



## DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS EN LA HABANA DE 1994 A 2020

### DISPERSION OF ATMOSPHERIC POLLUTANTS IN HAVANA FROM 1994 TO 2020

✉ ESMERALDA GONZÁLEZ SUÁREZ<sup>1</sup>, ✉ ISABEL LÁZARA HERNÁNDEZ RIVERO<sup>1</sup>, ✉ ROSEMARY LÓPEZ LEE<sup>2</sup>,  
✉ CARLOS MANUEL GONZÁLEZ RAMÍREZ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas. Carrera de Meteorología. La Habana, Cuba.

<sup>2</sup>Instituto de Meteorología. Regla, La Habana, Cuba.

#### Palabras Claves: Resumen

**Correlación acidificantes dispersión viento contaminantes** El impacto de los contaminantes atmosféricos en la salud humana es una preocupación global. Esta investigación pretende establecer una correlación entre el paso de sistemas frontales y la dispersión de contaminantes en La Habana de 1994 a 2020, para comprobar su efecto sobre el pH de las lluvias. Los contaminantes tratados son dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno, debido a su influencia como acidificantes. Las variables meteorológicas se relacionan con la dispersión de contaminantes, por lo que se tomaron valores de dirección y velocidad del viento para correlacionar las componentes meridional y zonal con valores anuales de contaminantes, y comprobar si guarda relación con el paso de sistemas frontales. Los últimos cinco años coincidieron con una temporada de pocos frentes, tanto en cantidad como en intensidad; para estos, la correlación entre los valores promedios de SO<sub>2</sub> y la componente zonal arrojó resultados significativos del coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>).

#### Keywords: Abstract

**Correlation acidifiers dispersion wind pollutants** The impact of air pollutants on human health is a global concern. This research was intended to establish a correlation between the passage of frontal systems and the dispersion of pollutants in Havana during 1994-2020 period, with the goal of verifying their effect on rain pH. The pollutants in question are sulfur dioxide and nitrogen dioxide, because of the remarkable influence they have as acidifiers. Meteorological variables are related to the dispersion of pollutants. Thus, wind direction and speed values were used to correlate the meridional and zonal components with annual pollutant values, to corroborate if there is a relation with the passage of frontal systems. The last five years coincided with a low cold front season, both in number and intensity. When the correlation was established between SO<sub>2</sub> average values and the zonal wind component for these years, it showed significant results for the determination coefficient (R<sup>2</sup>).

#### Introducción

La preocupación por la calidad del medio ambiente, y en especial del aire, ha trascendido las barreras de la ciencia y se ha convertido en un tema de interés para todos los sectores de la sociedad a nivel global. La población ha alcanzado una alta sensibilidad ante los graves problemas de contaminación que se han producido en ciudades de todo el mundo. Ese interés va a la par de la búsqueda de un equilibrio entre el desarrollo de las actividades humanas y la protección del medio ambiente.

La contaminación atmosférica representa un problema de gran complejidad, por lo que se le ha intentado dar solución desde las más diversas aristas de la ciencia. Históricamente, la actividad del hombre ha contribuido a la contaminación por medio de emisión de gases, partículas, aerosoles, y otros. La contaminación atmosférica consiste en la presencia de sustancias o de formas de energía que alteran la calidad de la atmósfera, de modo que presenta riesgos y provoca daños o molestias a las personas y al ecosistema en general, (López - Cabrera, 2006).

Recibido: 26 de noviembre de 2022

Aceptado: 10 de abril de 2023

Este artículo se encuentra bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC 4.0).

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



Desde finales del siglo XX y hasta la actualidad, el Centro de Contaminación y Química de la Atmósfera del Instituto de Meteorología y Cuba ha realizado múltiples trabajos relacionados con la calidad del aire y la contaminación del mismo, con el objetivo de conocer la influencia de las variables meteorológicas y climáticas en la dispersión y transformación de contaminantes. Entre ellos podemos mencionar a López, (1978) y Sánchez y Cuesta (1992) que explican la capacidad de las variables velocidad y dirección del viento, estabilidad atmosférica y la altura de capa de mezcla, de incrementar o disminuir los valores de inmisión de contaminantes en la atmósfera sobre una zona determinada (Vidal-Ros, *et al*, 2018).

Desde el punto de vista meteorológico, la presente investigación tiene como objetivo analizar la correlación existente entre las componentes zonal y meridional del viento y el pH de las lluvias, para evaluar la influencia que podrían tener los sistemas frontales en la dispersión de contaminantes por las lluvias después del paso de dichos sistemas. Para ello, se tomaron datos de la provincia de La Habana durante el periodo de 1994 a 2020.

