

# Comportamiento del material particulado en La Habana durante 2021

## Behavior of particulate material in Havana during 2021



<https://cu-id.com/2377/v30n4e01>

 Rosemary López Lee\*,  Arnaldo Evaristo Collazo Aranda,  Ignaivis de la Caridad Castillo Lemus,  Rachel Martínez Rodríguez

Instituto de Meteorología de Cuba (INSMET), La Habana, Cuba.

**RESUMEN:** El monitoreo de la contaminación atmosférica representa un aspecto fundamental para mejorar la calidad del aire. Esta puede verse afectada por diversos contaminantes. Para el caso específico de Cuba, destaca el material particulado como uno de los contaminantes urbanos más frecuentes. Por tales motivos, la presente investigación tuvo como objetivo, caracterizar el comportamiento del material particulado empleando el modelo *System for Integrated modeling of Atmospheric composition*. Se obtuvo una serie diaria de concentraciones medias y máximas estimadas para La Habana durante el año 2021. Se realizó una caracterización del comportamiento del contaminante analizando las concentraciones medias diarias y medias mensuales. Se revisaron los días en que las concentraciones sobrepasaban los valores de las concentraciones máximas admisibles establecidas en la Norma Cubana. Además, se compararon estos resultados con los Valores Guías de Calidad del Aire recomendados por la Organización Mundial de la Salud. De forma general, los valores diarios estimados estuvieron en correspondencia con los patrones de distribución espacial y temporal característicos observados en estudios precedentes en la ciudad con monitoreo automático y activo. Se demuestra así la utilidad de la herramienta de las salidas del modelo *System for Integrated modeling of Atmospheric composition* para brindar información de calidad del aire en La Habana.

**Palabras clave:** material particulado, System for Integrated modeling of Atmospheric composition.

**ABSTRACT:** Air pollution monitoring is a key aspect of improving air quality. It can be affected by various pollutants. In the specific case of Cuba, particulate matter stands out as one of the most frequent urban pollutants. For these reasons, the objective of this research was to characterize the behavior of particulate matter using the System for Integrated modeling of Atmospheric composition. A daily series of estimated mean and maximum concentrations for Havana during the year 2021 was obtained. A characterization of the behavior of the pollutant was carried out by analyzing the average daily and average monthly concentrations. The days on which the concentrations exceeded the values of the maximum permissible concentrations established in the Cuban Standard were reviewed. In addition, these results were compared with the Air Quality Guideline Values recommended by the World Health Organization. In general, the estimated daily values corresponded to the characteristic spatial and temporal distribution patterns observed in previous studies in the city with automatic and active monitoring. Thus, the usefulness of the output tool of the System for Integrated model model composition to provide air quality information in Havana is demonstrated.

**Key words:** particulate material, System for Integrated modeling of Atmospheric composition.

\*Autor para correspondencia: Ignaivis de la Caridad Castillo Lemus. E-mail: [Ignaivis@gmail.com](mailto:Ignaivis@gmail.com)

Recibido: 12/01/2024

Aceptado: 03/04/2024

**Conflicto de intereses:** Los autores declaran que no existen conflictos de intereses en la realización del estudio.

**Contribución de los autores:** Todos los autores contribuyeron al diseño del estudio y la redacción del artículo. Asimismo, todos los autores aprobaron la versión final. Dra. Rosemary López Lee, MSc. Arnaldo Evaristo Collazo Aranda, Lic. Ignaivis de la Caridad Castillo Lemus, Lic. Rachel Martínez Rodríguez: **preparación, el diseño del método de la investigación, la integración de resultados previos y la redacción del artículo. También realizó el proceso estadístico de los datos experimentales.** Dra. Rosemary López Lee, MSc. Arnaldo Evaristo Collazo Aranda, Lic. Ignaivis de la Caridad Castillo Lemus, Lic. Rachel Martínez Rodríguez tuvieron a su cargo **el proceso y elaboración de las salidas cartográficas de la investigación.** Dra. Rosemary López Lee, MSc. Arnaldo Evaristo Collazo Aranda, Lic. Ignaivis de la Caridad Castillo Lemus, Lic. Rachel Martínez Rodríguez: **diseño y programó la base de datos, incluyendo los filtros para la selección de datos, su manejo y operación.**

