM_{2,5} ambiental supone que existe algún nivel de incumplimiento incluso en el cumplimiento de las normas de emisiones (es decir, ninguna estimación representa un cumplimiento del 100 % de las normas de emisiones). Además, la variación en la contribución de las emisiones vehiculares se debe únicamente a la variación en las emisiones de los vehículos que no cumplen con las normas.

²³ Utilizando el rango de estimaciones del valor estadístico de la vida (VSL) en el análisis del MINAM sobre la norma Euro 6, la carga total de mortalidad monetizada en Perú puede oscilar entre \$1500 millones (VSL = \$0,14 millones) y \$16 900 millones (VSL = \$1.61 millones).

FIGURA 6-2. CARGA DE MORTALIDAD ESTIMADA ATRIBUIBLE AL PM_{2,5}, SECTOR DE TRANSPORTE

CONTRIBUCIÓN DE LAS EMISIONES VEHICULARES	MUERTES ANUALES ATRIBUIBLES AL PM _{2,5} (SHADDICK)	COSTO ECONÓMICO ANUAL (\$ DE 2015, EN MILLONES)
Límite inferior	5 150	\$6200
Límite superior	6 200	\$7500

La carga de mortalidad estimada para las fuentes de transporte asciende a más de la mitad de la carga de mortalidad total por PM_{2,5}, lo que refleja la enorme influencia del sector en la contaminación del aire en la región. El rango en las estimaciones de mortalidad refleja la incertidumbre en las tasas de emisiones exactas de los vehículos que no cumplen las normas. Como se resume en la figura 6-2, los costos económicos asociados con las concentraciones de PM_{2,5} atribuibles al transporte son de \$6200 a \$7500 millones anuales. Como describimos en el apéndice C, estas estimaciones pueden subestimar la carga de las fuentes de transporte debido a la no linealidad de la función del GEMM. Además, como se indica en el capítulo 4, es posible que estos resultados no capturen los efectos a escala local en su totalidad, incluyendo las exposiciones a las concentraciones significativamente mayores de PM_{2,5} en las carreteras o cerca de ellas.

6.3 CARGA DE MORTALIDAD POR PM_{2,5} ATRIBUIBLE A VEHÍCULOS QUE NO CUMPLEN LAS NORMAS

Como se analizó en el capítulo 3, las mediciones de emisiones del MINAM sugieren que casi la mitad de todos los vehículos en circulación en Lima-Callao no cumplen con las normas de emisiones. Ajustamos los inventarios de emisiones en consecuencia y estimamos la calidad del aire y los impactos en la salud resultantes. En total, encontramos que las emisiones de vehículos que no cumplen las normas de emisiones son responsables de 248 a 991 muertes al año. Estos resultados se presentan en la figura 6-3. El exceso de emisiones (es decir, las que superan los niveles establecidos por las normas) de los vehículos que no cumplen las normas representan entre el 5 y 16 % de la carga de mortalidad del transporte (comparación de las figuras 6-2 y 6-3).

FIGURA 6-3. CARGA DE MORTALIDAD ANUAL ESTIMADA ATRIBUIBLE AL $PM_{2,5}$, EMISIONES QUE NO CUMPLEN LAS NORMAS

CONTRIBUCIÓN DE LAS EMISIONES VEHICULARES	MUERTES ANUALES ATRIBUIBLES AL $PM_{2,5}$ (SHADDICK)	COSTO ECONÓMICO ANUAL (\$ DE 2015, EN MILLONES)
Límite inferior	248	\$300
Límite superior	991	\$1 200

Como se señaló anteriormente, el rango en las estimaciones de mortalidad refleja la incertidumbre en las tasas de emisiones exactas de los vehículos que no cumplen las normas. Los costos económicos asociados con las emisiones de los vehículos que no cumplen las normas se encuentran entre \$300 y \$1 200 millones anuales. Los responsables de formular las políticas pueden interpretar estas estimaciones como los posibles beneficios anuales que pueden lograrse al implementar medidas regulatorias que abordan la totalidad de las emisiones que no cumplen las normas. Es decir, se esperaría lograr un cumplimiento perfecto de las normas de emisiones vehiculares para evitar entre 248 y 991 muertes al año, lo que daría como resultado beneficios anuales de \$300 a \$1 200 millones. Si bien el cumplimiento perfecto puede ser inviable, la carga de mortalidad asociada con las emisiones de los vehículos que no cumplen las normas es considerable, por lo que cualquier política que mejore el cumplimiento de manera sustancial producirá grandes beneficios para la salud pública en Lima-Callao.

CAPÍTULO 7 | DISCUSIÓN Y PRÓXIMOS PASOS

En los capítulos anteriores, describimos en detalle nuestro enfoque analítico y nuestros hallazgos. En este capítulo, resumimos nuestros resultados y analizamos sus implicancias. También sugerimos posibles próximos pasos para los investigadores y el personal del MINAM.

7.1 RESUMEN DE LOS RESULTADOS

Nuestros análisis de la carga de mortalidad aportan pruebas de que las concentraciones de $PM_{2,5}$ en la región de Lima-Callao representan un problema importante de salud pública. En general, las concentraciones ambientales suelen oscilar entre 11,8 y 36,4 $\mu g/m^3$ sobre una base anual y es probable que algunas “zonas críticas” experimenten concentraciones de contaminación mucho más altas, sobre todo en escalas de tiempo y distancia más cortas. Estos valores superan la pauta anual de la OMS de 10 $\mu g/m^3$. En total, estimamos que la exposición al $PM_{2,5}$ causa más de 10 000 muertes cada año en Lima-Callao. Los costos económicos de esta pérdida ascienden a \$12 800 millones de dólares anuales.

El sector de transporte contribuye en gran medida al $PM_{2,5}$ ambientales y a la mortalidad prematura en la región. Ampliamos el análisis general de la carga de $PM_{2,5}$ evaluando más de cerca la carga de mortalidad asociada con las concentraciones de $PM_{2,5}$ que producen los vehículos en circulación. Estimamos que el transporte en circulación en la región produce entre 14,5 y 16,7 $\mu g/m^3$ de concentraciones ambientales de $PM_{2,5}$ (58 a 67 %). Estas emisiones ocasionan entre 5 150 y 6 200 muertes prematuras al año, lo que equivale a entre \$6 200 y \$7 500 millones en costos económicos.

Las intervenciones regulatorias en Lima-Callao pueden reducir la carga de mortalidad asociada con las emisiones del transporte. Destacamos el papel que juegan los vehículos que no cumplen las normas en las emisiones regionales al ajustar los inventarios de emisiones disponibles utilizando las estimaciones recientes del MINAM sobre las tasas de incumplimiento (entre 3 y 12 % aproximadamente) en la región. Encontramos que este subconjunto de vehículos puede ser la razón de entre 1 y 3 $\mu g/m^3$ en la región. La amplia gama de estimaciones se debe a la incertidumbre en la cuantificación de las emisiones de estos vehículos. Las emisiones de los vehículos que no cumplen las normas y que exceden los Límites Máximos Permisibles de emisiones vehiculares ocasionan entre 250 y 990 muertes prematuras al año, lo que equivale a entre \$300 y \$1 200 millones en costos económicos. Estos costos pueden reducirse mediante medidas regulatorias, como una mayor imposición o programas mejorados de I&M.

7.2 INCERTIDUMBRES

Los resultados que se presentaron anteriormente están acompañados de varias fuentes de incertidumbre, cuyo efecto neto sobre nuestras estimaciones es ambiguo. Intentamos catalogar las principales fuentes de incertidumbre en la figura 7-1.

