

# Analysis of environmental dispersion of particulate matter (PM 2.5 and PM10) worldwide over the last 10 years: A review of the scientific literature

Roberto Daniel Gonzales Lavado<sup>1</sup>, Diana Franczheska Mata Huaman<sup>2</sup>, and Magda Velásquez Marin Mtr<sup>3</sup>  
<sup>1,2,3</sup>Universidad Privada del Norte (UPN), Perú, robertodanielgl0@gmail.com, dianafmata365@gmail.com, magda.velasquez@upn.edu.pe

*Abstract– Currently, particulate matter emissions have a profound influence on population health, atmospheric visibility, and the climate of a place worldwide. Therefore, in this systematic review we analyzed the atmospheric dispersion of particulate matter (PM2.5 and PM10) and its significance to the environment, according to scientific journals of the last 10 years worldwide. Theses and articles from journals such as Scopus, Dialnet, ScienceDirect, etc; taking into account the period 2012-2022 and the Spanish and English languages were used. Articles were included that contained information and results that contributed to the research where they showed the appropriate modeling. As a result, the most used atmospheric dispersion model is AERMOD, and in several cities PM emissions do not comply with the ECAs of the country or the WHO. Among the limitations was the small number of articles focused on PM because most of them mention particulate matter as an additional pollutant. We conclude that it is important to have knowledge about PM emissions that occur near urban areas, in order to have a perspective on air quality and, if it is poor, to implement solutions to reduce emissions.*

*Keywords: Particulate matter, atmospheric dispersion, air quality, PM2.5, PM10.*

**Digital Object Identifier:** (only for full papers, inserted by LACCEI).  
**ISSN, ISBN:** (to be inserted by LACCEI).  
**DO NOT REMOVE**

# Análisis de la dispersión ambiental de material particulado (PM 2.5 and PM10) a nivel mundial en los últimos 10 años: Una revisión de la literatura científica

Roberto Daniel Gonzales Lavado<sup>1</sup>, Diana Franzheska Mata Huaman<sup>2</sup> y Magda Velásquez Marin Mtr<sup>3</sup>  
<sup>1,2,3</sup>Universidad Privada del Norte (UPN), Perú, robertodanielg10@gmail.com, dianafmata365@gmail.com, magda.velasquez@upn.edu.pe

**Resumen**– Actualmente las emisiones de material particulado tienen una profunda influencia en la salud poblacional, la visibilidad atmosférica, y el clima de un lugar a nivel mundial. Por ello, en la presente revisión sistemática se analizó la dispersión atmosférica de material particulado (PM2.5 y PM10) y su significancia con el ambiente, según las revistas científicas de los últimos 10 años a nivel mundial. Se emplearon tesis y artículos de revistas como Scopus, Dialnet, ScienceDirect, etc; teniendo en cuenta el periodo 2012-2022 y los idiomas español e inglés. Se incluyeron artículos que contenían información y resultados que aportaba a la investigación donde mostraban el modelamiento adecuado. Como resultado, el modelo de dispersión atmosférica más usado es AERMOD, y en diversas ciudades las emisiones de PM no cumplen con los ECA del país o la OMS. En las limitaciones se tuvo la poca cantidad de artículos centrados en el PM debido a que la mayoría menciona al material particulado como contaminante adicional. Se concluye que es importante tener el conocimiento sobre las emisiones de PM que ocurren cerca de áreas urbanas, para así tener una perspectiva sobre la calidad del aire y si es mala, implementar soluciones para disminuir sus emisiones.

**Palabras clave:** Material particulado, dispersión atmosférica, calidad del aire, PM2.5, PM10.

## I. INTRODUCTION

En la actualidad, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos hace mención que las emisiones de material particulado tienen una profunda influencia en la salud poblacional, la visibilidad atmosférica o smog, la conservación de los materiales artificiales o también conocida como corrosión y en el clima de un lugar a nivel mundial [1]. El material particulado (PM) se define como una mezcla compleja de partículas sólidas y líquidas que se encuentran presente en el aire y su composición química representa una mayor amenaza hacia la salud de la población a nivel mundial. Este PM suele medirse en fracciones: partículas menores a 10 micrómetros ( $\mu\text{m}$ ) son llamadas PM10 y las partículas menores de 2,5  $\mu\text{m}$  son conocidas como PM2.5 [2].

Según su origen, se clasifica en partículas primarias, las cuales provienen de fuentes directas como la quema de biomasa, la combustión incompleta de los combustibles

fósiles, las erupciones volcánicas, el desgaste de las carreteras, el suelo, el mar y los materiales biológicos como fragmentos de plantas, microorganismo, polen, entre otros; y en partículas secundarias que provienen principalmente de la conversión de gases a partículas en la atmósfera [3]. Además, los modelos de regresión del uso del suelo son muy eficaces para predecir la distribución espacial de los contaminantes atmosféricos, entre ellos el PM, y se han utilizado ampliamente en muchas ciudades de Europa, América del Norte y China para poder prevenir daños y así monitorear el impacto de diversas empresas que pueden generar estos contaminantes [4].

En España, se indica que la concentración de los contaminantes atmosféricos depende principalmente de las condiciones de dispersión atmosférica, la cual es transporte de los contaminantes en el aire y este depende del estado de la atmósfera y de las condiciones meteorológicas como turbulencias atmosféricas, velocidad y dirección del viento, radiaciones solares, entre otras [5]. Además, los diferentes tipos de fenómenos de dispersión de los contaminantes son los que provocan la acumulación en zonas próximas a las fuentes de emisión o transporte de estos a zonas más o menos distantes. La estabilidad atmosférica dificulta la dispersión de los contaminantes y, en consecuencia, contribuye a la acumulación de estos cerca de las fuentes emisoras [2].

En la investigación de Santillán, él utilizó el software ARCGIS para evidenciar la distribución de PM2.5 mediante mapas y así definir los radios críticos de concentración del PM en mención [6]. Otro caso es el de Vélez, que en su trabajo realizó el análisis de sus datos para evaluar la dispersión de material particulado proveniente de los buses del SITM-MIO en la ciudad de Santiago de Cali y a partir de la información brindada por los operadores y las mediciones directas, se aplicó el modelo IVE para determinar las emisiones de generadas por los buses articulados que circulan en el tramo San Pascual-La Buitrera [7].