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

## INTRODUCCIÓN

El monitoreo de la contaminación atmosférica representa un aspecto fundamental para mejorar la calidad del aire ya que, lo que no se mide, no se puede mejorar. En la actualidad el grado de contaminación de la atmósfera puede determinarse utilizando diversas herramientas y métodos (ENVIRA IoT, 2020). En Cuba, resulta difícil mantener un monitoreo continuo de la calidad del aire. Por tales motivos se ha hecho necesario buscar herramientas que permitan fortalecer el Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire. Tal es el caso del *System for Integrated modelling of Atmospheric composition (SILAM)*, empleado actualmente en el Centro de Contaminación y Química de la Atmósfera (CECONT) del Instituto de Meteorología (INSMET).

*SILAM* es un modelo de dispersión atmosférica de escala global a meso desarrollado por el Instituto Meteorológico de Finlandia (*FMI*) (Sofiev et al., 2006). Este sistema, perteneciente al programa *Copernicus*, proporciona información sobre la composición atmosférica, la calidad del aire y el humo de los incendios forestales. También puede resolver el problema de la dispersión inversa. Puede tomar datos de una variedad de fuentes, incluidas las naturales como la sal marina, el polvo y el polen (Martínez, 2022).

Todas estas fuentes naturales, unida a fuentes fijas de emisión y al aporte del transporte automotor, hacen que aumenten las concentraciones de material particulado en las zonas urbanas. Para el caso específico de Cuba, en varias campañas de medición realizadas en las principales avenidas de La Habana en diferentes períodos de monitoreo, se han encontrado concentraciones elevadas de este contaminante (Cuesta et al., 2020; de la Rosa, 2020; Reyes, 2022).

El monitoreo continuo y sistemático de la contaminación del aire, proporciona información a los gobiernos sobre la calidad del aire. Esto permite hacer un análisis basado en el grado de concentración de los contaminantes, independientemente de la magnitud de las emisiones. Por tales motivos, la presente investigación tiene como objetivo caracterizar el comportamiento del material particulado (PM) empleando el modelo *SILAM* para brindar información de calidad del aire en La Habana.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Fue seleccionada La Habana como área de estudio teniendo en cuenta diversos criterios de interés científico, como fueron:

- Es una de las ciudades más afectadas por la contaminación atmosférica en Cuba, al ser la más poblada y contar con el mayor centro industrial y portuario del país (Cuesta et al., 2019).

- Existencia de un inventario de las principales fuentes fijas de contaminación atmosférica (Cuesta et al., 2018).
- Existencia de estudios sobre el pronóstico de dispersión de contaminantes, utilizando el sistema de modelos AERMOD, a partir de las emisiones provenientes de las fuentes fijas de la ciudad (Cuesta et al., 2014 y 2018).
- Existencia de diversos estudios sobre la contaminación atmosférica y el material particulado en toda la provincia (Vidal, 2017; Cuesta et al., 2019; De la Rosa, 2020; Reyes, 2022).
- Existencia de datos provenientes de estaciones terrestre de monitoreo de la calidad del aire para distintos períodos de tiempo.

El estudio y análisis de esta gran diversidad de antecedentes permitió estimar de modo subjetivo si las salidas del modelo *SILAM* reflejaban de forma acertada lo que sucede en superficie respecto al material particulado.

## Procesamiento de las salidas del modelo SILAM

El *FMI* proporciona tres conjuntos de datos basados en *SILAM*. Un pronóstico de contaminantes atmosféricos globales de 4 días basado en *TNO-MACC* (emisión global) e *IS4FIRES* (incendios forestales). Un pronóstico mundial de humo de incendios forestales de un día basado en *IS4FIRES*. Y un pronóstico de polen de 5 días para Europa (*FMI*, 2022).

Para esta investigación se descargaron los archivos (en formato *NetCDF*), provenientes del modelo *SILAM* correspondientes al área de estudio. Posteriormente se procedió a extraer los valores de las concentraciones de material particulado con diámetro inferior a 2.5 y 10 micras ( $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$ ): promedio diario (`cnc_mean_day`) y máximo en 24 horas (`cnc_max_day`) utilizando un Script de *python* sobre *Linux Ubuntu*. Por último, se procedió a manejar la información utilizando *Microsoft Excel* sobre *Windows* y se obtuvo la serie diaria de las concentraciones medias y máximas de  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$  para La Habana desde enero hasta diciembre del 2021.