FIGURA 7-1. INCERTIDUMBRES CLAVE EN EL ANÁLISIS DE LA CARGA

LIMITACIÓN/FUENTE DE ERROR POTENCIAL	DIRECCIÓN DEL SESGO POTENCIAL PARA LA CARGA ESTIMADA
Los impactos en la salud asociados con otros contaminantes no se cuantificaron.	Subestimación. La evidencia epidemiológica respalda una relación causal entre la exposición al ozono y los efectos de mortalidad y morbilidad. Cuantificar y valorar estos resultados aumentaría la carga general de contaminación del aire en la región.
Los efectos de morbilidad no se cuantificaron.	Subestimación. La evidencia epidemiológica respalda una relación causal entre la exposición al PM _{2,5} y numerosos efectos respiratorios y cardiovasculares no fatales. Cuantificar y valorar estos resultados aumentaría la carga general.
Carga de mortalidad para las poblaciones cercanas a las carreteras.	Subestimación. La evidencia epidemiológica respalda los efectos adicionales en la salud de las poblaciones que viven muy cerca de las grandes carreteras. Cuantificar y valorar estos resultados aumentaría la carga general de contaminación del aire en la región.
Prevalencia de vehículos que no cumplen las normas.	No se puede determinar a partir de la información actual. Las tasas de incumplimiento se calculan según una muestra limitada (n = 2625), pero pueden ser menores o mayores en toda la flota vehicular.
Tasas de emisiones para los vehículos que no cumplen las normas.	No se puede determinar a partir de la información actual. El incumplimiento se determina a partir de pruebas que no miden el NO _x ni el PM _{2,5} . No hay estimaciones empíricas de los efectos sobre estos contaminantes disponibles. Proporcionamos dos supuestos potenciales sobre las emisiones de los vehículos que no cumplen las normas; sin embargo, las verdaderas emisiones pueden ser superiores o inferiores a estos límites.
Enfoque de modelización de la calidad del aire.	No se puede determinar a partir de la información actual. Los modelos alternativos de calidad del aire pueden describir mejor la magnitud y la distribución espacial de las concentraciones de PM _{2,5} derivadas de una tonelada de emisiones precursoras.
Relación concentración-respuesta entre el PM _{2,5} y la mortalidad.	No se puede determinar a partir de la información actual. La función del GEMM recopila los resultados de muchos estudios epidemiológicos, algunos de los cuales encuentran efectos más débiles o más fuertes inducidos por el PM _{2,5} . Tampoco tenemos una estimación de los impactos de la mortalidad a largo plazo a partir de un estudio realizado a nivel local; el único estudio local de impactos en la mortalidad solo evaluó los que están asociados con las exposiciones a corto plazo, lo que subestimaría los impactos en la mortalidad a más largo plazo.

LIMITACIÓN/FUENTE DE ERROR POTENCIAL	DIRECCIÓN DEL SESGO POTENCIAL PARA LA CARGA ESTIMADA
No se utilizó ningún intervalo de cese para la mortalidad prematura.	Sobrestimación. Si hay un intervalo de tiempo entre los cambios de $PM_{2,5}$ y la mortalidad prematura, entonces se deben descartar los beneficios que ocurran en el futuro.
Valoración de beneficios por mortalidad.	No se puede determinar a partir de la información actual. A menudo se piensa que el enfoque de valoración del capital humano subestima la verdadera disposición a pagar de la persona para reducir su riesgo de muerte. Sin embargo, no se han realizado estudios primarios en Perú para estimar la disposición a pagar (WTP) por las reducciones del riesgo de mortalidad. El análisis del MINAM sobre la norma Euro 6 incluye varias estimaciones del VSL mayores que la estimación que se utilizó en este análisis.

Abordar las incertidumbres específicas, siempre que sea posible, es un paso importante para el personal del MINAM y los investigadores académicos. Si bien las incertidumbres que se presentan en la figura 7-1 pueden considerarse aceptables para los tipos de análisis que se resumen en este informe, es posible que se justifique abordar una o más de estas limitaciones para los análisis de beneficios regulatorios. En la siguiente sección, presentamos nuestros temas recomendados para futuras investigaciones.

7.3 PRÓXIMOS PASOS

Como se analizó anteriormente, nuestros resultados están acompañados de datos y limitaciones metodológicas, algunas de las cuales se pueden abordar en análisis futuros del MINAM y de los investigadores académicos. Recomendamos varias áreas de enfoque para desarrollar los métodos que se presentaron en este informe:

- Aplicar modelos de calidad del aire más avanzados, como los modelos fotoquímicos de calidad del aire que se emplearon anteriormente en Lima-Callao (ver Sánchez-Ccoyllo *et al.*, 2016).
- Cuantificar y valorar los efectos de la morbilidad (p. ej., la aparición del asma y las exacerbaciones, las hospitalizaciones por problemas respiratorios y cardiovasculares, y las visitas a la sala de emergencias).
- Considerar los impactos de la formación de ozono y la exposición a este atribuible al transporte.
- Evaluar con detenimiento las exposiciones cercanas a las carreteras (es decir, los impactos en la salud que resultan de la exposición a concentraciones elevadas de $PM_{2,5}$ y otras concentraciones de contaminantes cerca de las vías y carreteras muy transitadas y contaminadas).

Además de abordar las limitaciones metodológicas descritas, este informe presenta un marco que puede ampliarse para responder preguntas de investigación relacionadas. Primero, los análisis de carga realizados hasta este momento pueden adaptarse para

evaluar los beneficios de medidas regulatorias específicas, como una mayor aplicación de las normas de emisiones vehiculares y programas mejorados de I&M vehicular. En segundo lugar, los análisis de carga pueden ampliarse para evaluar la carga de mortalidad atribuible al $PM_{2.5}$ que proviene de otras fuentes en Lima-Callao. Por ejemplo, los resultados podrían estratificarse aún más para resaltar la carga de mortalidad asociada con fuentes específicas dentro del sector de transporte, como autobuses o camiones.

Asimismo, este análisis podría ampliarse para evaluar la carga de mortalidad atribuida al $PM_{2.5}$ que se genera mediante la producción de energía o la fabricación de productos químicos, dos industrias importantes dentro de Lima-Callao (MINAM, 2018). Estos resultados también podrían expresarse a nivel individual por vehículo. Comprender la carga de mortalidad promedio que resulta de un vehículo que no cumple las normas, por ejemplo, puede servir como una guía útil para los responsables de formular políticas para (1) identificar los tipos de vehículos para controles de emisiones específicos y (2) evaluar si los costos de control de emisiones se justificarían en función de los costos sociales asociados con cada vehículo. Además, se podrían realizar evaluaciones para implementar estrategias de mitigación de $PM_{2.5}$ para reducir las concentraciones a nivel de la comunidad, como limpiar las calles, identificar las zonas de bajas emisiones e instalar barreras en las carreteras como parte de la expansión de este trabajo para evaluar las exposiciones cercanas a las carreteras. Además, este informe presenta un marco que podría ampliarse para incluir otros sectores. Cuando los datos sobre las emisiones estén disponibles y sean compatibles con los modelos de calidad del aire, este marco podría aplicarse a otras fuentes, como fuentes puntuales industriales.

Por último, esperamos que este informe pueda servir como un camino para el desarrollo continuo de la capacidad técnica para el análisis de los beneficios para la salud. Los análisis similares que se realizaron en el marco de otros esfuerzos de Megaciudades se acompañaron con talleres centrados en la herramienta BenMAP-CE, las prácticas recomendadas para realizar un análisis de los beneficios de la contaminación del aire y la síntesis de políticas para avanzar en los esfuerzos locales de gestión de la calidad del aire. Entendemos que, en la actualidad, el MINAM está realizando un análisis paralelo utilizando el software AirQ+. La comparación de los resultados y métodos serviría para reforzar las cifras que se presentaron en este informe y mejorar las capacidades del MINAM con cada herramienta. Además, involucrar al personal adicional del MINAM y las partes interesadas relevantes (p. ej., académicos, expertos de la industria o municipalidades) puede servir para (1) difundir los resultados de manera más amplia y mejorar la utilidad del informe, y (2) mejorar este estudio incorporando fuentes de datos alternativas y métodos recomendados por las partes interesadas.