Otro trabajo fue realizado por Pineda, quien realizó una investigación del área urbana de San Luis Potosí, ubicada en México, la cual abarca una población de más de un millón de personas y además posee una gran cantidad de vehículos (públicos y particulares) y una zona industrial con estimado de

253 fábricas [8]. Además, Arrieta analizó diversos escenarios y en el estudio se involucraron tiempos de exposición diario y anual de PM10, para los cuales se hizo la modelación con el Software AERMOD View. Dicho modelo se corrió para dos zonas topográficas, una zona compleja ubicada en el Municipio de Socha y una zona simple ubicada en el Municipio de Sogamoso [9]. También, Silva y Godoy utilizaron el modelo AERMOD para determinar puntos de máximo impacto, factores de emisión óptimos e influencia de barrios en la ciudad de Los Ángeles ubicada al sur de Chile, para material particulado PM2.5 y PM10, debido al uso de estufas residenciales a leña [10].

En Pakistán, se demostró que existe una variación espacial y temporal significativa en las concentraciones de masa de diferentes fracciones de tamaño de material particulado y sus constituyentes químicos en la atmósfera local de Faisalabad, esto se debe principalmente a cambios en las actividades antropogénicas y las condiciones meteorológicas predominantes de la zona [11]. Por otro lado, Santillán [6] realizó un análisis similar en uno de los 3 campus de la Universidad Nacional de Chimborazo (UNACH), de la ciudad de Riobamba y tenía el objetivo de verificar si los resultados excedían los límites establecidos por el país o por la OMS. Adicionalmente, González [12] en su trabajo describen una metodología general para la calibración de modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos; aplicaron con gran éxito el proceso de calibración del modelo gaussiano de dispersión ISCST3, implementado en un área densamente poblada, el Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE) ubicado en La Habana.

Espinoza realizó un análisis de dispersión de material particulado y otros contaminantes en una central térmica ubicada en el distrito de Ventanilla, en la provincia constitucional del Callao, en el Perú y utilizó el software AERMOD para determinar sus resultados [13]. Y Son y otros [14] desarrollaron y utilizaron un modelo detallado de dispersión de partículas que incluye factores como el uso del suelo e información meteorológica para crear mapas de distribución de concentración de partículas para la ciudad metropolitana de Daejeon (Corea del Sur), con la finalidad de brindar información precisa sobre partículas a los ciudadanos. Además, Makridis y Lazaridis [15] mediante el modelo de dispersión gaussiana y el software AERMOD determinaron las concentraciones a nivel del suelo de los contaminantes atmosféricos emitidos por los motores de las aeronaves como las emisiones de CO, NO<sub>x</sub> y también de NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, PM2.5 en el aeropuerto de Chania (Creta), Grecia.

En el trabajo de investigación de Casallas [16], él encontró que los altos niveles de PM2.5 en la mayoría de las ciudades de la región Noroeste de Sudamérica son causados por los incendios forestales y se hace hincapié en las emisiones locales, también menciona que se están incluyendo las ciudades capitales de Venezuela, Ecuador, Colombia y Panamá. Y en la investigación de Vengoechea y otros [17] estudiaron las concentraciones de aerosoles marinos estimadas con el modelo CALPUFF (modelo de dispersión multi-capas,

multi-especies, en estado no estacionario) y se compararon con las concentraciones de PM10 monitoreadas cerca de la costa con equipo gravimétrico de bajo volumen.

A partir de la problemática mencionada anteriormente, surge la pregunta ¿Cuál es la cantidad de dispersión atmosférica de material particulado (PM2.5 y PM10) identificada y su significancia con el ambiente, de acuerdo con las revistas científicas de los últimos 10 años a nivel mundial? Por ende, el objetivo de la presente investigación consiste en analizar la dispersión atmosférica de material particulado (PM2.5 y PM10) y su significancia con el ambiente, de acuerdo con las revistas científicas de los últimos 10 años a nivel mundial.

## II. METODOLOGÍA

El presente artículo consiste en una revisión sistemática, en la cual se empleó la metodología prisma para poder agrupar de manera correcta los resultados obtenidos; a su vez se buscó responder a la pregunta de investigación “¿Cuál es la cantidad de dispersión atmosférica de material particulado (PM2.5 y PM10) identificada y su significancia con el ambiente, de acuerdo con las revistas científicas de los últimos 10 años a nivel mundial?” de manera precisa y coherente en base a la discusión posterior a los hallazgos.

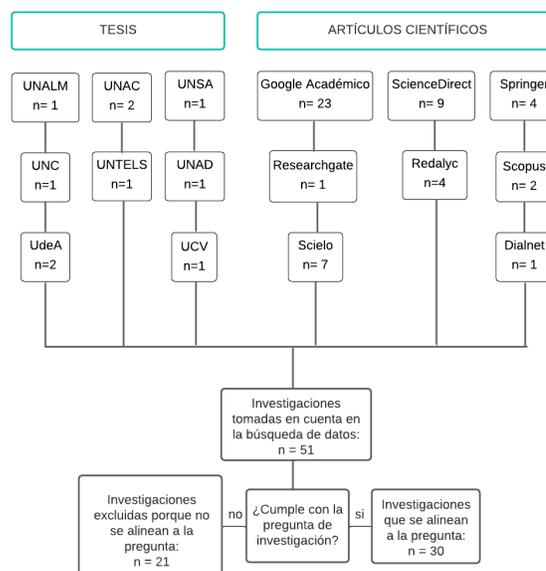


Fig 1. Diagrama de prisma

Además, cuenta con las variables: El material particulado de tamaño 2.5 microgramos y el material particulado de tamaño 10 microgramos, o también llamadas PM 2.5 y PM 10. Estas variables permitirán identificar el estado y los valores de la calidad del aire en el área de estudio.

### A. Criterios de Selección:

Se emplearon tesis de pregrado, como también, se tomaron artículos de revistas indexadas a las bases de datos

como Google Académico, ScienceDirect, Scielo, Springer, Dialnet, Redalyc, ResearchGate y también Scopus, debido a la confiabilidad de los datos presentados y su relevancia en comparación a otras investigaciones. Asimismo, se compararon estudios considerando el periodo de publicación 2012 - 2022 e información en español, inglés y portugués, debido a una mayor disponibilidad de investigaciones en esos idiomas.

### B. Recursos de información

Para la búsqueda de investigaciones se usaron bases de datos tales como Google Académico, ScienceDirect, Scielo, Springer, Dialnet, Redalyc, ResearchGate y Scopus.

Se obtuvieron artículos de revistas como International Journal of Environmental Research and Public Health, Sustainable Cities and Society, Science of The Total Environment, Atmospheric Pollution Research, Revista Internacional de Contaminación Ambiental, Aerosol and Air Quality Research, Journal of the Air & Waste Management Association, Lung India, entre otras más. Además, se encontraron 51 trabajos de investigación en total y se seleccionaron 30 documentos.