Se tomó a La Habana como zona de estudio por su condición de provincia más poblada del país con 2.129.561 habitantes 2020, (Red latinoamericana de gerontología , 2022) además de que cuenta con la presencia de zonas industriales, ya que en La Habana se encuentran instalaciones de la industria ligera, industrias químicas y farmacéuticas, así como la Refinería Níco López, la Metal-Mecánica Varona (Carmona Tamayo & Izquierdo Ferrer, 2019), entre otras, que contribuyen con la emisión de contaminantes a la atmósfera. La empresa Siderúrgica José Martí está situada en el municipio capitalino Cotorro, el cual alcanzó la categoría de “malo” dentro de las clasificaciones de calidad del aire (ICA), según la norma cubana NC 111:2004, asociada en tal sentido a la alta actividad industrial (Ordoñez-Sánchez, *et al*, 2018).

Las sustancias que contaminan la atmósfera de las zonas urbanas proceden fundamentalmente de los productos de combustión que, en cantidades cada vez mayores, son liberados por la producción de energía, el transporte y otras aplicaciones (Hayas Barrú A. , 1991). En la zona de estudio, los principales contaminantes emitidos a la atmósfera por fuentes fijas son causados por las actividades generadoras de energía, las industriales y otras de índole económico en el territorio. Estos son el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), el monóxido de carbono (CO) y el material particulado de 10 µm y 2,5 µm (PM10 y PM2.5), así como los compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano (COVDM), los cuales afectan directamente a la salud humana (Cuestas, *et al*, 2016).

Este estudio se centra en la contaminación por dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), ya que estos constituyen los principales causantes de la acidificación del

pH de las lluvias. Estos óxidos reaccionan con el agua de lluvia y forman los ácidos correspondientes. Las causas esenciales son las emisiones a la atmósfera de gases contaminantes, fundamentalmente de los óxidos de nitrógeno (NO), cuyas concentraciones provienen de las emisiones de los vehículos, y el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>). Las fuentes primordiales del SO<sub>2</sub> son la quema de combustible fósil y la generación de energía.

El SO<sub>2</sub> es un gas que se condensa con facilidad, es incoloro, de olor picante y más pesado que el aire; posee un elevado poder de corrosión. Químicamente puede actuar como oxidante o como reductor (con los halógenos). Alrededor del 60-70% del SO<sub>2</sub> es responsable de la deposición ácida global. Más del 90% del SO<sub>2</sub> en la atmósfera se crea a partir de actividades humanas, tales como la combustión industrial (69.4%), el transporte (3.7%), la quema de carbón (2-3%), la fundición de minerales de sulfuro de metal para obtener los metales puros (aproximadamente 14%). El 10% restante del SO<sub>2</sub> se emite a partir de erupciones volcánicas, incendios forestales, rocío marino, vegetación podrida, plancton, descomposición orgánica, entre otros. (Hayas Barrú A. , 1991).

Las concentraciones más altas de SO<sub>2</sub> se registran en un radio menor a 20 km de la fuente de emisión. Esto guarda relación con la acidificación del pH de la lluvia porque la oxidación del SO<sub>2</sub> a SO<sub>3</sub> en presencia del ozono (O<sub>3</sub>) se produce de forma natural en las capas altas de la tropósfera. Al reaccionar con el agua presente en las nubes, el SO<sub>3</sub> produce ácido sulfúrico que disminuye el pH del agua y precipita en forma de lluvias ácidas.

El NO<sub>2</sub> es un gas altamente oxidante que se forma como resultado de la oxidación del NO. En condiciones normales, estos gases son de color pardo que se va intensificando a medida que aumenta la temperatura. La mayor parte de las emisiones de NO son causadas por actividades humanas, como son las reacciones químicas en la producción de fertilizantes, la combustión de combustibles, las emisiones del transporte automotor, entre otros. Aunque en menor medida se emite por incendios forestales, vegetación podrida, acción bacteriana en el suelo, acción volcánica, rayos, y otros.

La formación de NO<sub>2</sub> en la atmósfera resulta de la oxidación del NO. De forma natural, el NO<sub>2</sub> se forma por la actividad eléctrica atmosférica, volcánica y bacteriana. Su permanencia en la atmósfera es de un día. Es un gas altamente nocivo en presencia de luz solar puede disociarse en NO y O, donde el oxígeno atómico reacciona con el molecular y da lugar a la formación de ozono (O<sub>3</sub>). Pero si reacciona con el radical OH produce moléculas de ácido nitroso (HNO<sub>3</sub>), las cuales se dispersan en el ambiente en forma de lluvia, llovizna y rocío, dando lugar procesos de acidificación.