REFERENCIAS

- Burnett, R., Chen, H., Szyszkowicz, M., Fann, N., Hubbell, B., *et al.* 2018. Global estimates of mortality associated with long-term exposure to outdoor fine particulate matter. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. Vol. 115 (38): 9592-9597.
- Hansel, N.N., Romero, K.M., Pollard, S.L., Bose, S., Psoter, K.J., J. Underhill, L., Johnson, C., Williams, D.A., Curriero, F.C., Breyse, P., y Koehler, K. 2019. Ambient air pollution and variation in multiple domains of asthma morbidity among Peruvian children. *Annals of the American Thoracic Society*, 16(3), págs. 348-355.
- Health Effects Institute. 2010. *Traffic-Related Air Pollution: A Critical Review of the Literature on Emissions, Exposure, and Health Effects*.
<https://www.healtheffects.org/system/files/SR17TrafficReview.pdf>
- Karner, A., Eisinger, D., y Niemeier, D. 2010. Near-Roadway Air Quality: Synthesizing the Findings from Real-World Data. *Environmental Science and Technology*, 44(14): 5334-44.
- MINAM. 2018. Avance: Plan de Acción para el Mejoramiento de la Calidad del Aire de Lima-Callao; *Versión Preliminar: Diagnóstico de la Gestión de la Calidad Ambiental del Aire de Lima y Callao*.
- Robinson, L.A., Hammitt, J.K., y O'Keefe, L. 2018. Valuing Mortality Risk Reductions in Global Benefit-Cost Analysis. Guidelines for Benefit-Cost Analysis Project Working Paper No. 7.
- Sánchez-Ccoyllo, O.R., C.G. Ordoñez-Aquino, Á.G. Muñoz, A. Llacza, M.F. Andrade, Y. Liu, W. Reátegui-Romero, y G. Brasseur. 2018. Modeling Study of the Particulate Matter in Lima with the WRF-Chem Model: Case Study of April 2016. *International Journal of Applied Engineering Research*, 13(11): 10129-10141.
- Shaddick, G., Thomas, M. L., Green, A., Brauer, M., van Donkelaar, A., Burnett, R., Chang, H.H., Cohen, A., Van Dingenen, R., Dora, C., y Gumy, S. 2018. Data integration model for air quality: a hierarchical approach to the global estimation of exposures to ambient air pollution. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 67(1), 231-253.
- Tapia, V., Steenland, K., Sarnat, S. E., Vu, B., Liu, Y., Sánchez-Ccoyllo, O., Vasquez, V., y Gonzales, G. F. 2019. Time-series analysis of ambient PM_{2,5} and cardiorespiratory emergency room visits in Lima, Peru during 2010–2016. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 1-9.
- Tapia, V., Steenland, K., Vu, B., Liu, Y., Vásquez, V., y Gonzales, G.F. 2020. PM_{2,5} exposure on daily cardio-respiratory mortality in Lima, Peru, from 2010 to 2016. *Environmental Health*, 19(63). <https://doi.org/10.1186/s12940-020-00618-6>

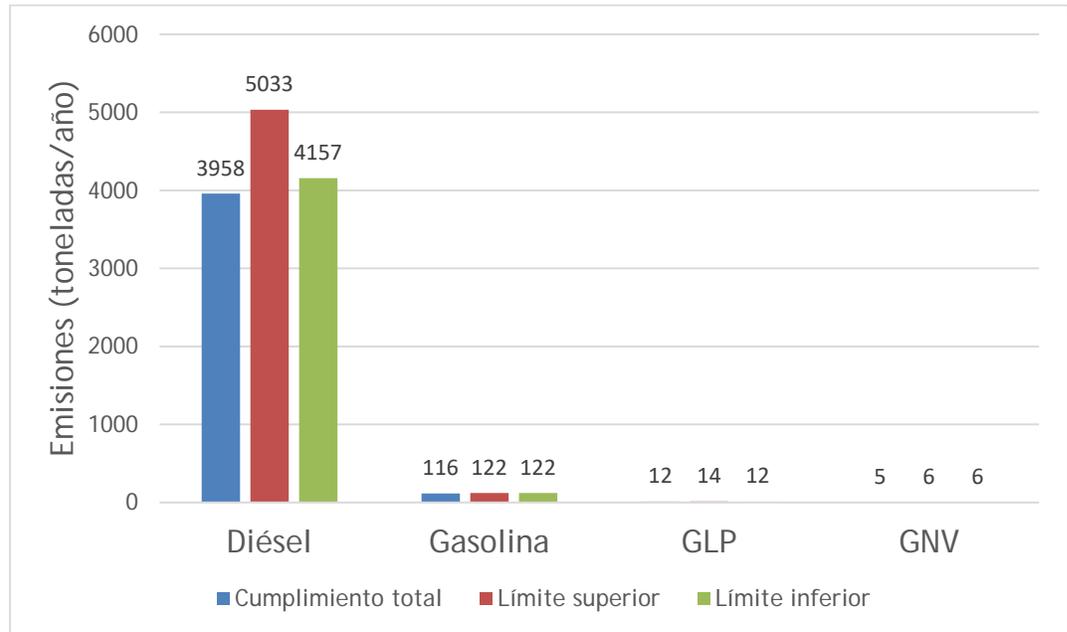
- Thiel, M., E.C. Macaya, E. Acuña, W.E. Arntz, H. Bastias, K. Brokordt, *et al.* 2007. The Humboldt Current System of Northern and Central Chile. *Oceanography and Marine Biology* 15: 195-344.
https://www.researchgate.net/publication/210779714_The_Humboldt_Current_System_of_Northern_and_Central_Chile
- Van Donkelaar, A., Martin, R. V., Brauer, M., Hsu, N. C., Kahn, R. A., Levy, R. C., Lyapustin, A., Sayer, A.M., y Winker, D. M. 2016. Global estimates of fine particulate matter using a combined geophysical-statistical method with information from satellites, models, and monitors. *Environmental science & technology*, 50(7), 3762-3772.

APÉNDICE A | RESULTADOS DE LAS ESTIMACIONES DE EMISIONES ADICIONALES

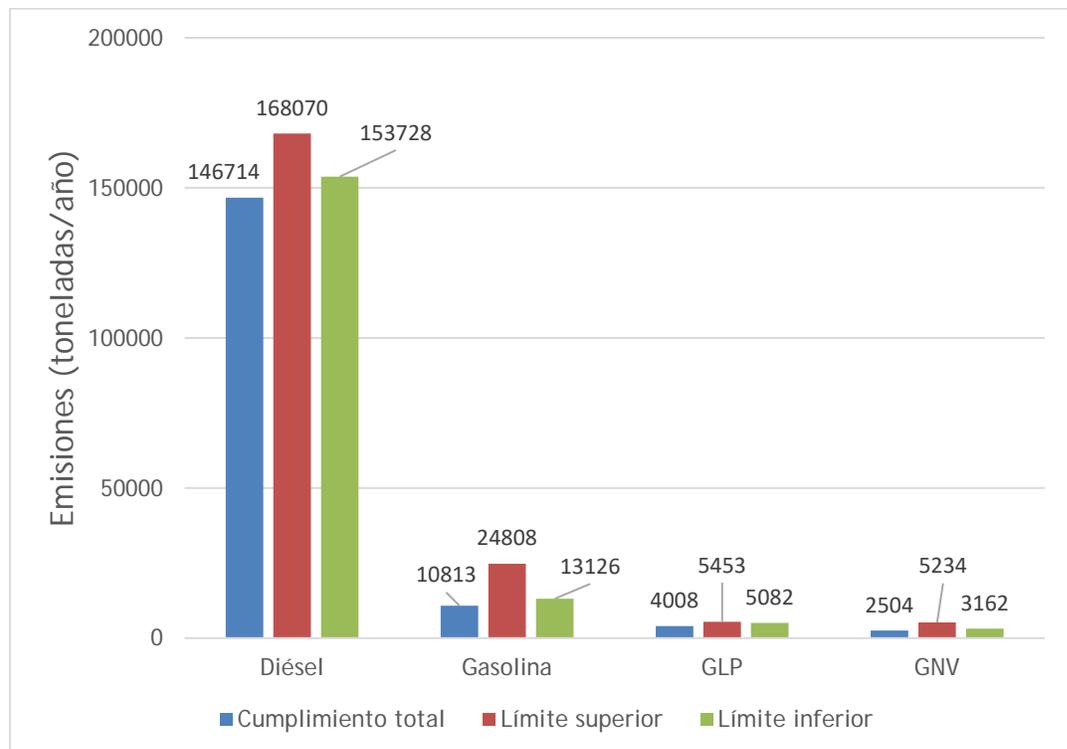
En esta sección, brindamos más detalles sobre las emisiones contaminantes estimadas del sector de transporte. En el capítulo 3, resumimos las estimaciones de las emisiones por contaminante y por supuestos de cumplimiento. A continuación, estratificamos aún más estas estimaciones para mostrar las contribuciones relativas por tipo de combustible para vehículos.