### C. Búsqueda

Se realizó la búsqueda de información en las bases de datos empleando diferentes estrategias. En primer lugar, a través del empleo de palabras claves como “dispersión espacial”, “material particulado”, “dispersión atmosférica”, “air pollutants”, “Spatial dispersion”, “particulate matter”, “dispersión de contaminantes” y “dispersión geoespacial”. Además, del uso de conectores como “AND”, “NOT” y “OR” para una mayor eficiencia en la búsqueda de los artículos tales como (dispersión AND material particulado), (dispersion AND particulate matter), (dispersión espacial NOT material particulado), (spatial dispersión OR air pollutants) y (dispersión atmosférica OR material particulado). Asimismo, se priorizó que su publicación presente como fecha límite de antigüedad el año 2012 y respondan a la pregunta de investigación planteada. Obteniendo un total de 51 investigaciones que cumplieron con los criterios anteriormente mencionados.

### D. Descarte e inclusión

Se descartaron aquellas investigaciones que no cumplían con el objetivo del presente artículo, además fueron excluidos aquellos que no basaban su experimentación en encontrar la concentración del PM; por otro lado, se incluyeron los artículos que presentaron información referente a la investigación y que mencionaban el software empleado para la dispersión atmosférica; además, se consideraron los artículos cuyos resultados evidenciaban el modelamiento de la dispersión atmosférica.

### E. Selección de datos

Se aplicó como estrategia escoger los artículos que brindaban información de la dispersión atmosférica del

material particulado o PM, y cuyo análisis fue mediante uno de los métodos de análisis de dispersión de contaminantes, ya sea mediante el uso del método Gaussiano, el empleo de software como AERMOD y ArcGIS; así también como información referente a la eficacia de los métodos de análisis empleados, la precisión, el área de cobertura y la facilidad para realizar dicho análisis.

## III. RESULTADOS

### A. Proceso de Selección de Estudios

Se emplearon diversas bases de datos como Dialnet, Scielo, Scopus, ScienceDirect, Redalyc, Google Académico, ResearchGate y Springer; encontrándose 51 artículos de investigación; donde se seleccionaron en total 30 artículos de investigación.

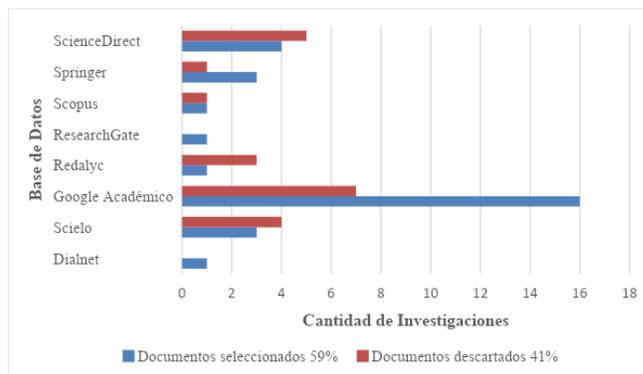


Fig 2. Gráfico de barras sobre la cantidad de documentos descartados y seleccionados.

### B. Características de los Estudios

Según la tabla I que evidencia los porcentajes de investigaciones, se rescata que Google Académico es la base de datos más empleada; además, en las figuras se observan que se encontraron más artículos provenientes de América con una mayor cantidad extraídos de Perú y Colombia; adicionalmente, del total de investigaciones gran porcentaje son de los años 2016-2019.

TABLA I  
PORCENTAJE DE INVESTIGACIONES INCLUIDAS SEGÚN LA BASE DE DATOS

Base de datos	Cantidad	Porcentaje (%)
Google Académico	16	53%
ScienceDirect	4	13%
Scielo	3	10%
Springer	3	10%
Dialnet	1	3%
Redalyc	1	3%
ResearchGate	1	3%
Scopus	1	3%
<b>TOTAL</b>	<b>30</b>	<b>100%</b>

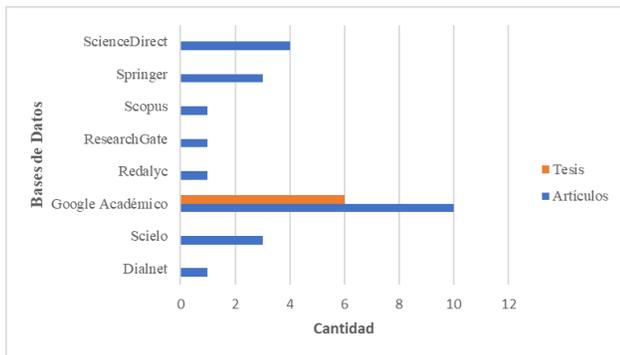


Fig 3. Gráfico de barras sobre la cantidad de artículos y tesis incluidas según la base de datos.

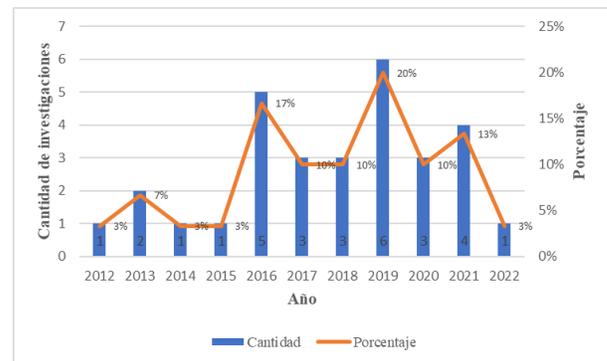


Fig 6. Gráfico de columnas agrupadas sobre las investigaciones incluidas según el año.

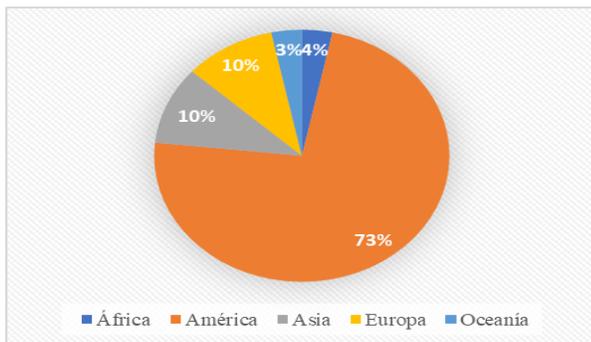


Fig 4. Gráfico de barras sobre la cantidad de artículos y tesis incluidas según la base de datos.

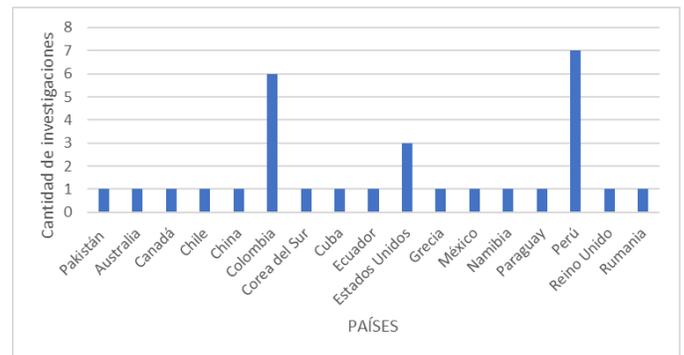


Fig 7. Gráfico de barras sobre las investigaciones incluidas según su país.