Los valores de las concentraciones de material particulado del modelo *SILAM* fueron desagregados para 4 zonas que agrupan los 15 municipios de La Habana (figura 1). Cada zona quedó estructurada de la siguiente forma: Zona 1 (Habana del Este y Guanabacoa), Zona 2 (Diez de Octubre, Regla, Habana Vieja, Centro Habana y San Miguel del Padrón), Zona 3 (Playa, Plaza de la Revolución, Boyeros, La Lisa, Marianao y El Cerro) y Zona 4 (Arroyo Naranjo y Cotorro).

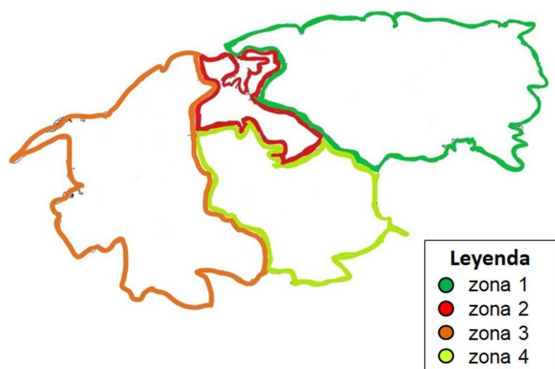


Figura 1. Zonas de La Habana cubiertas por el modelo SILAM

A partir de la base de datos confeccionada, se realizó una caracterización del comportamiento del PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>. Se analizó el comportamiento de las concentraciones medias diarias y medias mensuales. Se revisaron los días en que las concentraciones sobrepasaban los valores de las concentraciones máximas admisibles (CMA) establecidas en la Norma Cubana vigente (NC 1020:2014). Se compararon estos resultados con los valores guías de calidad del aire (GCA) recomendados por la OMS en 2021 (tabla 1).

Para evaluar el nivel de contaminación atmosférica se utilizó el Índice de Calidad del Aire (ICA), como

aparece en la NC 111:2004, equivalente al cociente de la concentración determinada para el contaminante y la CMA. En este caso se evaluaron dos contaminantes, por lo tanto, se determinó el ICA como el mayor de los subíndices obtenidos.

En la tabla 2 se muestran las categorías del ICA, con las indicaciones correspondientes a cada una de estas y las implicaciones que pueden tener en la salud. En esta investigación se estableció la evaluación del ICA de cada contaminante para un período de tiempo diario.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Caracterización del comportamiento del PM<sub>10</sub> en La Habana según las estimaciones del modelo SILAM

El PM<sub>10</sub> tuvo un valor medio de 13 µg/m<sup>3</sup> durante el 2021 en La Habana. Al analizar la marcha anual se encontró un patrón de comportamiento muy similar en las 4 zonas que reporta el modelo, debido a que el material particulado tiene una variación espacial mucho menor que los gases contaminantes emitidos directamente de los procesos de combustión. Los valores medios mensuales se mantuvieron inferiores a la CMA, con poca diferencia entre los valores máximos y mínimos (figura 2).

Tabla 1. Concentraciones Máximas Admisibles (CMA) y Guías de Calidad (GCA) para 24 horas

Contaminante	CMA (µg/m <sup>3</sup> )	GCA (µg/m <sup>3</sup> )
Partículas en suspensión ≤10µm diámetro (PM <sub>10</sub> )	50	45
Partículas en suspensión ≤2.5µm diámetro (PM <sub>2.5</sub> )	25	15

Fuente: Norma Cubana (NC) 1020:2014 y OMS, (2021)

Tabla 2. Índice de Calidad del Aire (ICA)