Las emisiones de contaminantes en la capital generalmente son de origen antrópico, ya que provienen casi en su totalidad del transporte automotor y las emisiones industriales. Dada una fuente de intensidad fija, las condiciones meteorológicas de la zona y su variación en tiempo y espacio son un factor fundamental a la hora de analizar la dispersión de los contaminantes en dicha zona. Por tanto, existe una estrecha relación entre las situaciones meteorológicas y los niveles de contaminación alcanzados en un momento determinado. Estas situaciones están determinadas por variables meteorológicas tales como presión, temperatura, dirección y velocidad del viento, y otras. Pero desde el punto de vista de la contaminación, los factores que influyen directamente en la dispersión de dichos contaminantes son el viento, la estabilidad térmica vertical y la precipitación.

El viento es el movimiento del aire en sentido horizontal, mientras que el flujo de aire en sentido vertical es el flujo conectivo y está estrechamente relacionado con la estratificación térmica de la atmósfera. La velocidad del viento afecta en gran medida la concentración de contaminantes en un área, ya que mientras mayor sea su velocidad, menor será la concentración de contaminantes, dado el viento diluye y dispersa los contaminantes en un área circundante.

Las precipitaciones tienen un efecto beneficioso porque lavan las partículas contaminantes del aire y ayudan a minimizar las partículas provenientes de actividades como la construcción y algunos procesos industriales.

La estabilidad térmica vertical está dada cuando una masa de aire se eleva por cualquier causa y sufre un enfriamiento por expansión adiabática de volumen. Si se compara la curva de temperatura de un radio sondeo con el gradiente adiabático ( $=^{\circ}\text{C}/100\text{M}$ ) se puede saber el tipo de estratificación y si existe flujo conectivo que posibilita la dispersión vertical de cualquier contaminante. Si la temperatura en las capas bajas de la atmósfera disminuye con la altura en una cantidad superior a  $1^{\circ}\text{C}$  por cada 100m, la atmósfera es inestable y favorece los movimientos verticales.

En esta investigación, se tomó el paso de sistemas frontales como situación meteorológica a analizar. Un frente atmosférico es la frontera entre dos masas de aire de diferentes temperaturas y densidades, que no pueden mezclarse de forma inmediata debido a la diferencia de densidades; en lugar de mezclarse la masa más ligera y cálida comienza a ascender por encima de la masa fría y densa, y el frente se encuentra en la transición de ambas. Los sistemas frontales siempre están acompañados por nubes de todo tipo.

Los frentes fríos son los sistemas sinópticos que afectan a Cuba en el denominado período seco o temporada invernal. Al desplazarse los frentes fríos sobre Cuba, se imponen

vientos de región N y ocurren lluvias y chubascos que en ocasiones alcanzan valores significativos de precipitación, creando una situación de inestabilidad atmosférica.

La temporada invernal se extiende desde octubre, mes en el cual comienzan a desplazarse sobre el Golfo de México los frentes fríos que nos afectan, hasta abril; aunque Cuba ha sido afectada por frentes fríos en los meses de septiembre, mayo y, en número menor, en junio.

En Cuba los frentes fríos se clasifican por tipos e intensidades, considerando el campo de viento asociado, representativo para delimitar la discontinuidad en la zona frontal. Por su tipo pueden ser: clásicos, revésinos y secundarios. Y por sus intensidades: débiles, moderados y fuertes.

Los frentes fríos débiles son los que producen vientos con velocidades que no pasan de 35 km/h. Los moderados son aquellos frentes que producen vientos entre 36 y 55 km/h. Y los fuertes son los que producen vientos con velocidades superiores a los 55 km/h. (González Pedroso, 2010).

El término lluvia ácida fue utilizado por primera vez por Robert Angus Smith, quien investigaba la química del aire en las industrias británicas en 1850 (Granados, López, & Hernández, 2010). La terminología más adecuada para esta forma de contaminación es deposición ácida, porque la acidez puede ser liberada como gas o como polvo por medio de la lluvia (Hendrey & Vertucci, 1980) y (Torres, 1999). La deposición es el fenómeno de caída de partículas sólidas o líquidas, por la acción de la gravedad y puede ocurrir por dos vías: la deposición seca (partículas sólidas) y la deposición húmeda, llamada lluvia ácida. Estos son los mecanismos por los cuales tanto los gases traza (de muy bajas concentraciones) como las partículas son eliminados de la atmósfera. La deposición seca opera de forma lenta pero continua, mientras que la deposición húmeda sucede episódicamente en eventos de precipitación (Granados, López, & Hernández, 2010).