Para el $PM_{2.5}$ y el NO_x , las emisiones de diésel comprenden la mayoría de las emisiones anuales totales (figuras A-1 y A-2). Determinamos que las altas emisiones de diésel no son el resultado de una mayor proporción de vehículos diésel en la flota. Los vehículos diésel representan menos del 20 % de la flota, mientras que los vehículos de gasolina representan más del 70 %. En cambio, los vehículos diésel representan una gran parte (más del 85 %) de los tipos de vehículos de altas emisiones, como camionetas, ómnibus, camiones y grúas. En contraste, las emisiones de gasolina son el mayor contribuyente a las emisiones de SO_2 , como se ve en la figura A-3.

Cabe destacar que se entiende que las emisiones de SO_2 variarían según el contenido de azufre en los combustibles y el consumo total de combustible. Asimismo, se entiende que los controles de emisiones y, por lo tanto, el estado de cumplimiento no afectaría las emisiones de SO_2 en nuestro modelo.

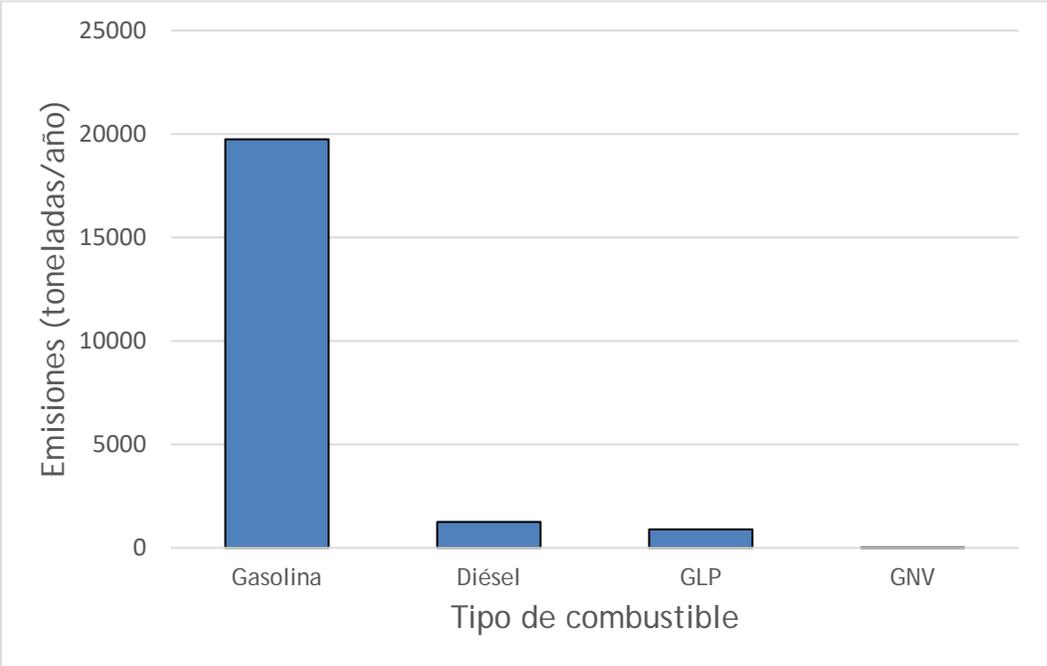
FIGURA A-1. EMISIONES DE PM_{2,5} POR TIPO DE COMBUSTIBLE DE 2018

Nota: GLP = gas licuado de petróleo, GNV = gas natural vehicular.

FIGURA A-2. EMISIONES DE NO_x POR TIPO DE COMBUSTIBLE DE 2018

Nota: GLP = gas licuado de petróleo, GNV = gas natural vehicular.

FIGURA A-3. EMISIONES DE SO₂ POR TIPO DE COMBUSTIBLE DE 2018



Nota: GLP = gas licuado de petróleo, GNV = gas natural vehicular.

APÉNDICE B | PROCESAMIENTO Y MEDICIONES POR SATÉLITE

En el capítulo 4, resumimos las fuentes de datos disponibles que describen la contaminación del aire en Lima-Callao, incluyendo los datos de las estaciones de monitoreo y satélites. En este apéndice, proporcionamos más detalles sobre los conjuntos de datos satelitales y nuestros métodos para "verificar en tierra" estos conjuntos de datos de modo que se reflejen con mayor exactitud las concentraciones de los monitoreos.

Van Donkelaar *et al.* (2016) combinan la información de los satélites, las simulaciones de modelos y los monitoreos. Los satélites proporcionan mediciones globales de la profundidad óptica de aerosoles (AOD). Las capas de van Donkelaar combinan la recuperación de datos de la AOD del espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada de la NASA, el espectrorradiómetro de imágenes de ángulos múltiples y el sensor de campo de visión amplia para la observación del mar. Después, se utilizan simulaciones del modelo de transporte químico de GEOS-Chem para convertir la AOD total de la columna en concentraciones de PM_{2,5} próximas a al nivel superficial. Por último, se utilizan las mediciones de los monitoreos en tierra de la base de datos mundial de la calidad del aire ambiental de la OMS²⁴ con una regresión ponderada geográficamente (GWR) para predecir y ajustar el sesgo residual de PM_{2,5} en cada celda de la cuadrícula a partir de los valores iniciales derivados del satélite.

Las capas de Shaddick *et al.* (2017) son el resultado del Modelo de integración de datos para la calidad del aire (DIMAQ) que desarrolló el Grupo de Trabajo de Integración de Datos de la OMS. Este modelo integra las mediciones de monitoreo de la base de datos mundial de la calidad del aire ambiente de la OMS, la teledetección satelital, las estimaciones poblacionales, la topografía y las medidas de los modelos de transporte químico sobre los actores específicos que contribuyen a la contaminación del aire. Los mismos métodos que utilizaron van Donkelaar *et al.* (2016) se utilizan para combinar la AOD de múltiples satélites con simulaciones de modelos de transporte químico de GEOS-Chem para producir estimaciones de PM_{2,5} próximos a la superficie a una resolución de 0,1°. El DIMAQ va más allá de los métodos de van Donkelaar *et al.* (2016) mediante el uso de un modelo bayesiano para estimar la relación espacialmente variable entre las mediciones en tierra de PM_{2,5} y los factores de los modelos químicos de GEOS-Chem, TM5 y TM5-FASST que estiman la calidad del aire.

Nuestros métodos para calibrar las capas de información satelitales a nivel local se dividen en cuatro pasos: (1) calcular los promedios anuales de PM_{2,5} de las estaciones de

²⁴ Organización mundial de la salud. *WHO Global Ambient Air Quality Database (Update 2018)*; OMS: Ginebra, 2018: <https://www.who.int/airpollution/data/cities/en/>

monitoreo, (2) calcular la relación entre el monitoreo de 2019 y los promedios anuales de $PM_{2.5}$ de los satélites de 2016, (3) interpolar espacialmente las proporciones para crear una capa de calibración y (4) multiplicar la capa de calibración por la capa del satélite para crear una capa de información de calidad del aire calibrada a nivel local.

Primero, determinamos el promedio anual de concentración de $PM_{2.5}$ que se mide a través de los datos de las estaciones de monitoreo en cada lugar. Así pues, se puede encontrar un promedio anual de $PM_{2.5}$ del año 2016 para las diez estaciones en la red de estaciones de monitoreo terrestre del SENAMHI. La figura 1 muestra la información disponible de las estaciones. Además, utilizamos un promedio anual de $PM_{2.5}$ ajustado de 2019 para dos de las estaciones que opera el MINSA, “CA-VMP-1” y “CA-VMP-2”, ya que estas nuevas estaciones muestran un punto crítico o zona con concentraciones altas en el Callao, donde SENAMHI no tiene una red de estaciones de monitoreo. Para incluir tantas ubicaciones de monitoreo como sea posible, ajustamos el promedio anual de $PM_{2.5}$ de 2019 en las estaciones del Callao a las concentraciones de 2016 usando una proporción de los valores de 2016 a 2019. Para el numerador del índice, usamos un promedio ponderado por distancia del promedio anual de 2016 de las dos estaciones de monitoreo de SENAMHI más cercanos. Para el denominador del índice, usamos el valor de la cuadrícula en las ubicaciones de los monitores del Callao de una capa de información promedio anual de 2019 creada con datos de las diez estaciones de monitoreo de SENAMHI.