Índice	Categoría	Comentarios
0 - 79	Buena	No sobrepasa el 79 % del valor de la CMA prescrito en la NC 1020:2014. Óptima calidad sanitaria del aire. Supuesta protección de toda la población (aunque no puede asegurarse que no sobrepase el umbral de respuesta de efectos adversos en individuos aislados).
80 - 99	Aceptable	No supera el 99 % de la CMA. Comienza el deterioro de la calidad del aire. Posible aparición de efectos leves en individuos o grupos de alta susceptibilidad (variabilidad individual de umbral de respuesta a los efectos) de muy difícil detección aún por investigaciones.
100-199	Deficiente	Sobrepasa entre 100 - 199 % el valor de la CMA prescrito en la NC 1020:2014. Ligero incremento en la frecuencia y severidad de los efectos adversos agudos y crónicos en la población general y principalmente en personas con enfermedades cardiovasculares, respiratorias y alérgicas y en otras de elevada susceptibilidad, solo detectables mediante investigaciones muy específicas y sensibles.
200-299	Mala	Supera entre 2 y 3 veces (200 - 300 %) el valor de la CMA. Aumento de la frecuencia y gravedad de los efectos adversos en grupos de alta susceptibilidad y en la población general, ya medibles mediante investigaciones específicas a escala individual y ecológica, basadas en registros morbilidad. Da lugar a una <b>SITUACIÓN DE ATENCIÓN</b> .
300-499	Pésima	Supera entre 3 y 5 veces el valor de la CMA. En dependencia del incremento de la concentración del contaminante y el tiempo de exposición continua el aumento de la frecuencia y gravedad de efectos adversos en los grupos de alta susceptibilidad y en la población general. Da lugar a una <b>SITUACIÓN DE ALERTA</b> .
≥ 500	Crítica	Se supera el límite de 5 veces la CMA, dando lugar a un incremento aún mayor del riesgo o probabilidad de ocurrencia de los efectos adversos sobre la salud de la población general y en grupos de riesgo, que se traduce en un evidente incremento agudo de la morbilidad y mortalidad que sobrecarga los servicios asistenciales; da lugar a una <b>SITUACIÓN DE EMERGENCIA AMBIENTAL</b> .

Fuente: Norma Cubana (NC) 111:2004

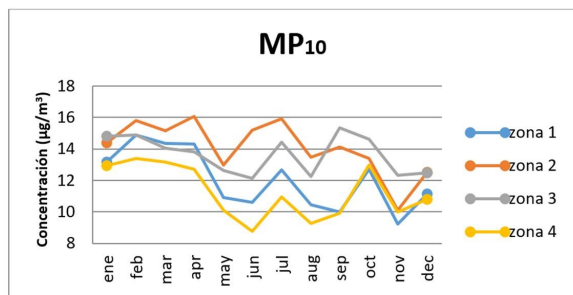


Figura 2. Marcha anual del PM<sub>10</sub> en La Habana (2021) estimado por el Modelo SILAM

La similitud de los patrones de comportamiento del contaminante en las cuatro zonas puede ser resultado del aporte del flujo vehicular y las fuentes fijas emisoras de PM ubicadas en la provincia. Además, se encontraron similitudes con el patrón descrito por estudios precedentes (Preval, 2012; Vidal, 2017; Cuesta *et al.*, 2019, de la Rosa, 2020; Reyes, 2022).

Las zonas 2 y 3 reportaron valores ligeramente superiores. La zona 2 alcanzó valores medios máximos de 16 µg/m<sup>3</sup> en febrero, abril y julio y la zona 3 valores de 15 µg/m<sup>3</sup> durante enero, febrero, septiembre y octubre. Estas zonas incluyen municipios como Regla, San Miguel, Habana Vieja y La Lisa, los cuales cuentan con importantes fuentes fijas emisoras de material particulado (Cuesta *et al.*, 2019).

La zona 1 reportó los valores medios máximos en marzo y abril con 14 µg/m<sup>3</sup> y la zona 4 no superó los 13 µg/m<sup>3</sup> mensuales alcanzados en los meses de enero a abril, y en octubre. En estas zonas se encuentran también fuentes naturales y antropogénicas emisoras de PM, como es el caso de Habana del Este y el Cotorro respectivamente (Cuesta *et al.*, 2020).

Los valores ligeramente superiores registrados entre mayo y septiembre pudieron deberse a la presencia de masas de aire con polvo del Sahara sobre el territorio cubano. Las primeras afectaciones por polvo en La Habana se producen en el mes de abril (Mojena *et al.*, 2019), coincidiendo con medias mensuales ligeramente elevadas.