La lluvia ácida puede ser causada por las emisiones de fuentes naturales, como los volcanes; sin embargo, la principal causa es la liberación de dióxido de azufre y óxido de nitrógeno, durante la combustión de combustibles fósiles. Cuando estos gases se descargan en la atmósfera, reaccionan con el agua, el oxígeno y otros gases, ya presentes en la misma, para formar ácido sulfúrico y ácido nítrico. Estos ácidos luego se dispersan sobre grandes áreas, debido a los patrones de viento, y caen de nuevo al suelo como lluvia ácida u otras formas de precipitación.

La lluvia ácida está caracterizada por tener un pH menor al de la lluvia en su estado natural; es considerada como una sustancia ácida, ya que tiene un pH alrededor de 5.6. La acidez natural del agua de lluvia se genera por el equilibrio existente entre el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en el aire y el ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), formado en el agua por disolución del  $\text{CO}_2$ .

La clasificación de la acidificación de la lluvia se realiza según su pH (Barreto Pedraza, 2019), como se muestra en la tabla 1.

**Tabla 1.** Clasificación del agua lluvia de acuerdo con el pH.

**Table 1.** Rainwater classification according to Ph.

pH	Clasificación de la lluvia
pH > 5,6	Lluvia no ácida
4,7 < pH ≤ 5,6	Lluvia ligeramente ácida
4,3 < pH ≤ 4,7	Lluvia medianamente ácida
pH ≤ 4,3	Lluvia fuertemente ácida

## Materiales y Métodos

Se utilizaron los datos de cronología de frentes fríos de 1916 a 2017, con sus clasificaciones, y los datos trihorarios de las variables del estado del tiempo de la estación de Casablanca, correspondientes al período de 2001 a 2021.

Asimismo, se usaron los datos trihorarios de dirección y velocidad del viento de la estación de Casablanca, correspondientes al período de 1994 a 2001.

Los datos de mediciones de concentraciones anuales de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), y los datos anuales de mediciones del pH de la lluvia, utilizados en el presente trabajo fueron obtenidos a través de la Oficina Nacional de Estadística e Información de la República de Cuba.

Mediante un programa en FORTRAN, elaborado en el Departamento de Procesos Físicos del Instituto de Ciencias del Mar, se obtuvieron las componentes meridional y zonal del viento, a partir de los datos trihorarios de la dirección y velocidad del viento correspondientes al período de 1994 a 2020.

Se utilizó Excel para hallar los valores promedios anuales de las componentes zonal y meridional del viento del período, y para hacer la correlación entre estos y los datos

disponibles de las concentraciones anuales de SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub>, así como para obtener la información necesaria para calcular los coeficientes de determinación.

Las tablas de pH de la lluvia, de concentración de SO<sub>2</sub> y de NO<sub>2</sub>, se hicieron en Word.

## Resultados y Discusión

Durante el período de 1994 a 2020, la estación de monitoreo de Casablanca registró las concentraciones de estos contaminantes. La tabla 2 muestra la concentración anual de SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub> (Oficina Nacional de Estadística e Información de la República de Cuba, 2022).

Durante el período de 1990 a 2020, La Habana fue afectada por un total de 569 frentes fríos, de los cuales 370 fueron débiles, 194 moderados y 5 fuertes. La temporada con mayor actividad fue la del 2008-2009, y las menos activas fueron las de 1996-1997 y 2017-2018, como se puede ver en la tabla 3.

La mayoría de los frentes que han afectado la zona en este período son débiles y, en menor medida moderados, siendo muy raro el paso de frentes de una fuerte intensidad. La temporada de 1995 a 1996 se considera la más fría por el paso de un total de 24 frentes, de los cuales dos fueron fuertes.

En la tabla 4, se muestran los valores del pH anual de las lluvias en la ciudad de La Habana. Se puede concluir que el valor mínimo promedio del pH de la lluvia en el período comprendido entre 1994 y 2020, en ausencia de los años entre 2006 y 2009 por falta de mediciones, es de 4,9; por lo que las lluvias en este período se pueden clasificar como lluvias ligeramente ácidas, pero en mayor medida los valores de promedio anuales registran lluvias no ácidas (Barreto Pedraza, 2019).

De acuerdo a los valores del coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>), no se obtuvo correlación entre los valores promedio anuales de SO<sub>2</sub> y la componente zonal del viento, ni entre

**Tabla 2.** Concentración anual de SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub> registrados en la estación de monitoreo de Casablanca.

**Table 2.** Annual concentration of SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> registered by Casablanca weather station.