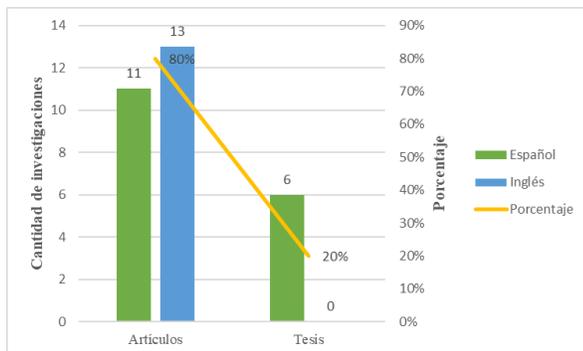


Fig 5. Clasificación de investigaciones incluidas de acuerdo con el idioma.

### B. Análisis global de los estudios

Se evidencia que los artículos seleccionados obtuvieron resultados que brindan información para la población respecto a las emisiones del material particulado que se encuentran en los diversos casos de estudio y simulaciones que realizaron, sin embargo, en otros casos el panorama no muestra datos alentadores, sino que por el contrario sus valores exceden los límites máximos permitidos.

Respondiendo al objetivo de la investigación, en la tabla II se puede visualizar la metodología, los instrumentos, el procedimiento, los resultados y conclusiones, la cantidad PM encontrada y la tecnología empleada para su análisis.

TABLA II  
ANÁLISIS DE INVESTIGACIONES INCLUIDAS

Referencia	Instrumentos de Recolección de Datos de la Investigación	Procedimiento Usado Para el Análisis de Datos en la Investigación	Tecnología empleada	Cantidad de PM	Resultados Y Conclusiones de la Investigación
[18]	Inventario de emisiones de la estación Ballena.	Se insertaron los datos obtenidos en el modelo de dispersión.	Modelo de dispersión Gaussiana WKBK2	El PM10 establece un nivel de 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para 24 horas.	Las concentraciones máximas estimadas de PM10 no estaría violando el estándar anual de la Organización Mundial de la Salud (OMS) en un 20%.

[19]	Las mediciones de concentración de PM se realizaron utilizando muestreadores FRM.	Se insertaron los datos obtenidos en el modelo de dispersión	Modelo de dispersión AERMOD	La relación entre PM2.5 y PM10 era alrededor del 12,5 %.	Las emisiones de PM2.5 y PM10 son más bajas para todas las cosechadoras nuevas en comparación con la cosechadora convencional.
[4]	Se obtuvieron concentraciones medias diarias de PM2.5 y PM10 en 181 estaciones de control de calidad del aire del Buró de Ecología y Medio Ambiente de Xi'an.	Los mapas de distribución espacial de las concentraciones de PM2.5 y PM10 se generaron utilizando la función de visualización de ArcGIS.	Software ArcGIS	Los resultados para PM2.5 son de 8,355 µg/m <sup>3</sup> y para el PM10 fluctúa entre 8,355 µg/m <sup>3</sup> a 15 µg/m <sup>3</sup> .	La distribución espacial de los contaminantes está muy relacionada con la disposición de los terrenos industriales y la ubicación de las empresas que generan emisiones contaminantes al aire.
[20]	Se utilizaron concentraciones diarias y anuales de PM10 y PM2.5 del Consejo de Investigación Médica para Inglaterra y Gales con una resolución espacial de 1 km durante el período 2007–2011.	Los valores se obtuvieron de un modelo estadístico bayesiano que integra datos de monitoreo de la calidad del aire de UK, así como la calidad del aire en el resultado del modelo unificado	Modelo espaciotemporal bayesiano	La concentración de PM2.5 y PM10 estaban entre 8 y 16 µg m <sup>-3</sup> en el área de estudio.	Se observaron valores altos del ciclo anual a finales de otoño o invierno para PM10 y PM2.5.
[6]	Se empleó el método fotométrico utilizando el DustTrack II y del pasivo con el establecimiento de estaciones de monitoreo implementadas en sectores con mayor incidencia de vehicular	Los valores se obtuvieron a partir de un modelo geoestadístico utilizando el software ArcGIS	Software ArcGIS 10.x	La concentración de PM2.5 se encuentra entre el 7 µg/m <sup>3</sup> a 54 µg/m <sup>3</sup>	Los valores de PM están dentro de los límites máximos permisibles establecidos por la legislación ecuatoriana (65 µg/m <sup>3</sup> ) y por la OMS (25 µg/m <sup>3</sup> ).
[21]	El muestreo y análisis del PM10 y PM2.5 por la DIGESA se ha realizado a través de equipos manuales tipo High Vol y Mini Vol	Se calcularon los promedios horario, diario, mensual, estacional (verano, otoño, invierno y primavera) y anual de los datos de PM10 y PM2.5 y se generaron series de tiempo para observar su comportamiento y tendencias	Base de datos de promedios horarios	No indica	Todas las estaciones a excepción del Callao superan significativamente los valores límites del ECA para PM10 (50 µg/m <sup>3</sup> ).
[22]	Los datos fueron proporcionados por el SENAMHI del Perú y de la Dirección General de Salud Ambiental e Inocuidad Alimentaria de la Red de monitoreo de la Calidad del Aire de Lima Metropolitana	Se calcularon los promedios horario, diario, mensual, estacional y anual de los datos de PM10 y PM2.5 y se generaron series de tiempo para observar su comportamiento y las tendencias	Software ArcGIS 10.1	No indica	A nivel diario los máximos valores se registran los martes y sábados y los mínimos valores los domingos.
[23]	Se realizó la toma de datos mediante monitoreos en los bordes a favor del viento de dos corrales de engorde de ganado	Se insertaron los datos obtenidos en el modelo de dispersión	Modelo de dispersión AEMOD	El corral de engorde equipado con un sistema de rociadores tuvo un flujo de PM10 de 1,60 g/m <sup>2</sup> -día; y uno sin aspersión, pero con una limpieza más frecuente, tuvo un flujo medio de emisión de 1,10 g/m <sup>2</sup> - día	Los flujos de emisiones fueron mayores durante la estación cálida y los períodos secos prolongados, generalmente debido a la presencia de una capa de estiércol seco sin compactar en las superficies de los corrales.
[24]	Se tomaron datos de estaciones de monitoreo de OEFA	Se aplicó el método de interpolación Kriging ordinario que viene incorporado en el Software ArcGIS	Software ArcGIS	No indica	Se observa que el PM10 presenta una menor dispersión a lo largo del año, esto se debe a la escasa velocidad presente en el área de estudio (0.0 – 5.6 m/s), por lo que la velocidad no alcanza a modificar de manera significativa su distribución.