Al comparar los valores medios diarios del PM<sub>10</sub> en La Habana durante el 2021 con la NC 1020:2014 se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 3. El contaminante sobrepasó la CMA en dos días. El 2 de julio, la norma fue incumplida en la zona 1, alcanzando los 65.5 µg/m<sup>3</sup> y en la zona 2, donde se reportaron 76.8 µg/m<sup>3</sup>. El 10 de octubre se sobrepasó la CMA en las zonas 1, 2 y 3 con 55.0 µg/m<sup>3</sup>, 67.5 µg/m<sup>3</sup> y 63.9 µg/m<sup>3</sup> respectivamente. Lo cual representa un valor del ICA catalogado de “Deficiente” para las zonas 1, 2 y 3, mientras para la zona 4 representa un valor del ICA catalogado de “Aceptable”.

Si se compara con los valores GCA de la OMS los días 2 de julio y 10 de octubre también se sobrepasa la concentración recomendada en las zonas 3 y 4 respectivamente, en ambas ocasiones con 48 µg/m<sup>3</sup> (tabla 4).

### Caracterización del comportamiento del PM<sub>2.5</sub> en La Habana según las estimaciones del modelo SILAM

El PM<sub>2.5</sub> tuvo un valor medio de 8 µg/m<sup>3</sup> durante el 2021 en La Habana. Los valores medios mensuales se mantuvieron bajos, con poca amplitud entre los valores máximos y mínimos (figura 3). Al analizar la marcha anual se encontró un patrón de comportamiento muy similar al descrito para el PM<sub>10</sub>. El resultado pudo deberse a que el PM<sub>2.5</sub> constituye aproximadamente el 50 % del PM<sub>10</sub>. Esto evidencia la influencia de otras fuentes de material particulado en conjunto con las emisiones derivadas por la combustión en las fuentes móviles.

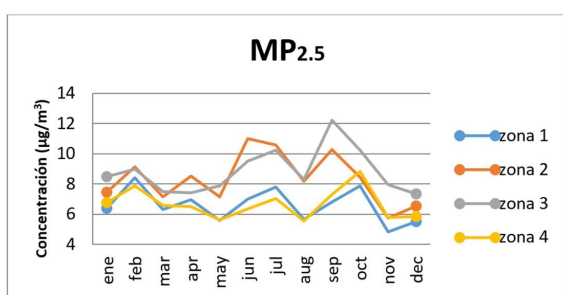
Las zonas 2 y 3 reportaron valores ligeramente superiores. La zona 2 alcanzó un valor medio máximo de 11 µg/m<sup>3</sup> en junio y julio y la zona 3 alcanzó los 12 µg/m<sup>3</sup> durante septiembre. La zona 1 reportó los valores medios máximos en febrero, julio y octubre con 8 µg/m<sup>3</sup> y la zona 4 no superó los 9 µg/m<sup>3</sup> mensuales alcanzados en octubre.

Tabla 3. Cantidad de días que sobrepasaron la CMA para el PM<sub>10</sub> en La Habana (2021) según la NC 1020:2014

Mes	zona 1 (>CMA)	Máx. (µg/m <sup>3</sup> )	zona 2 (>CMA)	Máx. (µg/m <sup>3</sup> )	zona 3 (>CMA)	Máx. (µg/m <sup>3</sup> )	zona 4 (>CMA)	Máx. (µg/m <sup>3</sup> )
enero	0	27.3	0	30.8	0	33.8	0	26.8
febrero	0	35.6	0	39.8	0	37.1	0	26.8
marzo	0	29.5	0	27.5	0	23.1	0	23.3
abril	0	29.1	0	41.8	0	26.9	0	25.4
mayo	0	17.7	0	27.9	0	24.4	0	17.7
junio	0	18.4	0	34.4	0	19.7	0	15.1
julio	1	65.5	1	76.8	0	48.4	0	40.4
agosto	0	19.6	0	23.0	0	23.4	0	19.1
septiembre	0	27.1	0	44.1	0	32.5	0	23.4
octubre	1	55.0	1	67.5	1	63.9	0	48.0
noviembre	0	17.6	0	20.6	0	30.4	0	15.4
diciembre	0	23.6	0	24.9	0	19.8	0	20.2
<b>total</b>	<b>2</b>	-	<b>2</b>	-	<b>1</b>	-	<b>0</b>	-