Año	Concentración de SO <sub>2</sub>	Concentración de NO <sub>2</sub>	Año	Concentración de SO <sub>2</sub>	Concentración de NO <sub>2</sub>
1994	0.5	4.9	2004	-	11.6
1995	0.6	4.7	2005	-	16.1
1996	0.4	7.9	2014	0.5	0.9
1997	0.9	3.0	2015	-	2.1
1998	0.8	4.3	2016	1.3	4.1
1999	0.9	2.8	2017	0.4	1.6
2000	0.3	0.9	2018	0.2	1.0
2001	0.3	5.2	2019	0.1	3.1
2002	-	4.7	2020	0.2	3.8
2003	-	4.8			

**Tabla 3.** Intensidad de los frentes que han pasado por La Habana por temporada desde 1990 a 2020 (Elaboración propia).

**Table 3.** Intensity of the frontal systems that affected Havana each season from 1990 to 2020 (prepared by the authors).

Temporada	Total	Débiles	Moderados	Fuertes
1990-1991	18	12	6	-
1991-1992	21	16	4	1
1992-1993	25	21	3	1
1993-1994	21	15	6	-
1994-1995	21	16	5	-
1995-1996	24	7	15	2
1996-1997	11	5	6	-
1997-1998	26	16	10	-
1998-1999	15	11	4	-
1999-2000	16	14	2	-
2000-2001	19	13	6	-
2001-2002	13	9	4	-
2002-2003	21	13	8	-
2003-2004	21	14	7	-
2004-2005	23	17	6	-
2005-2006	17	6	11	-
2006-2007	20	15	5	-
2007-2008	17	8	9	-
2008-2009	27	20	7	-
2009-2010	25	19	6	-
2010-2011	17	14	3	-
2011-2012	14	10	4	-
2012-2013	16	11	5	-
2013-2014	22	10	12	-
2014-2015	21	11	10	-
2015-2016	16	6	10	-
2016-2017	15	9	6	-
2017-2018	11	8	3	-
2018-2019	18	9	8	1
2019-2020	18	15	3	-

estos valores de SO<sub>2</sub> y la componente meridional del viento (Figuras 1 y 2).

De acuerdo a los valores de R<sup>2</sup>, no se obtuvo correlación entre los valores promedios anuales de NO<sub>2</sub> y la componente zonal del viento, ni entre estos valores de NO<sub>2</sub> y la componente meridional del viento (Figuras 3 y 4).

Se correlacionaron los valores promedios anuales del pH de la lluvia del período de 1994 a 2020 con los valores promedios de las componente zonal y meridional. En ambos casos los valores de R<sup>2</sup> resultaron no significativos (Figuras 5 y 6).

A pesar de los resultados anteriormente comentados, se pudo apreciar que en los últimos cinco años del período analizado se obtuvieron valores significativos de R<sup>2</sup> en algunos casos. Por ello, se correlacionaron los valores promedios anuales de SO<sub>2</sub> de los últimos cinco años

consecutivos de la serie con los valores promedios anuales correspondientes de la componente zonal y se obtuvo un valor significativo de R<sup>2</sup> (Figura 7).

La correlación de los mismos valores de SO<sub>2</sub> y la componente meridional del viento arrojó un resultado no significativo de R<sup>2</sup>, en el que influyó un valor anómalo que no coincidió con la pauta de los últimos cinco años (Figura 8).

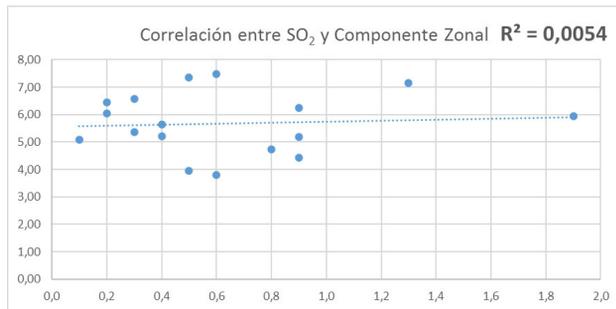
Se correlacionó los últimos cinco años consecutivos, de 2016 a 2020, de los valores promedios anuales del pH de la lluvia con la componente zonal del viento y resultó un valor significativo de R<sup>2</sup> (Figura 9).

Los resultados obtenidos de la correlación entre los valores promedios anuales del pH de la lluvia y la componente meridional del viento del 2016 al 2020 fueron positivos, aunque no significativos (Figura 10).

**Tabla 4.** Promedio anual del pH de la lluvia.

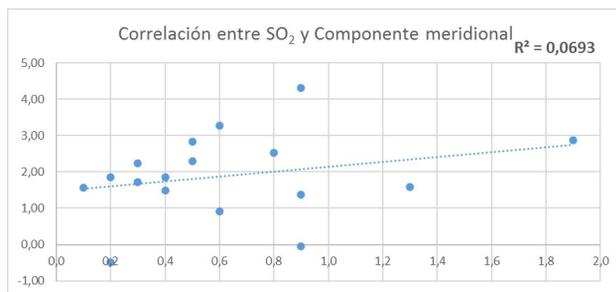
**Table 4.** Rainwater pH annual average.