[25]	Se tomaron como muestra la calidad del aire de 09 distritos de Lima Metropolitana registrada por los sensores de SENAMHI	Se aplicó el método de interpolación Kriging ordinario que viene incorporado en el Software ArcGIS	Software ArcGIS 10.2	Se tuvieron concentraciones máximas horarias de de 931 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el PM10 y 786.90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM2.5.	Se determinó que las estaciones que componen la Red de Monitoreo de Calidad del Aire del SENAMHI registraron valores que superaron el ECA del aire correspondiente para 24 horas (100 y 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente)
[26]	Se recolectaron muestras de masa seca en tres puntos de muestreo	Se procesan los datos obtenidos mediante el modelo HYSPLIT	Modelo HYSPLIT	No indica	Los resultados sugieren que la influencia de la dirección y velocidad del viento es mayor en la dispersión que en la dilución.
[27]	Se realizó el inventario de emisiones de fuentes fijas (chimeneas de las empresas coquizadoras) y fuentes móviles.	Se insertaron los datos obtenidos en el modelo de dispersión	Modelo de dispersión AERMOD	Se encontraron concentraciones altas de PM10 que fluctúan desde 83,028 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 125,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Se presentan concentraciones que exceden la norma de calidad del aire diaria y anual, lo cual implica que, si llega a presentarse eventos de contaminación permanente, sumado a condiciones meteorológicas desfavorables, existe riesgo de afectación a la salud pública.
[8]	Se tomaron muestras a partir de estaciones de monitoreo en la UASLP.	Se insertaron los datos obtenidos en el modelo de dispersión	Modelo Químico Climático Multiescala (MCCM)	La concentración media anual de PM10 fue de 107,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Los forzamientos naturales topográficos, movimientos de convergencia y divergencia inducidos pueden producir un aumento en la concentración de PM10 y una mayor dispersión.
[16]	Se emplearon datos de redes de monitoreo de la calidad del aire de fondo de los municipios.	Se insertaron los datos obtenidos en el modelo de dispersión	CAMS	Todas las ciudades, excepto Cali, han tenido una disminución significativa de PM2.5 durante las últimas décadas, $-0.8$ a $-1.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ año $-1$	Una de las 28 ciudades analizadas supera el estándar local colombiano actual, pero todas superaron las pautas de la OMS.
[9]	El inventario de emisiones se realizó siguiendo lo establecido en el protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire.	Se procesan los datos obtenidos mediante el software AERMOD	Modelo de dispersión AERMOD VIEW	En concentraciones de PM10 para 24 hrs se obtuvo: 55.62 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , y para el tiempo anual un valor de 24.73 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Se definió que la ejecución de actividades y labores mineras en las zonas de estudio generará niveles de PM10 por debajo de lo establecido en la norma.
[28]	Los datos fueron obtenidos por la estación meteorológica del Aeropuerto Silvio Pettrossi y disponibilizados en la página web de la NOAA	Se procesan los datos obtenidos mediante el software AERMOD	Modelo de dispersión AERMOD y AERMET	Los máximos valores de concentración de PM10 para el verano 2016-2017 y el invierno 2017 fueron de 93,12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 97,80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Las concentraciones calculadas por AERMOD coinciden con lo esperado, puesto que presentan mayores valores en la estación de invierno 2017.
[29]	Se trabajó con el inventario de emisiones de Huancayo recopiladas por el MINAM mediante el Grupo de Estudio Técnico Ambiental para la calidad de aire.	Se procesaron los datos obtenidos mediante el software AERMOD	Modelo de dispersión AERMOD	Los datos de las emisiones obtenidas para el PM2.5 van desde 0.12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ hasta 45.23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Se resalta la eficiencia del AERMOD pues provee buenas opciones para modelar dispersión de contaminantes del aire en regiones de montaña para gestión de la calidad del aire.
[30]	Se realizó la toma de información mediante monitores automáticos de PM10, PM2.5 y BC a microescala, a lo largo de 3 campañas	Se emplearon dos modelos gaussianos de dispersión para determinar los factores de emisión, uno simple (SCREEN3) y otro refinado (AERMOD View)	Modelo de dispersión AERMOD VIEW	Los factores de emisión estimados para vía no pavimentada fueron $7,8 \pm 0,5 \text{ g PM10}/\text{VKT}$ y $0,6 \pm 0,2 \text{ g PM2.5}/\text{VKT}$ y para vía en proceso de construcción de $28 \pm 0,27 \mu\text{g PM10}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ y $11 \pm 0,13 \mu\text{g PM2.5}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$	La pavimentación parcial de la vía arterial en afirmado de la localidad de Ciudad Bolívar por parte de la UMV impactó positivamente en la calidad del aire, reduciendo las concentraciones de PM2.5 y PM10 asociadas a resuspensión en un 95%.