**Tabla 4.** Cantidad de días que sobrepasaron la CMA para el PM<sub>10</sub> en La Habana según las GCA de la OMS (2021)

Mes	zona 1 (>CMA)	Máx. (µg/m <sup>3</sup> )	zona 2 (>CMA)	Máx. (µg/m <sup>3</sup> )	zona 3 (>CMA)	Máx. (µg/m <sup>3</sup> )	zona 4 (>CMA)	Máx. (µg/m <sup>3</sup> )
enero	0	27.3	0	30.8	0	33.8	0	26.8
febrero	0	35.6	0	39.8	0	37.1	0	26.8
marzo	0	29.5	0	27.5	0	23.1	0	23.3
abril	0	29.1	0	41.8	0	26.9	0	25.4
mayo	0	17.7	0	27.9	0	24.4	0	17.7
junio	0	18.4	0	34.4	0	19.7	0	15.1
julio	1	65.5	1	76.8	1	48.4	0	40.4
agosto	0	19.6	0	23.0	0	23.4	0	19.1
septiembre	0	27.1	0	44.1	0	32.5	0	23.4
octubre	1	55.0	1	67.5	1	63.9	1	48.0
noviembre	0	17.6	0	20.6	0	30.4	0	15.4
diciembre	0	23.6	0	24.9	0	19.8	0	20.2
<b>total</b>	<b>2</b>	<b>-</b>	<b>2</b>	<b>-</b>	<b>2</b>	<b>-</b>	<b>1</b>	<b>-</b>



**Figura 3.** Marcha anual del PM<sub>2.5</sub> en La Habana (2021) estimado por el Modelo SILAM

Al comparar los valores medios diarios de PM<sub>2.5</sub> en La Habana durante el 2021 con la NC 1020:2014 se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 5. En la zona 1 las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> sobrepasaron la CMA en dos ocasiones, alcanzando el valor máximo el 2 de julio con 60.6µg/m<sup>3</sup>. En la zona 2, seis días incumplieron la norma; la mayor media diaria fue de 73 µg/m<sup>3</sup> el 2 de julio. Lo cual representa un valor del ICA catalogado de “Mala” para la zona 1 y 2.

Para la zona 3 se sobrepasó la concentración en 7 ocasiones y el valor máximo se reportó el 12 de octubre alcanzando los 59.5 µg/m<sup>3</sup>. La zona 4 incumplió durante tres días y también alcanzó su máximo el 12 de octubre con 44.3 µg/m<sup>3</sup>. Lo cual representa un valor del ICA catalogado de “Mala” a la zona 3 y de “Deficiente” para la zona 4.

Si se toman como referencia los valores GCA recomendados por la OMS, en 2021 el aire respirado en La Habana sobrepasó las condiciones recomendadas durante los doce meses del año. Como se muestra en la tabla 6, el número de días por zona que incumplen los valores GCA aumenta hasta casi 7 veces el número de días que incumplieron la NC1020:2014.

En resumen, se observó que en las zonas 2 y 3 fue donde se alcanzaron los valores de concentraciones máximos para el material particulado, así como donde mayor cantidad de días se superó la CMA de estos contaminantes según la NC 1020:2014 para el año 2021. En contraste, la zona 1 y 4 fue donde se observaron los valores promedios mínimos de estos contaminantes en La Habana.