Año	pH de la lluvia	Año	pH de la lluvia
1994	4.9	2008	-
1995	5.4	2009	-
1996	5.6	2010	5.5
1997	5.8	2011	6.2
1998	5.3	2012	5.7
1999	5.4	2013	5.9
2000	5.6	2014	5.4
2001	5.3	2015	5.6
2002	5.1	2016	6.0
2003	5.8	2017	6.4
2004	5.3	2018	5.8
2005	6.2	2019	6.6
2006	-	2020	6.5
2007	-		



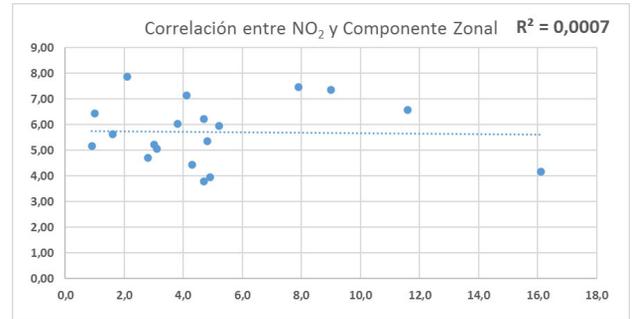
**Figura 1.** Correlación entre los valores promedios anuales de  $SO_2$  y la componente zonal del viento

**Figure 1.** Correlation between  $SO_2$  annual average values and zonal wind component.



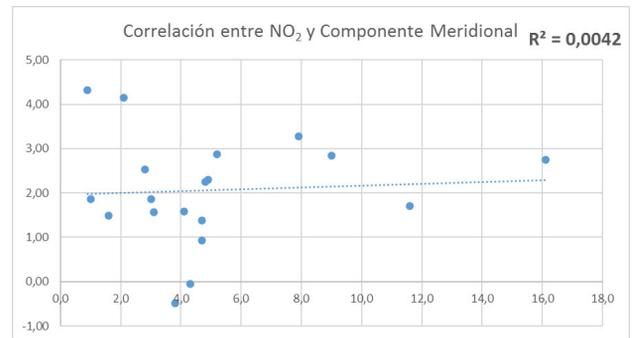
**Figura 2.** Correlación entre los valores promedios anuales de  $SO_2$  y la componente meridional del viento.

**Figure 2.** Correlation between  $SO_2$  annual average values and meridional wind component.



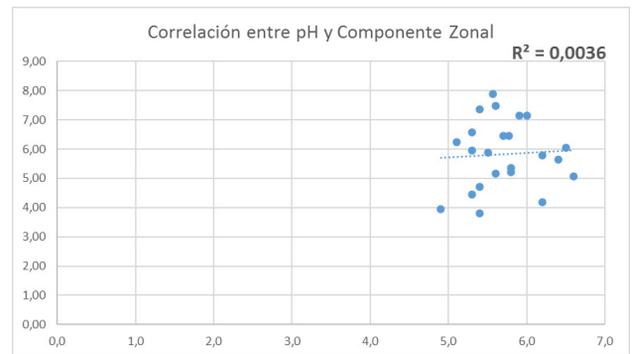
**Figura 3.** Correlación entre los valores promedios anuales de  $NO_2$  y la componente zonal del viento.

**Figure 3.** Correlation between  $NO_2$  annual average values and zonal wind component.



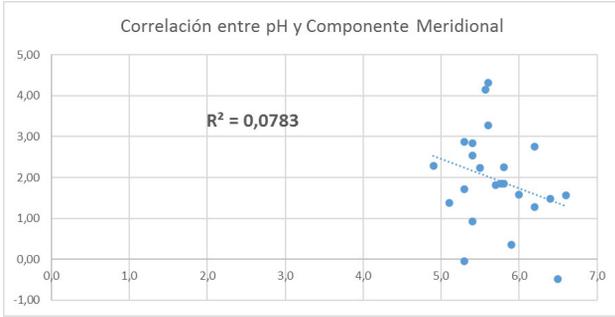
**Figura 4.** Correlación entre los valores promedios anuales de  $NO_2$  y la componente meridional del viento.