Luego, determinamos el promedio anual de las concentraciones de $PM_{2.5}$ de la capa satelital de cada ubicación mediante la creación de una zona de separación de un kilómetro a la redonda de cada estación y mediante el cálculo de un promedio ponderado del área dentro de la zona de separación.

En segundo lugar, calculamos un factor de calibración para cada estación, que es igual al promedio anual del monitor dividido por el promedio anual del satélite para cada estación. Un factor de calibración mayor que uno ajusta los datos satelitales hacia arriba y un factor menor que uno ajusta los datos satelitales hacia abajo. En tercer lugar, interpolamos los factores de calibración en todo el dominio utilizando una función de Kriging para crear una capa de calibración (figura B-1). Por último, multiplicamos la capa de calibración por la capa del satélite original para crear una capa final calibrada a nivel local.

Figura B-1. CAPAS DE CALIBRACIÓN DE SHADDICK Y VAN DONKELAAR

b) Calibración de van Donkelaar de 2016

a) Calibración de Shaddick de 2016

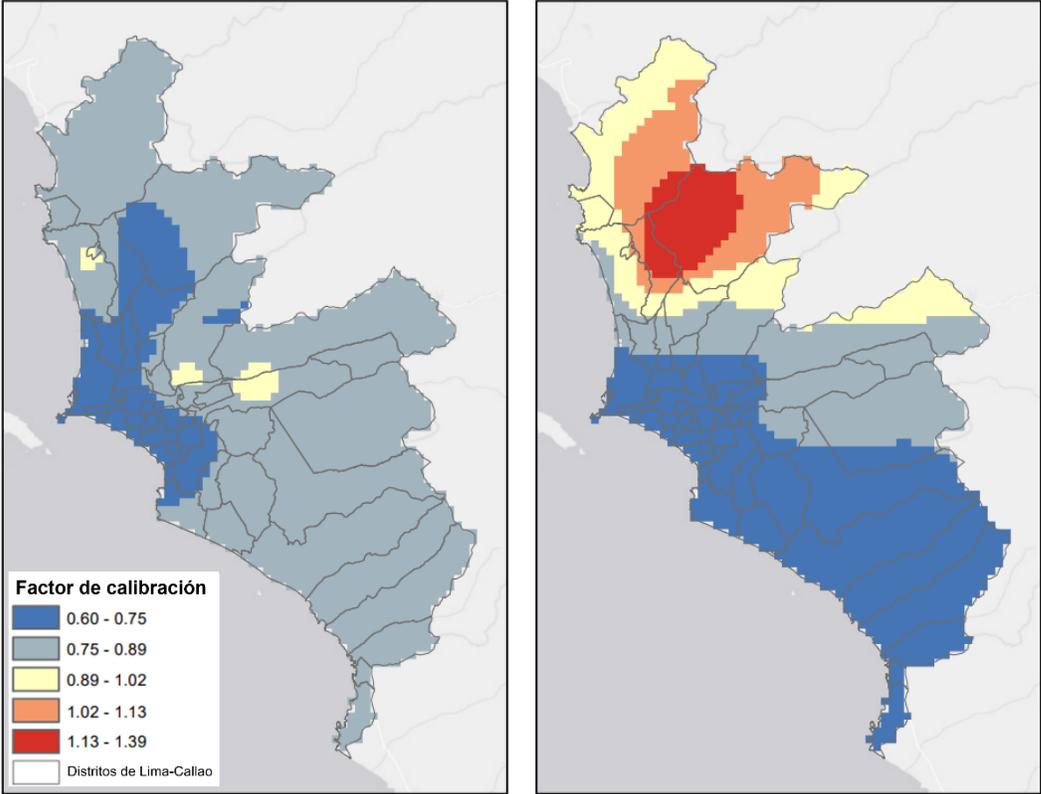
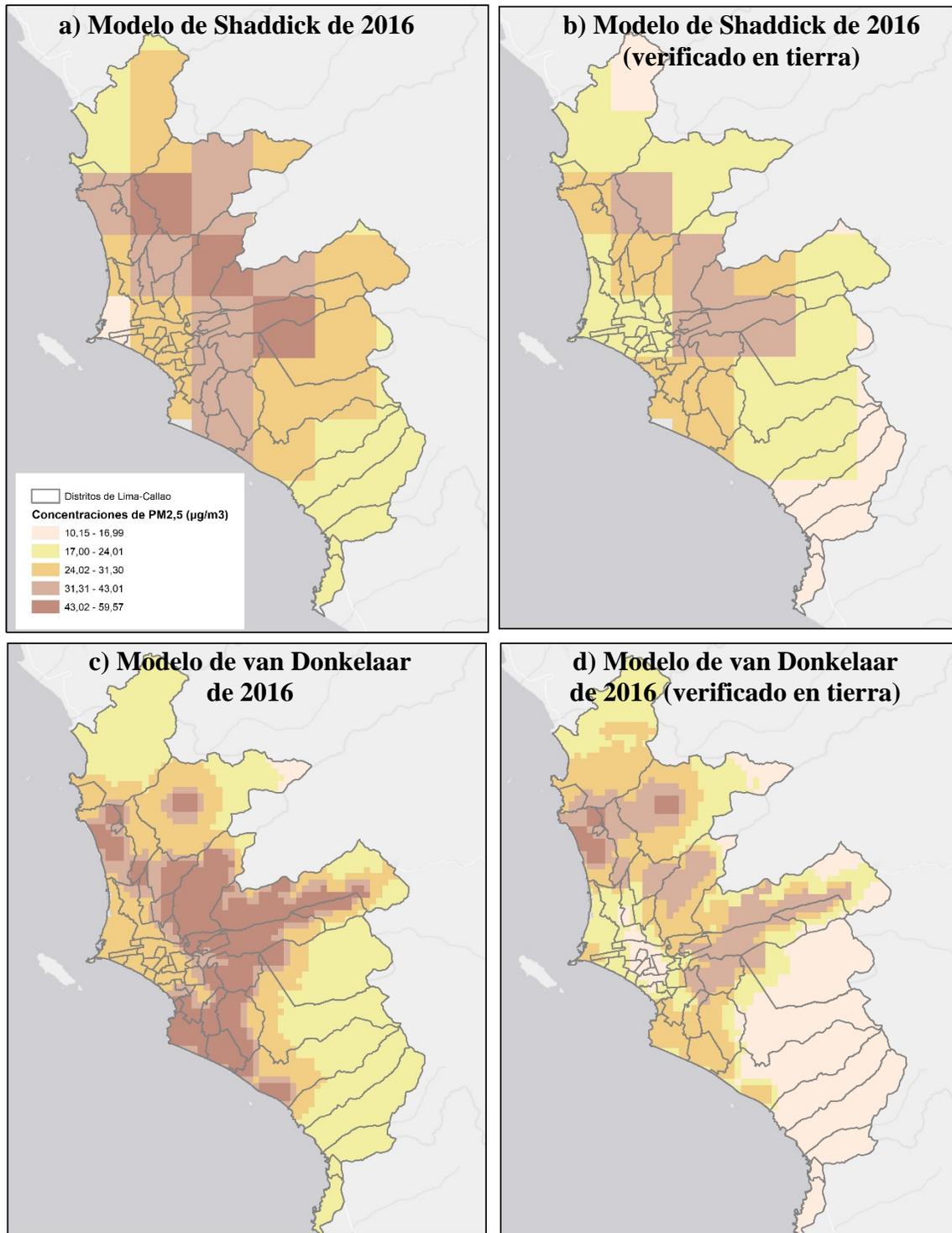