[10]	Se recolecta la información utilizando datos de reportes estadísticos oficiales	Se procesaron los datos obtenidos mediante el software AERMOD	Modelo de dispersión AERMOD Y software AERMET View 9.0	Para el promedio de 24 horas, las concentraciones máximas de PM2.5 y PM10 son respectivamente para el año 2013 de 935 y 985 µg/m3. Ambos datos para el año 2014 son 953 y 1003 µg/m3	Los factores máximos de emisiones promedio que deben considerar los equipos de combustión a leña, para que en conjunto sus tasas de emisión no superen los niveles de calidad del aire normados para PM2.5 y PM10, son muy bajos, para lo cual es necesario considerar equipos muy eficientes que utilicen combustibles como pellets o gas.
[13]	Se realizó mediciones de PM10 en la fuente de emisiones de la Central Térmica Enel Generación Perú S.A.A.	La determinación de partículas se realizó empleando el Método 5 de la EPA	Modelo de dispersión AERMOD	La concentración de PM10 es de 4.84 mg/Nm3	La simulación realizada mostró que los niveles de PM10 emitidas por chimenea TG-34 de la central térmica Ventanilla, no sobrepasaron los ECA para aire.
[12]	Inventario de fuentes y emisiones de contaminantes atmosféricos en el territorio	Recolección de datos y análisis de estos mediante el software para el modelo de dispersión	Software de dispersión ISCST3	Los valores de PM10 máximo y mínimos estimados fueron de 17,52 µg/m3 y de 126,44 µg/m3	Se aplicó la metodología mencionada en un caso de estudio, demostrando ser extremadamente útil para este modelo en particular.
[31]	Los datos de información meteorológica satelital comprados a la empresa Meteo-Colombia para los años 2012, 2013 y 2014	Actualización del inventario de fuentes fijas, selección del método de dispersión y definición de estrategias de implementación	Modelo de dispersión AERMOD VIEW	Concentraciones superiores a 200µg/m3 de PM10	Las concentraciones de PM10 en el sector canteras presenta incumplimiento para el periodo de 24h, sobrepasando los 200µg/m.
[17]	Muestreo de las zonas de estudio y uso de una técnica gravimétrica	Modelo de dispersión del tipo Puff CALPUFF	Modelo tipo Puff CALPUFF y procesador meteorológico CALMET	El mayor promedio en las concentraciones que se registró es de 53.63 µgm-3 para PM10.	El aporte de aerosoles marinos a la masa de PM10 puede ser significativo según las condiciones meteorológicas, llegando a representar entre el 20 y 27%.
[32]	Se utilizaron fichas en donde se llenó la información obtenida	Mediante el uso de softwares y la estadística descriptiva se analizaron los datos	Software Microsoft Excel y el software WRPLOT View	50.1467 µg/m3 a 92.0006 µg/m3 de PM10 y 7.19654 µg/m3 hasta 21.977 µg/m3 de PM2.5	Las emisiones de PM10 presentan problemas medianos de contaminación y por el contrario las emisiones de PM2.5 no exceden los ECAs del país.
[33]	Mediciones realizadas con el contador móvil de partículas de aire P311	Fueron analizados los datos utilizando el software SURFER 11.	Software SURFER 11.	Se evaluó que la máxima distancia para la dispersión del PM2.5 es de 2500m.	Se ha comprobado que la contaminación con suspensiones de partículas entre 0,3 y 2,5 PM se produce principalmente en el sur de la ciudad de Timisoara.
[34]	Se toma en cuenta la cuantificación de la carga anual de mortalidad que tiene relación con las emisiones de PM2.5	Fueron insertados los datos en el modelo atmosférico conformalcúbico para su análisis	Modelo atmosférico conformalcúbico	Las emisiones de PM2.5 de los cruceros, los buques cisterna y los transbordadores fueron del 38%, el 37% y el 13%	Los buques deben utilizar un combustible destilado con un 0,1% de azufre porque reduciría las concentraciones máximas de PM2.5
[35]	Observaciones de aire superior con globo sonda se utilizaron en las simulaciones del modelo.	Se procesan los datos obtenidos mediante el software AERMOD	Modelo de dispersión gaussiano AERMOD	La media anual de PM2.5 en Halifax fue de 0,16 µg m-3	Las emisiones del PM2.5 resultaron estar muy por debajo de las Normas Nacionales de Calidad del Aire.
[14]	El PMDM se utilizó para examinar los errores espaciales de información sobre partículas que reciben actualmente los ciudadanos.	PMDM y el sistema de información geográfico (GIS)	PMDM	Altos porcentajes de PM2.5 en diversas zonas del país	Según la modelización, la concentración de PM2.5 era buena en el 31%, moderada en el 26%, insalubre en 28%, y muy insalubre en el 15% de las zonas.

[36]	Se realizaron campañas de mediciones de campo para obtener datos sobre las emisiones de PM y las concentraciones de PM en las fuentes.	Se procesan los datos obtenidos mediante el software AERMOD	Modelo de dispersión gaussiano AERMOD	Las concentraciones medias diarias de PM10 y PM2.5 se estimaron en $436,01 \pm 166,77 \mu\text{g m}^{-3}$ y $291,09 \pm 105,81 \mu\text{g m}^{-3}$ .	La fracción de emisión de PM2.5 procedente de la instalación avícola era de aproximadamente el 64,71% ( $\pm 0,79\%$ ) de PM10, lo cual es elevado en comparación con las emisiones típicas de PM procedentes de instalaciones avícolas.
[15]	Se recolectaron datos de la estación meteorológica.	Se utilizó el modelo del AERMOD y la data meteorológica de la estación del clima del aeropuerto de Chania.	Modelo de dispersión gaussiano AERMOD	Emisiones anuales de $0.32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM2.5	Las emisiones de PM2.5 no superan los límites máximos permisibles regulados por el país, puesto que son mucho menores al valor.

#### IV. DISCUSIÓN

Respecto al objetivo de investigación se evidencia que 5 artículos mostraron resultados positivos respecto a las emisiones del PM y que no excedan a los estándares de calidad ambiental del país y la zona de estudio, o los estándares de emisión de la Organización Mundial de la Salud

(OMS), tal es el caso de Rojano [18], Santillán y otros [6], Espinoza [13], Makridis y Lazaridis [15], Gibson y otros [35]; por otra parte, 25 fueron los estudios que obtuvieron resultados negativos y que se exceden a los ECA del país o de la OMS.

Se resalta que la mayoría de los estudios analizados utilizan el software de modelamiento de dispersión AERMOD y su preprocesador AERMET, o el uso del software ArcGIS con sus diferentes versiones según el año de uso. Por otro lado, respecto a la pregunta de investigación, los artículos señalan el estado de las emisiones del PM en el área de estudio que tomaron en cuenta, y a su vez indican si dichas emisiones excedían o no los estándares de calidad del aire [21]. También indican que los nuevos modelos de maquinarias empleadas en diversos trabajos de campo emiten una menor cantidad de material particulado en comparación con las series anteriores [4]. Adicionalmente, algunos estudios aportan algunas medidas que se deben tomar para disminuir las emisiones del PM como es el caso del estudio de Broome y otros, que recomiendan emplear el uso de un combustible destilado con un 0.1% de azufre en los buques para así ver una mejoría en la calidad del aire [34].

Tal como en Corea del Sur, mediante los estudios realizados en la ciudad de Daejeon se pudieron desarrollar diversos análisis que determinaban que existen diferentes concentraciones de PM2.5 según la zona de la ciudad, variando entre valores como buena o aceptable hasta muy insalubre [14]. Del mismo modo, Hadlocon y otros señalan que se la instalación avícola que tomaron como zona de estudio evidencia que la fracción de emisión de PM2,5 era de

aproximadamente el 64,71% ( $\pm 0,79\%$ ) de PM10, lo cual es considerado elevado al compararlo con las emisiones típicas de PM procedentes de instalaciones avícolas similares a la estudiada [36]; Lungu y Stefu hallaron que las emisiones de PM2.5 provenía principalmente de la zona sur de la ciudad de Timisoara y determinaron que la distancia máxima que puede recorrer dicho material particulado es de 2500 m alrededor de la ciudad [33]. Caso contrario, Espinoza Cruz mediante su simulación en AERMOD, sus resultados mostraron que los niveles de concentración de los Óxidos de Nitrógeno (NO<sub>x</sub>), Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>) y Partículas (PM10) emitidas por chimenea TG-34 de la central térmica Ventanilla, no sobrepasan los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para aire [13].