**Figure 4.** Correlation between  $NO_2$  annual average values and meridional wind component.



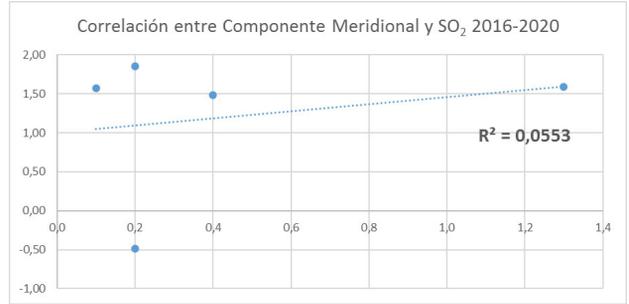
**Figura 5.** Correlación entre los valores promedios anuales de pH de la lluvia y la componente zonal del viento.

**Figure 5.** Correlation between rainwater pH annual average values and zonal wind component.



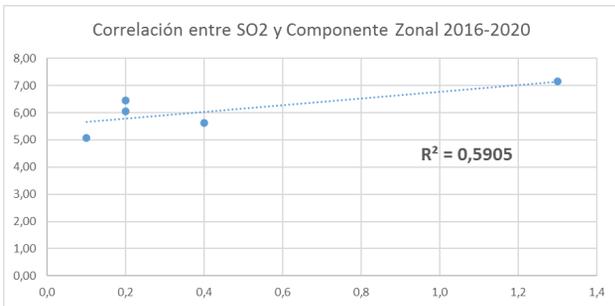
**Figura 6.** Correlación entre los valores promedios anuales de pH de la lluvia y la componente meridional del viento.

*Figure 6. Correlation between rainwater pH annual average values and meridional wind component.*



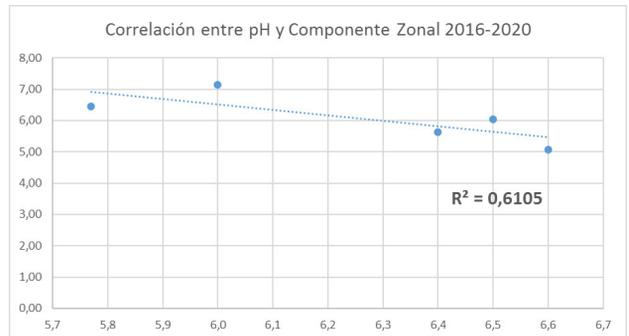
**Figura 8.** Correlación entre los valores promedios anuales de SO<sub>2</sub> y la componente meridional del viento del 2016 al 2020.

*Figure 8. Correlation between SO<sub>2</sub> annual average values and meridional wind component from 2016 to 2020.*



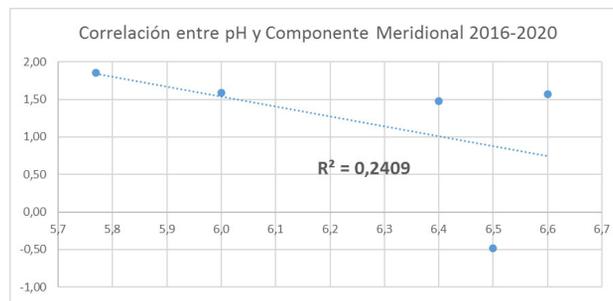
**Figura 7.** Correlación entre los valores promedios anuales de SO<sub>2</sub> y la componente zonal del viento del 2016 al 2020.

*Figure 7. Correlation between SO<sub>2</sub> annual average values and zonal wind component from 2016 to 2020.*



**Figura 9.** Correlación entre los valores promedios anuales de pH de la lluvia y la componente zonal del viento del 2016 al 2020.

*Figure 9. Correlation between rainwater pH annual average values and zonal wind component from 2016 to 2020.*



**Figura 10.** Correlación entre los valores promedios anuales del pH de la lluvia y la componente meridional del viento del 2016 al 2020.

*Figure 10. Correlation between rainwater pH annual average values and meridional wind component from 2016 to 2020.*

### Conclusiones

La correlación entre los valores anuales promedios de SO<sub>2</sub> y la componente zonal del viento arrojó resultados significativos de R<sup>2</sup> sólo cuando se tomaron los últimos cinco años, período que coincidió con una temporada de pocos frentes tanto en cantidad como en intensidad. Sucedió de igual manera al hacer una correlación de los valores promedios anuales del pH de la lluvia en esos últimos cinco

años con la componente zonal del viento. Esto indica una posible relación entre la componente zonal del viento, la dispersión del SO<sub>2</sub> y la acidificación del pH de la lluvia.

Existe una relación entre la dispersión de contaminantes y las variables meteorológicas, siendo las principales el viento y la inestabilidad atmosférica. Por otro parte, la lluvia contribuye a regularlas.

Con los datos que se disponen no es posible aun probar la relación entre la dispersión de los contaminantes y los

sistemas frontales ya que, aunque los frentes están acompañados de inestabilidad, la lluvia contribuye a minimizar la concentración de contaminantes.