FIGURA B-2. CAPAS DE INFORMACIÓN DE CALIDAD DEL AIRE DE SHADDICK Y VAN DONKELAAR ANTES Y DESPUÉS DE LA CALIBRACIÓN



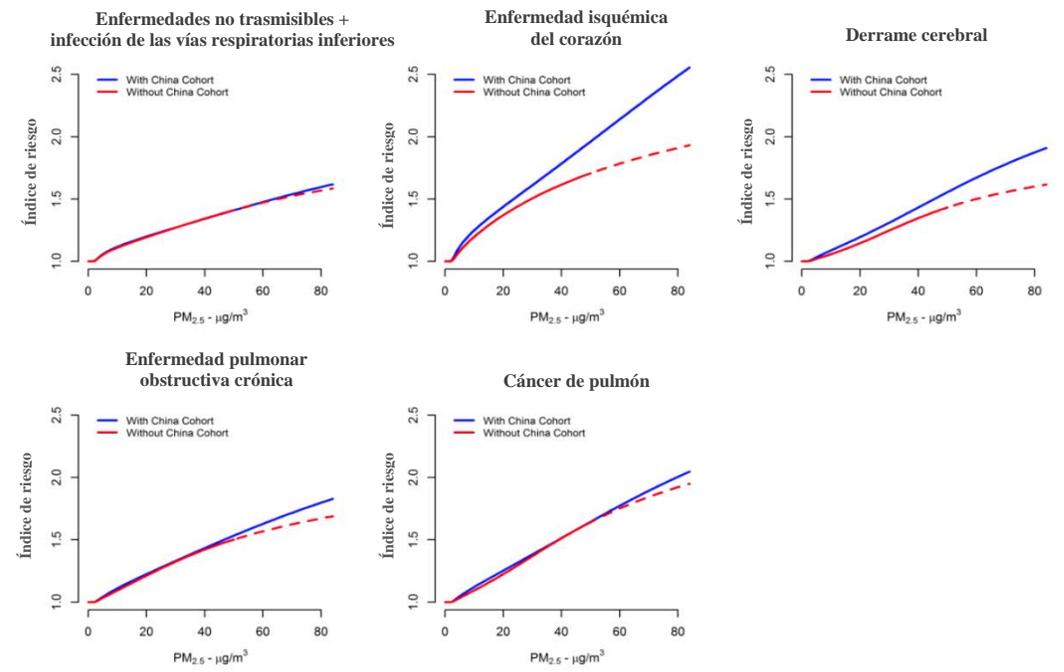
APÉNDICE C | ESTIMACIÓN DEL IMPACTO EN LA SALUD

En este apéndice analizamos los resultados adicionales del impacto en la salud, así como las implicancias de usar una función de mortalidad no lineal. Este apéndice incluirá un análisis de las funciones del GEMM, los resultados de la contribución del transporte alternativo, los resultados alternativos de la contribución de los vehículos que no cumplen las normas y los criterios de valoración relacionados con la salud que no se analizaron en el capítulo 6.

LA NO LINEALIDAD DEL GEMM

Como se analizó en la sección 5.2.3, utilizamos seis de las 83 funciones no lineales del GEMM precargadas en el BenMAP-CE. Es importante señalar que estas funciones del GEMM no son lineales con una relación marginal decreciente entre la concentración de $PM_{2.5}$ y el índice de riesgo de mortalidad (figura C-1). Ya que modelamos los análisis de la carga de mortalidad quitando la contribución del sector de transporte del nivel más alto de las concentraciones de $PM_{2.5}$ (es decir, "retrocediendo" los valores de referencia), es posible que subestimemos la carga de mortalidad debido a la menor respuesta de mortalidad por cambio de unidad en el $PM_{2.5}$ en estas concentraciones más altas.

FIGURA C-1. BURNETT ET AL. (2018) FIGURA S6



En un análisis de sensibilidad, calculamos la contribución de las emisiones del transporte y las emisiones de los vehículos que no cumplen las normas a la carga total de $PM_{2,5}$ en Lima-Callao, calculando la carga de mortalidad *como un porcentaje de la carga de mortalidad total a partir de las contribuciones del sector a las concentraciones de $PM_{2,5}$ ambiental*. Es decir, si el sector fuera responsable del 50 % de las concentraciones ambientales, adjudicaríamos el 50 % de la carga total de mortalidad de Lima-Callao a este sector. Las figuras C-2 y C-3 comparan los resultados de la función del GEMM en el BenMAP-CE con un análisis directamente proporcional para las contribuciones de carga del transporte y de los vehículos que no cumplen las normas. En general, las funciones del GEMM pueden subestimar la contribución del sector de transporte y los vehículos que no cumplen las normas a la carga total de $PM_{2,5}$.

FIGURA C-2. CARGA DE MORTALIDAD POR $PM_{2,5}$ ATRIBUIBLE AL TRANSPORTE

CAUSA DE LA MORTALIDAD	FUNCIÓN DEL GEMM		CONTRIBUCIÓN DIRECTAMENTE PROPORCIONAL	
	INFERIOR	SUPERIOR	INFERIOR	SUPERIOR
GEMM: NCD + LRI	5150	6200	6097	7057
GEMM: 5 COD	4221	4855	3764	4357
Infección de las vías respiratorias inferiores	2522	2855	2044	2365
Enfermedad isquémica del corazón	680	814	763	883
Enfermedad cerebrovascular	534	616	487	563
Cáncer de pulmón	315	368	302	350
COPD	171	201	168	195

FIGURA C-3. CARGA DE MORTALIDAD POR $PM_{2,5}$ ATRIBUIBLE A VEHÍCULOS QUE NO CUMPLEN LAS NORMAS

CAUSA DE LA MORTALIDAD	FUNCIÓN DEL GEMM		CONTRIBUCIÓN DIRECTAMENTE PROPORCIONAL	
	INFERIOR	SUPERIOR	INFERIOR	SUPERIOR
GEMM: NCD + LRI	248	991	322	1281
GEMM: 5 COD	223	890	199	791
Infección de las vías respiratorias inferiores	135	541	108	429
Enfermedad isquémica del corazón	33	133	40	160
Enfermedad cerebrovascular	30	116	26	102
Cáncer de pulmón	16	65	16	64
COPD	9	34	9	35

APÉNDICE D | RESULTADOS A NIVEL DE DISTRITO

En este apéndice, destacamos la variabilidad en los resultados de la carga de mortalidad entre distritos. Las tablas resaltan la importancia de la resolución geográfica del modelo de calidad del aire seleccionado al ver los resultados a nivel de distrito. Comparamos nuestros resultados primarios (cuadrícula de 10 km x 10 km, Shaddick) con una capa de escala más fina (cuadrícula de 1 km x 1 km, van Donkelaar) y presentamos un efecto promedio en estos modelos. Las figuras D-1 a D-5 muestran los resultados de mortalidad de NCD + LRI a nivel de distrito para lo siguiente:

- Carga de mortalidad total atribuida al $PM_{2.5}$ ambiental: figura C-1
- Carga de mortalidad del sector de transporte figuras C-2 (límite inferior) y C-3 (límite superior)
- Carga de mortalidad de las emisiones que no cumplen las normas: figuras C-4 (límite inferior) y C-5 (límite superior)

En general, si bien las diferencias a nivel regional en la carga de mortalidad son insignificantes en todas las capas de información, observamos diferencias notables a nivel de distrito. Estos resultados pueden motivar a que se priorice la aplicación de controles de calidad del aire en las regiones con una carga de mortalidad alta.