**Tabla 5.** Cantidad de días que sobrepasaron la CMA para el PM<sub>2.5</sub> en La Habana (2021) según la NC 1020:2014

Mes	zona 1 (>CMA)	Máx. (µg/m <sup>3</sup> )	zona 2 (>CMA)	Máx. (µg/m <sup>3</sup> )	zona 3 (>CMA)	Máx. (µg/m <sup>3</sup> )	zona 4 (>CMA)	Máx. (µg/m <sup>3</sup> )
enero	0	15.8	0	19.3	0	23.5	0	17.8
febrero	0	24.8	1	28.1	1	29.8	0	20.1
marzo	0	15.7	0	16.1	0	18.1	0	15.1
abril	0	17.6	0	23.9	0	14.2	0	13.2
mayo	0	12.3	0	22.7	0	20.6	0	11.8
junio	0	15.0	1	30.9	0	17.6	0	14.3
julio	1	60.6	1	73.0	2	45.9	1	37.6
agosto	0	10.1	0	18.1	0	18.9	0	10.2
septiembre	0	22.4	2	31.2	2	27.9	0	19.3
octubre	1	49.4	1	61.9	1	59.5	2	44.3
noviembre	0	12.9	0	17.6	1	27.2	0	11.6
diciembre	0	16.9	0	18.6	0	14.5	0	15.3
<b>total</b>	<b>2</b>	<b>-</b>	<b>6</b>	<b>-</b>	<b>7</b>	<b>-</b>	<b>3</b>	<b>-</b>

**Tabla 6.** Cantidad de días que sobrepasaron la CMA para el PM<sub>2.5</sub> en La Habana según los GCA de la OMS (2021)

Mes	zona 1 (>CMA)	Máx. (µg/m <sup>3</sup> )	zona 2 (>CMA)	Máx. (µg/m <sup>3</sup> )	zona 3 (>CMA)	Máx. (µg/m <sup>3</sup> )	zona 4 (>CMA)	Máx. (µg/m <sup>3</sup> )
enero	2	15.8	4	19.3	3	23.5	2	17.8
febrero	2	24.8	3	28.1	1	29.8	1	20.1
marzo	1	15.7	2	16.1	2	18.1	1	15.1
abril	1	17.6	2	23.9	0	14.2	0	13.1
mayo	0	12.3	2	22.7	4	20.6	0	11.8
junio	1	15.0	5	30.9	4	17.6	0	14.3
julio	1	60.6	2	73.0	3	45.9	2	37.7
agosto	0	10.1	5	18.1	2	18.9	0	10.2
septiembre	2	22.4	6	31.2	9	27.9	2	19.3
octubre	3	49.4	2	61.80	5	59.5	5	44.3
noviembre	0	12.9	2	17.6	1	27.2	0	11.6
diciembre	1	16.9	2	18.6	0	14.5	1	15.3
<b>total</b>	<b>14</b>	-	<b>37</b>	-	<b>34</b>	-	<b>14</b>	-

### CONCLUSIONES

Se demuestra la utilidad de la herramienta de las salidas del modelo SILAM para brindar información de calidad del aire en La Habana. Los valores diarios de las concentraciones de material particulado se correspondieron con los patrones de distribución espacial y temporal característicos observados en estudios precedentes en la ciudad con monitoreo automático y activo. Se observó que la zona 2 y 3, que incluye los municipios de Diez de Octubre, Regla, Habana Vieja, Centro Habana, San Miguel del Padrón, Playa, Plaza, Boyeros, La Lisa, Marianao y el Cerro fue donde se alcanzaron los valores de concentraciones máximos para el material particulado.

### REFERENCIAS

Cuesta, O., Collazo, A., González, Y., Fonseca, M., Carla, A., Rodríguez, Y. (2014). Caracterización de la dispersión de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos emitidos por las principales fuentes fijas y su impacto potencial en La Habana. La Habana: Instituto de Meteorología; 2014.

Cuesta, O., Sosa, C., Iraola, C., González, Y., Núñez, V., Fonte, A. (2017). Inventario nacional de emisiones atmosféricas de las principales fuentes fijas. Rev. Cubana de Meteorología [Internet]. 2017 [citado 6 Mar 2019]; 23(2): [aprox. 3 p.]. Disponible en: <http://rcm.insmet.cu/index.php/rcm/article/view/238>

Cuesta, O., Bolufé, J., Sosa, C., Carrillo, E.R., Madrazo, J. (2018). Contaminación atmosférica por fuentes móviles en la calle Reina, La Habana. Revista Cubana de Meteorología, Vol. 23, No.1, pp.78-88, 2017, ISSN: 0864-151X.

Cuesta, O., González, Y., Sosa, C., López, R., Bolufé, J., Reyes, F. (2019). La calidad del aire en La Habana. Actualidad. Revista Cubana de

Meteorología, Vol. 25, No. 3, septiembre-diciembre 2019, ISSN: 2664-0880.