### Recomendaciones

Se recomienda seguir investigando este tema y, de ser posible, utilizar datos de valores promedios mensuales.

Igualmente, se recomienda verificar la correlación existente entre los resultados significativos obtenidos entre los valores promedios anuales de SO<sub>2</sub> y la componente zonal del viento de 2016 a 2020 y la correlación entre los valores promedios anuales del pH de la lluvia y la componente zonal del viento.

### Agradecimientos

Agradecemos a la Dra. Rosemary López Lee, al Lic. Carlos Manuel González Ramírez, al Dr. Marcelino Hernández González y a la Lic. Martha María Rivero Fernández, por el apoyo brindado en la realización de este trabajo

### Bibliografía

- Barreto Pedraza, L. R. (2019). Algunos elementos básicos sobre la lluvia ácida. Retrieved from ideam.gov.co: <http://www.ideam.gov.com>.
- Carmona Tamayo, E., & Izquierdo Ferrer, L. (15 de Noviembre de 2019). La Habana en el corazón de la economía cubana: Cinco puntos clave. *Cubadebate*.
- Cuestas-Santos, O. A., Collazo Aranda, A., González Jaime, Y., Carrillo Vitale, E., Sosa Pérez, C., Sánchez Navarro, P., López Lee, R. (2016). Análisis de las emisiones atmosféricas de las fuentes fijas de La Habana. *Revista Cubana de Meteorología*, 13.
- González Pedroso, C. (2010). Conferencias de Meteorología Sinóptica. La Habana.
- Granados, D., López, G. F., & Hernández, M. (2010). La lluvia ácida y los ecosistemas forestales. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 15.
- Hayas Barrú, A. (1991). Meteorología y contaminación atmosférica. Peculiaridades de la zona urbana de Jaén. *Dialnet*, 16.
- Hendrey, G., & Vertucci, F. (1980). Benthic plant communities in acid Lake Colden, New York; Sphagnum and the algal mat; in *Ecological Impact of Acid Precipitation*. *Diablos & A.Tollan, SNSF*, 267.
- López Cabrera, C. M. (1978). *Factores meteorológicos en la propagación de contaminantes del aire en La ciudad de La Habana*. La Habana, Cuba: Informe Científico - Técnico No. 46. Editorial Academia.
- López Cabrera, C. M. (2006). Introducción a la gestión de la calidad del aire. La Habana.
- Oficina Nacional de Estadística e Información de la República de Cuba. (15 de octubre de 2022). Obtenido de [www.onei.gob.cu](http://www.onei.gob.cu)
- Ordoñez-Sánchez, Y., Reinos-Valladares, M., Hernández-Garcés, A., & Canciano-Fernández, J. (2018). Aplicación de modelos simplificados para la dispersión de contaminantes atmosféricos. Caso de estudio. *Revista Cubana de Química*, 18.
- Red latinoamericana de gerontología. (2022, agosto 11). Obtenido Red de latinoamericana de gerontología web site: <http://www.gerontologia.org.com>
- Navarro, P., & Cuesta Santos, O. (1992). Smog en la Ciudad de La Habana. Situación meteorológica asociada. *Revista Cubana de Meteorología*, 8.
- Torres, A. (1999). *Lluvia ácida. Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación, Red Automática de Monitoreo Atmosférico r.a.ma*. Secretaría del Medio Ambiente de México.
- Vidal-Ros, I., López-Lee, R., Cuesta-Santos, O. A., Bofulé-Torres, J., & García-Valdés, E. (2018). Condiciones meteorológicas que influyen en las inmisiones de contaminantes atmosféricos en dos localidades de La Habana. *Revista Cubana de Meteorología*, 14

**Conflicto de Intereses:** Los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses

**Contribución de autoría: Concepción de la idea:** Esmeralda González Suárez, Isabel Lázara Hernández Rivero. **Manejo de los datos:** Isabel Lázara Hernández Rivero, Carlos Manuel González Ramírez. **Análisis de los datos:** Isabel Lázara Hernández Rivero. **Investigación:** Esmeralda González Suárez, Isabel Lázara Hernández Rivero. **Metodología:** Esmeralda González Suárez, Isabel Lázara Hernández Rivero. **Redacción- primera redacción:** Esmeralda González Suárez, Isabel Lázara Hernández Rivero. **Software:** Isabel Lázara Hernández Rivero. **Supervisión:** Carlos Manuel González Ramírez, Rosemary López Lee. **Validación de los resultados:** Carlos Manuel González Ramírez, Rosemary López Lee Redacción- revisión y edición: Esmeralda González Suárez, Isabel Lázara Hernández Rivero, Carlos Manuel González Ramírez.