FIGURA D-1. CARGA DE MORTALIDAD TOTAL ATRIBUIBLE AL PM_{2,5} A NIVEL DISTRITO

NOMBRE DEL DISTRITO	POBLACIÓN DEL DISTRITO (DE 25 A 99 AÑOS)	SHADDICK	VAN DONKELAAR	PROMEDIO	
		MUERTES	MUERTES	MUERTES	TASA POR CADA 100 000
Total	6 815 428	10 556	10 838	10 697	157
San Juan de Lurigancho	695 326	1054	1009	1031	148
Comas	361 764	624	707	665	184
San Martín de Porres	488 004	606	654	630	129
Lima	207 527	538	646	592	285
Callao	304 221	535	503	519	171
Villa María del Triunfo	294 591	504	397	451	153
Ate	394 943	370	512	441	112
Santiago de Surco	272 592	354	376	365	134
Carabaylo	189 698	472	247	360	190
Lurigancho	139 146	484	215	349	251
Villa el Salvador	291 540	256	370	313	107
Chorrillos	224 392	350	263	307	137
La Molina	132 567	382	228	305	230
Los Olivos	254 864	277	320	299	117
San Juan de Miraflores	272 025	211	381	296	109
Rimac	120 902	302	285	294	243
Ventanilla	271 339	315	254	285	105
La Victoria	125 163	225	314	270	216
Puente Piedra	210 135	242	289	266	127
Independencia	149 822	253	272	263	175
San Miguel	108 804	217	196	207	190
El Agustino	125 281	165	241	203	162
Miraflores	74 718	127	229	178	238
San Isidro	49 229	197	145	171	348
San Borja	94 488	130	190	160	170
Jesús María	61 365	108	174	141	230
Magdalena Vieja	63 935	116	157	136	213
Santa Anita	149 168	91	177	134	90
Breña	60 003	80	144	112	187
Cieneguilla	30 285	166	23	94	311
Magdalena del Mar	45 329	84	100	92	203
Surquillo	72 492	61	116	89	122
Lince	42 557	69	108	88	208
Bellavista	59 552	66	97	81	137
Lurín	52 254	101	48	75	143

NOMBRE DEL DISTRITO	POBLACIÓN DEL DISTRITO (DE 25 A 99 AÑOS)	SHADDICK	VAN DONKELAAR	PROMEDIO	
		MUERTES	MUERTES	MUERTES	TASA POR CADA 100 000
Pachacamac	76 225	94	51	73	96
San Luis	42 772	48	75	61	143
La Perla	49 511	33	79	56	113
Chaclacayo	31 232	33	78	55	176
Ancón	27 202	69	38	53	196
Barranco	24 956	38	57	48	191
Carmen de la Legua Reynoso	31 190	48	37	42	135
Santa Rosa	12 157	25	8	17	138
La Punta	3131	8	8	8	249
Punta Hermosa	5230	9	2	6	110
Pucusana	10 443	5	4	5	46
Mi Perú*	-	6	2	4	N/C
Punta Negra	5400	5	3	4	68
San Bartolo	4845	2	3	3	54
Santa María del Mar	1113	1	1	1	109

* El distrito Mi Perú en el Callao tenía una población nula según nuestra base de datos. Debido a que las capas de Shaddick y van Donkelaar se superponen con la cuadrícula de población (distritos), el BenMAP atribuye los resultados de incidencia de las celdas de la cuadrícula de calidad del aire a los distritos superpuestos (incluido Mi Perú).

FIGURA D-2. CARGA DE MORTALIDAD POR PM_{2,5} A NIVEL DISTRITO, SECTOR DE TRANSPORTE (LÍMITE INFERIOR)

NOMBRE DEL DISTRITO	POBLACIÓN DEL DISTRITO (DE 25 A 99 AÑOS)	SHADDICK	VAN DONKELAAR	PROMEDIO	
		MUERTES	MUERTES	MUERTES	TASA POR CADA 100 000
Total	6 815 428	5150	5195	5173	76
San Juan de Lurigancho	695 326	509	476	492	71
Comas	361 764	299	333	316	87
San Martín de Porres	488 004	296	314	305	63
Lima	207 527	265	318	292	141
Callao	304 221	287	248	267	88
Villa María del Triunfo	294 591	242	188	215	73
Ate	394 943	178	242	210	53
Santiago de Surco	272 592	171	177	174	64
Carabaylo	189 698	227	117	172	91
Lurigancho	139 146	233	102	168	120
Villa el Salvador	291 540	123	173	148	51
Chorrillos	224 392	170	123	147	65
La Molina	132 567	183	107	145	109
Los Olivos	254 864	134	152	143	56
Rimac	120 902	149	135	142	117
San Juan de Miraflores	272 025	101	179	140	51
Ventanilla	271 339	153	120	136	50
La Victoria	125 163	111	153	132	105
Puente Piedra	210 135	116	136	126	60
Independencia	149 822	122	128	125	83
San Miguel	108 804	108	100	104	96
El Agustino	125 281	80	113	97	77
Miraflores	74 718	62	110	86	115
San Isidro	49 229	97	73	85	172
San Borja	94 488	63	91	77	82
Jesús María	61 365	53	88	71	115
Magdalena Vieja	63 935	57	80	68	107
Santa Anita	149 168	44	83	63	43
Breña	60 003	39	72	56	93
Magdalena del Mar	45 329	41	51	46	102
Cieneguilla	30 285	80	11	46	151
Lince	42 557	34	54	44	104
Surquillo	72 492	30	56	43	59
Bellavista	59 552	35	49	42	70

NOMBRE DEL DISTRITO	POBLACIÓN DEL DISTRITO (DE 25 A 99 AÑOS)	SHADDICK	VAN DONKELAAR	PROMEDIO	
		MUERTES	MUERTES	MUERTES	TASA POR CADA 100 000
Lurín	52 254	49	24	37	70
Pachacamac	76 225	46	26	36	47
San Luis	42 772	23	36	29	69
La Perla	49 511	18	40	29	59
Chaclacayo	31 232	16	37	26	84
Ancón	27 202	34	18	26	95
Barranco	24 956	19	27	23	91
Carmen de la Legua Reynoso	31 190	24	18	21	67
Santa Rosa	12 157	12	4	8	66
La Punta	3131	4	4	4	134
Punta Hermosa	5230	5	1	3	56
Pucusana	10 443	3	2	3	24
Mi Perú	-	3	1	2	N/C
Punta Negra	5400	2	1	2	36
San Bartolo	4845	1	2	1	29
Santa María del Mar	1113	1	1	1	57

* El distrito Mi Perú en el Callao tenía una población nula según nuestra base de datos. Debido a que las capas de Shaddick y van Donkelaar se superponen con la cuadrícula de población (distritos), el BenMAP atribuye los resultados de incidencia de las celdas de la cuadrícula de calidad del aire a los distritos superpuestos (incluido Mi Perú).

FIGURA D-3. CARGA DE MORTALIDAD POR PM_{2,5} A NIVEL DISTRITO, SECTOR DE TRANSPORTE (LÍMITE SUPERIOR)

NOMBRE DEL DISTRITO	POBLACIÓN DEL DISTRITO (DE 25 A 99 AÑOS)	SHADDICK	VAN DONKELAAR	PROMEDIO	
		MUERTES	MUERTES	MUERTES	TASA POR CADA 100 000
Total	6 815 428	6200	6238	6219	91
San Juan de Lurigancho	695 326	607	564	585	84
Comas	361 764	356	394	375	104
San Martín de Porres	488 004	358	381	369	76
Lima	207 527	323	387	355	171
Callao	304 221	355	302	329	108
Villa María del Triunfo	294 591	290	224	257	87
Ate	394 943	211	287	249	63
Santiago de Surco	272 592	205	212	208	76
Carabayllo	189 698	270	140	205	108
Lurigancho	139 146	277	122	200	143
Villa el Salvador	291 540	147	206	177	61
Chorrillos	224 392	206	147	176	79
La Molina	132 567	218	127	173	130
Rimac	120 902	181	162	171	67
Los Olivos	254 864	160	183	171	142
San Juan de Miraflores	272 025	122	213	167	61
Ventanilla	271 339	184	142	163	60
La Victoria	125 163	135	186	160	128
Puente Piedra	210 135	138	161	150	71
Independencia	149 822	146	152	149	100
San Miguel	108 804	132	123	128	117
El Agustino	125 281	96	134	115	92
Miraflores	74 718	75	134	104	140
San Isidro	49 229	118	89	103	210
San Borja	94 488	76	110	93	98
Jesús María	61 365	65	108	86	141
Magdalena Vieja	63 935	69	98	84	131
Santa Anita	149 168	52	99	75	50
Breña	60 003	48	88	68	113
Magdalena del Mar	45 329	50	63	57	125
Cieneguilla	30 285	95	13	54	180
Lince	42 557	41	67	54	127
Surquillo	72 492	36	68	52	72
Bellavista	59 552	43	60	51	86