#### V. CONCLUSIONES

Se concluye que la presente investigación cumplió el objetivo planteado, por ende, se logró identificar que la mayoría de los estudios analizados emplean como modelo de dispersión atmosférica el software AERMOD y su preprocesador AERMET, en cambio hay una menor cantidad de investigaciones que utilizan otros softwares como Arc Gis, SURFER 11 o WRPLOT VIEW para el análisis de dispersión atmosférica. Además, los resultados y conclusiones de las investigaciones mencionadas en la Tabla II indican que la significancia de este análisis es importante para conocer los posibles afectados dentro del área de estudio como la población y su salud afectada por los PM o el ecosistema presente, tales como fuentes de agua, el aire o suelo afectado por el PM.

Con respecto a la pregunta de investigación, se señala que es de suma importancia conocer la cantidad de emisiones de PM en la zona donde reside la población e identificar qué producto o empresa es la causante de dicha contaminación, puesto que al tener conocimiento de estos datos se puede armar un plan para la reducción de emisiones y así tener una mejor calidad del aire para la población.

La importancia del presente artículo radica en que, al brindar la información sobre la calidad del aire a la población y a los gobiernos, se pueden crear diversos planes para mejorar dicho ECA, así como también no fomentar el uso de

maquinaria industrial o la construcción de industrias cercanas a la un área urbana.

Dentro de las limitaciones, se evidencia la escasez de investigaciones centradas en el modelamiento de la dispersión atmosférica para los materiales particulados; la mayoría de los artículos encontrados mencionan como tema principal las emisiones de los PM, sin embargo, había otros que mencionan los PM como un contaminante adicional dejando como tema principal las emisiones de gases de efecto invernadero.

Se sugiere que en base a la información obtenida se realicen líneas de investigación donde se empleen en mayor medida los softwares AERMOD y su preprocesador AERMET para el análisis de dispersión atmosférica; en dichas investigaciones se podrían mencionar sus diversos modos de uso y como las gráficas de estos programas permiten analizar en mayor cobertura la dispersión de los materiales particulados. Adicionalmente, sería idóneo que se siga investigando como tema principal la dispersión atmosférica para el material particulado, puesto que permitirá conocer la calidad del aire de diversas zonas y a su vez, en caso la calidad esté en mal estado, tomar las medidas correctivas para que dicho índice mejore y la salud de la población no se vea afectada de forma negativa.

Finalmente, con respecto a las recomendaciones se considera necesario realizar investigaciones donde la metodología sea aplicada a ciudades o zonas altamente industriales o una mayor presencia de transportes de gran escala, de esta manera se podrá recopilar información sobre el porcentaje de emisiones de dichos vehículos o empresas para poder así medir el posible daño que le están generando a la población. Se requiere más investigación respecto a países de América Latina como también países de similar situación que se encuentren en Asia o África. Por último, se recomienda emplear otros modelos de dispersión para que junto con el AERMOD se realice una comparación de precisión y así llegar con certeza a los valores reales referentes a las emisiones de material particulado.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a nuestros docentes y asesora por la guía y el apoyo en nuestro trabajo de investigación, así como también a nuestra casa de estudios por su acogida durante todo el transcurso de la carrera.

## REFERENCIAS

[1] EPA. (2014, 14 de julio). Conceptos básicos sobre el material particulado (PM, por sus siglas en inglés). [Online]. Available: <https://espanol.epa.gov/espanol/conceptos-basicos-sobre-el-material-particulado-pm-por-sus-siglas-en-ingles#:~:text=PM%20significa%20material%20particulado%20>.

[2] Instituto para la Salud Geambiental. (2022, 16 de junio). Material particulado. [Online]. Available: <https://www.saludgeoambiental.org/material-particulado/>

[3] U. Pöschl, "Atmospheric Aerosols: Composition, Transformation, Climate and Health Effects", *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 44, n° 46, pp. 7520–7540, noviembre de 2005.

[4] L. Han, J. Zhao, Y. Gao, Z. Gu, K. Xin y J. Zhang, "Spatial distribution characteristics of PM2.5 and PM10 in Xi'an City predicted by land use

regression models", *Sustainable Cities and Society*, vol. 61, p. 102329, octubre de 2020.

[5] Gobierno de Aragón. (2020). Dispersión de contaminantes. [Online]. Available: <https://aragonaire.aragon.es/es/dispersi#:~:text=La%20dispersi%C3%B3n%2C%20es%20decir%2C%20el,radiaciones%20solares%2C%20et c.https://aragonaire.aragon.es/es/dispersi#:~:text=La%20dispersi%C3%B3n%2C%20es%20decir%2C%20el,radiaciones%20solares%2C%20et c.>

[6] P. Santillán, M. Rodríguez, J. Orozco, I. Ríos, y K. Bayas, "Evaluación de la concentración y distribución espacial de material particulado en los campus de la UNACH – Riobamba", *Novasinerгия*, vol. 4, n° 2, pp. 111–126, diciembre de 2021.

[7] A. M. Vélez, "Evaluación de la dispersión de material particulado PM10 proveniente de los buses del SITM-MIO en el tramo San Pascual-La Buitrera de la ciudad de Santiago de Cali", tesis de pregrado, Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia, 2018.

[8] L. F. Pineda, N. Carbajal, A. Campos, A. Aragón y A. R. García, "Dispersión de atmospheric coarse particulate matter in the San Luis Potosí, Mexico, urban area", *Atmósfera*, vol. 27, n° 1, pp. 5-19, enero de 2014.

[9] A. J. Arrieta Fuentes, "Dispersión de material particulado (PM 10), con interrelación de factores meteorológicos y topográficos", *Ingeniería Investigación y Desarrollo*, vol. 16, n° 2, septiembre de 2016.

[10] A. Silva y G. Godoy, "Modelado de la dispersión de material particulado en la ciudad de Los Ángeles (Chile) a partir de las estufas a leña en el período de invierno usando AERMOD", *Obras y proyectos*, n° 20, pp. 44–54, diciembre de 2016.

[11] W. Javed, A. S. Wexler, G. Murtaza, H. R. Ahmad y S. M. A. Basra, "Spatial, temporal and size distribution of particulate matter and its chemical constituents in Faisalabad, Pakistan", *Atmósfera*, vol. 28, n° 2, pp. 99-116, abril de 2015.

[12] M. B. Gónzales, S. F. Pire, L. F. Cuesta y A. López, "Metodología para la calibración de modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos. Caso de estudio: dispersión de PM<sub>10</sub> en el entorno de La Habana", *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, n° 69, pp. 274-288, diciembre de 2013.