Cuesta, O., López, R., González, Y., Sosa, C., Bolufé, J., García, E., Reyes, F. (2020). Comportamiento del material particulado en la Habana. Valores experimentales. Revista Cubana de Meteorología, Vol. 26, No. Sp, 2020, ISSN: 2664-0880.

De la Rosa, A. (2020). Incidencia de los tipos de situaciones sinópticas y el polvo del Sahara en las concentraciones de material particulado en dos localidades de La Habana. Tesis presentada en opción al título de Licenciatura en Meteorología. Instituto superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas. Universidad de La Habana.

ENVIRA IoT, (2020). Cómo se mide la contaminación del aire. Consultado en: <https://envira.riot.es/como-se-mide-la-contaminacion-del-aire/>

FMI (2022). Instituto Meteorológico e Hidrológico de Finlandia. Sistema de modelado integrado de composición atmosférica (*SystemIntegrated of modeLingforAtmosphericComposition*) (SILAM). Consultado en: <https://silam.fmi.fi>

Martínez, R. (2022). Evaluación del impacto del ozono troposférico en el cultivo de la papa y en las enfermedades respiratorias crónicas en San José de las Lajas bajo influencia de condiciones meteorológicas tipos. Tesis presentada en opción al título de Licenciatura en Meteorología. Instituto superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas. Universidad de La Habana.

Mojena, E., Ortega, A. y Casielles, E.F. (2019). Las Nubes de polvo del Sahara como modulador del tiempo, el clima y la calidad del aire. Sus impactos en el medio ambiente. Memorias del CONTAT. Instituto de Meteorología.

Oficina Nacional de Normalización de Cuba (2004). Norma Cubana NC 111:2004. Calidad del aire: Reglas para la vigilancia de la calidad del aire en asentamientos humanos. La Habana: ONN; 2004.

- Oficina Nacional de Normalización de Cuba (2014). Norma Cubana 1020: 2014. Calidad del aire - Contaminantes - Concentraciones máximas admisibles y valores guías en zonas habitables. La Habana: ONN; 2014.
- OMS (2021). Guías actualizadas de la OMS sobre la calidad del aire y sus implicancias para los países latinoamericanos. Consultado en [www.saludsindanio.org/info@saludsindanio.org](http://www.saludsindanio.org/info@saludsindanio.org)
- Preval, E. (2012): Estimación y modelación de las emisiones generadas en las calderas de la Refinería Níco López. Tesis de Diploma para el título de Ingeniero Químico. Pp. 66, Universidad de La Habana, MES, La Habana.
- Reyes, F. (2022). Caracterización de los contaminantes atmosféricos en zonas de 2 municipios de La Habana. 2015–2017. Tesis para optar por el título de Máster en Salud Ambiental. Instituto Nacional de Higiene, Epidemiología y Microbiología.
- Sofiev, M., Siljamo, P., Valkama, I., Ilvonen, M. y Kukkonen, J. (2006). Un sistema de modelado de dispersión *SILAM* y su evaluación frente a datos ETEX. *Atmos. Environment*. 40 (4): 674–685. doi: <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.09.069>
- Vidal, I. (2017). Influencia de condiciones meteorológicas en las inmisiones de contaminantes atmosféricos en dos localidades de La Habana. Tesis en opción al título de Licenciado en Meteorología. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas. La Habana. Cuba

Dra. Rosemary López Lee. Universidad de La Habana, La Habana, Cuba. E-mail: [rosemary.lopez@insmet.cu](mailto:rosemary.lopez@insmet.cu)

Msc. Arnaldo Evaristo Collazo Aranda. Instituto de Meteorología de Cuba (Insmet), La Habana, Cuba. E-mail: [acollazo40@gmail.com](mailto:acollazo40@gmail.com)

Lic. Ignaivis de la Caridad Castillo Lemus. Instituto de Meteorología de Cuba (Insmet), La Habana, Cuba. E-mail: [ignaivis@gmail.com](mailto:ignaivis@gmail.com)

Lic. Rachel Martínez Rodríguez. Instituto de Meteorología de Cuba (Insmet), La Habana, Cuba. E-mail: [victoria20plus@gmail.com](mailto:victoria20plus@gmail.com)