NOMBRE DEL DISTRITO	POBLACIÓN DEL DISTRITO (DE 25 A 99 AÑOS)	SHADDICK	VAN DONKELAAR	PROMEDIO	
		MUERTES	MUERTES	MUERTES	TASA POR CADA 100 000
Lurín	52 254	59	29	44	84
Pachacamac	76 225	55	32	43	57
La Perla	49 511	23	49	36	85
San Luis	42 772	28	43	35	72
Chaclacayo	31 232	19	44	31	101
Ancón	27 202	41	22	31	114
Barranco	24 956	23	32	27	109
Carmen de la Legua Reynoso	31 190	29	22	26	82
Santa Rosa	12 157	14	5	10	79
La Punta	3131	6	5	5	166
Punta Hermosa	5230	6	2	4	68
Pucusana	10 443	3	3	3	30
Mi Perú	-	4	1	2	N/C
Punta Negra	5400	3	2	2	44
San Bartolo	4845	1	2	2	36
Santa María del Mar	1113	1	1	1	71

* El distrito Mi Perú en el Callao tenía una población nula según nuestra base de datos. Debido a que las capas de Shaddick y van Donkelaar se superponen con la cuadrícula de población (distritos), el BenMAP atribuye los resultados de incidencia de las celdas de la cuadrícula de calidad del aire a los distritos superpuestos (incluido Mi Perú).

FIGURA D-4. CARGA DE MORTALIDAD POR PM_{2,5} A NIVEL DISTRITO, EMISIONES QUE NO CUMPLEN LAS NORMAS (LÍMITE INFERIOR)

NOMBRE DEL DISTRITO	POBLACIÓN DEL DISTRITO (DE 25 A 99 AÑOS)	SHADDICK	VAN DONKELAAR	PROMEDIO	
		MUERTES	MUERTES	MUERTES	TASA POR CADA 100 000
Total	6 815 428	248	250	249	4
San Juan de Lurigancho	695 326	25	24	25	4
Comas	361 764	15	17	16	4
San Martín de Porres	488 004	14	15	14	3
Lima	207 527	12	15	13	6
Callao	304 221	13	11	12	4
Ate	394 943	9	12	10	4
Villa María del Triunfo	294 591	12	9	10	3
Carabaylo	189 698	11	6	9	3
Santiago de Surco	272 592	8	9	8	4
Lurigancho	139 146	12	5	8	6
Villa el Salvador	291 540	6	9	7	3
La Molina	132 567	9	5	7	3
Chorrillos	224 392	8	6	7	5
Los Olivos	254 864	7	7	7	3
San Juan de Miraflores	272 025	5	9	7	6
Rimac	120 902	7	7	7	2
Ventanilla	271 339	7	6	7	2
Puente Piedra	210 135	6	7	6	5
Independencia	149 822	6	6	6	3
La Victoria	125 163	5	7	6	4
El Agustino	125 281	4	6	5	4
San Miguel	108 804	5	4	5	4
Miraflores	74 718	3	5	4	5
San Isidro	49 229	5	3	4	8
San Borja	94 488	3	4	4	4
Jesús María	61 365	2	4	3	5
Santa Anita	149 168	2	4	3	5
Magdalena Vieja	63 935	3	4	3	2
Breña	60 003	2	3	3	4
Cieneguilla	30 285	4	1	2	5
Magdalena del Mar	45 329	2	2	2	7
Surquillo	72 492	1	3	2	5
Lince	42 557	2	2	2	3
Bellavista	59 552	2	2	2	3

NOMBRE DEL DISTRITO	POBLACIÓN DEL DISTRITO (DE 25 A 99 AÑOS)	SHADDICK	VAN DONKELAAR	PROMEDIO	
		MUERTES	MUERTES	MUERTES	TASA POR CADA 100 000
Lurín	52 254	2	1	2	3
Pachacamac	76 225	2	1	2	2
San Luis	42 772	1	2	1	3
La Perla	49 511	1	2	1	3
Chaclacayo	31 232	1	2	1	4
Ancón	27 202	2	1	1	5
Barranco	24 956	1	1	1	4
Carmen de la Legua Reynoso	31 190	1	1	1	3
Santa Rosa	12 157	1	0	0	3
La Punta	3131	0	0	0	6
Punta Hermosa	5230	0	0	0	3
Pucusana	10 443	0	0	0	1
Mi Perú	-	0	0	0	N/C
Punta Negra	5400	0	0	0	2
San Bartolo	4845	0	0	0	1
Santa María del Mar	1113	0	0	0	3

* El distrito Mi Perú en el Callao tenía una población nula según nuestra base de datos. Debido a que las capas de Shaddick y van Donkelaar se superponen con la cuadrícula de población (distritos), el BenMAP atribuye los resultados de incidencia de las celdas de la cuadrícula de calidad del aire a los distritos superpuestos (incluido Mi Perú).

FIGURA D-5. CARGA DE MORTALIDAD DE PM_{2,5} A NIVEL DISTRITO, EMISIONES QUE NO CUMPLEN LAS NORMAS (LÍMITE SUPERIOR)

NOMBRE DEL DISTRITO	POBLACIÓN DEL DISTRITO (DE 25 A 99 AÑOS)	SHADDICK	VAN DONKELAAR	PROMEDIO	
		MUERTES	MUERTES	MUERTES	TASA POR CADA 100 000
Total	6 815 428	991	1003	997	15
San Juan de Lurigancho	695 326	101	95	98	14
Comas	361 764	59	67	63	17
San Martín de Porres	488 004	56	59	58	12
Lima	207 527	49	59	54	26
Callao	304 221	51	46	48	16
Villa María del Triunfo	294 591	47	37	42	14
Ate	394 943	36	48	42	11
Carabaylo	189 698	45	23	34	12
Santiago de Surco	272 592	33	35	34	18
Lurigancho	139 146	46	20	33	24
Villa el Salvador	291 540	24	34	29	10
La Molina	132 567	36	21	29	13
Chorrillos	224 392	32	24	28	21
Los Olivos	254 864	26	30	28	11
San Juan de Miraflores	272 025	20	36	28	23
Rimac	120 902	28	26	27	10
Ventanilla	271 339	29	24	27	10
Puente Piedra	210 135	23	28	25	20
Independencia	149 822	24	25	25	12
La Victoria	125 163	21	28	25	16
El Agustino	125 281	15	23	19	18
San Miguel	108 804	20	18	19	15
Miraflores	74 718	12	21	16	22
San Isidro	49 229	18	13	16	32
San Borja	94 488	12	17	15	16
Jesús María	61 365	10	16	13	21
Santa Anita	149 168	9	17	13	20
Magdalena Vieja	63 935	11	14	12	8
Breña	60 003	7	13	10	17
Cieneguilla	30 285	16	2	9	20
Magdalena del Mar	45 329	8	9	8	28
Lince	42 557	6	10	8	19
Surquillo	72 492	6	10	8	11
Bellavista	59 552	6	9	8	13

NOMBRE DEL DISTRITO	POBLACIÓN DEL DISTRITO (DE 25 A 99 AÑOS)	SHADDICK	VAN DONKELAAR	PROMEDIO	
		MUERTES	MUERTES	MUERTES	TASA POR CADA 100 000
Lurín	52 254	9	4	7	13
Pachacamac	76 225	9	5	7	9
San Luis	42 772	4	7	6	13
La Perla	49 511	3	7	5	10
Chaclacayo	31 232	3	7	5	16
Ancón	27 202	6	3	5	18
Barranco	24 956	3	5	4	18
Carmen de la Legua Reynoso	31 190	4	3	4	12
Santa Rosa	12 157	2	1	2	13
La Punta	3131	1	1	1	24
Punta Hermosa	5230	1	0	1	10
Pucusana	10 443	0	0	0	4
Mi Perú	-	1	0	0	N/C
Punta Negra	5400	0	0	0	6
San Bartolo	4845	0	0	0	5
Santa María del Mar	1113	0	0	0	10

* El distrito Mi Perú en el Callao tenía una población nula según nuestra base de datos. Debido a que las capas de Shaddick y van Donkelaar se superponen con la cuadrícula de población (distritos), el BenMAP atribuye los resultados de incidencia de las celdas de la cuadrícula de calidad del aire a los distritos superpuestos (incluido Mi Perú).