[13] C. J. Espinoza Cruz, "Determinación De La Dispersión Geográfica De Los Gases NOX, CO, SO2 Y Partículas (PM10), Emitidos Por Una Central Térmica Aplicando El Modelo AERMOD", tesis de pregrado, Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur, Lima, Perú, 2018.

[14] S. Son et al., "Fine-resolution mapping of particulate matter concentration in urban areas and population exposure analysis via dispersion modeling: a study in Daejeon, South Korea", *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 26, n° 16, pp. 15857–15871, abril de 2019.

[15] M. Makridis y M. Lazaridis, "Dispersion modeling of gaseous and particulate matter emissions from aircraft activity at Chania Airport, Greece", *Air Quality, Atmosphere & Health*, vol. 12, n° 8, pp. 933–943, junio de 2019.

[16] A. Casallas, M. P. Castillo Camacho, M. A. Guevara Luna, Y. González, E. Sanchez y L. C. Belalcazar, "Spatio-temporal analysis of PM2.5 and policies in Northwestern South America", *Science of The Total Environment*, vol. 852, n° 15, pp. 158504, septiembre de 2022.

[17] A. M. Vengoechea, R. E. Rojano y H. A. Arregoces, "Dispersión y Concentración de Aerosoles Marinos PM 10 en una Ciudad Costera del Caribe", *Información tecnológica*, vol. 29, n° 6, pp. 123–130, diciembre de 2018.

[18] R. E. Rojano, Y. I. Mendoza, H. Arregoces y G. M. Restrepo, "Dispersión de Contaminantes del Aire (PM10, NO2, CO, COV y HAP) emitidos desde una Estación Modular de Compresión, Tratamiento y Medición de Gas Natural", *Información tecnológica*, vol. 27, n° 5, pp. 99–110, octubre de 2016.

[19] E. J. N. Baticados, S. C. Capareda y A. L. Maglinao, "Particulate matter emission factors using low-dust harvesters for almond nut-picking operations", *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 69, n° 11, pp. 1304–1311, setiembre de 2019.

[20] Á. P. Prieto et al., "Spatial analysis and evolution of four air pollutants in England and Wales", *Science of The Total Environment*, vol. 774, p. 145665, junio de 2021.

- [21] S. A. Pacsi Valdivia, "Análisis temporal y espacial de la calidad del aire determinado por material particulado pm10 y pm2,5 en lima metropolitana", *Anales Científicos*, vol. 77, n.º 2, p. 273, diciembre de 2016.
- [22] J. A. Espinoza Guillen, "Evaluación espacial y temporal del material particulado PM10 y PM2.5 en Lima Metropolitana para el periodo 2015-2017", tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú, 2018.
- [23] H. F. Bonifacio, R. G. Maghirang, B. W. Auvermann, E. B. Razote, J. P. Murphy y J. P. Harner, "Particulate matter emission rates from beef cattle feedlots in Kansas—Reverse dispersion modeling", *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 62, n.º 3, pp. 350–361, enero de 2012.
- [24] A. Espinoza y S. K. Tito, "Distribución espacial de las partículas en suspensión PM10 en relación al viento y la temperatura del aire en la zona sur del Cercado del Callao", tesis de pregrado, Universidad Nacional del Callao, Lima, Perú, 2019.
- [25] A. L. Ruiz Cruz, "Contaminación del aire con material particulado (PM10 y PM2.5) por el uso de productos pirotécnicos durante navidad y año nuevo en Lima metropolitana, 2017-2021", tesis de pregrado, Universidad Nacional del Callao, Lima, Perú, 2021.
- [26] M. N. Uugwanga y N. A. Kgabi, "Dilution and dispersion of particulate matter from abandoned mine sites to nearby communities in Namibia", *Heliyon*, vol. 7, n.º 4, abril de 2021.
- [27] A. Ramos Moreno y D. M. Benítez Ramírez, "Modelamiento de material particulado emitidos por coquización. Municipio de Samacá, Boyacá", *Revista Logos, Ciencia & Tecnología*, vol. 8, n.º 2, enero de 2017.
- [28] C. Álvarez, C. Raúl y E. Rodríguez, "ANÁLISIS DE LA DISPERSIÓN DE MATERIAL PARTICULADO GRUESO EMITIDO POR UNA FÁBRICA DE CERÁMICAS EN EL DISTRITO DE VILLA HAYES, PARAGUAY", en XXVII Jornadas de Jovens Pesquisadores da Associação de Universidades Grupo Montevideo – AUGM, São Paulo, Brazil, 2019.
- [29] I. J. Lizarraga Isla, J. E. Pomalaya Valdez, L. F. Suarez Salas y Y. Bendezu Roca, "Dispersión de material particulado 2.5 emitido por pollerías usando el modelo AERMOD en Huancayo Metropolitano, Perú", *DYNA*, vol. 86, n.º 211, pp. 346–353, octubre de 2019.
- [30] J. F. Méndez Espinosa, L. C. Pinto Herrera, B. R. Galvis Remolina y J. E. Pachón Quinche, "Estimación de factores de emisión de material particulado resuspendido antes, durante y después de la pavimentación de una vía en Bogotá", *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 27, n.º 1, pp. 43–60, enero de 2017.
- [31] M. Marín y A. M. Otalvora, "Implementación de un modelo de análisis de dispersión atmosférica de material particulado (PM10) a través de la herramienta AERMOD VIEW en el municipio de Yumbo (Valle del Cauca)", tesis de pregrado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Santiago de Cali, Colombia, 2020.
- [32] M. A. Barrantes, "Dispersión de material particulado (PM10 y PM2.5) en Huancayo Metropolitano, región Junín, 2020", tesis de pregrado, Universidad César Vallejo, Lima, Perú, 2021.
- [33] M. Lungu y N. Stefu, "Study on particulate matter dispersion by correlating direct measurements with numerical simulations: Case study—Timisoara urban area", *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 15, n.º 7, pp. 1441–1452, septiembre de 2017.
- [34] R. A. Broome et al., "The mortality effect of ship-related fine particulate matter in the Sydney greater metropolitan region of NSW, Australia", *Environment International*, vol. 87, pp. 85–93, febrero de 2016.
- [35] M. D. Gibson, S. Kundu y M. Satish, "Dispersion model evaluation of PM2.5, NOx and SO2 from point and major line sources in Nova Scotia, Canada using AERMOD Gaussian plume air dispersion model", *Atmospheric Pollution Research*, vol. 4, n.º 2, pp. 157–167, abril de 2013.
- [36] L. S. Hadlocon et al., "Modeling of particulate matter dispersion from a poultry facility using AERMOD", *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 65, n.º 2, pp. 206–217, enero de 2015.