

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FQF
Facultad de
Química y Farmacia

Departamento de Química

TRABAJO DE DIPLOMA

Medición de las concentraciones de PM_{2.5} y PM₁₀ con el sensor OPC-N3 en diferentes ambientes exteriores de la ciudad de Santa Clara

Autor: Jessica Valero Acosta

Tutores: Dra. Daniellys Alejo Sánchez

Santa Clara, noviembre 2021
Copyright©UCLV

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FQF
Facultad de
Química y Farmacia

Department of Chemistry

DIPLOMA THESIS

BACHELOR THESIS

Measurement of PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations with the
OPC-N3 sensor in different outdoor environments of the city of
Santa Clara

Author: Jessica Valero Acosta

Advisers : Dra. Daniellys Alejo Sánchez

Santa Clara, november 2021
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubián” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419



Pensamiento

"Nada en este mundo debe ser temido solo entendido"
Ahora es el momento de comprender más para temer menos...

Marie Curie



Dedicatoria

Le quiero dedicar este trabajo a todas aquellas personas que me han apoyado a lo largo de toda la carrera y que de una manera u otra lo han hecho posible.

A mis padres. que sin su amor y sacrificio nunca hubiera podido llegar hasta aquí.

A mis abuelos por su paciencia, dedicación y amor incondicional.

A mi hermana por ser una de las personas más importantes en mi vida.

A mis amigos, Dorita, Leidy, Ada, Lia, Jose por compartir conmigo estos cinco años,
apoyándome siempre.



Agradecimientos

"La gratitud es el más legítimo pago al esfuerzo ajeno, es reconocer que todo lo que somos, es la suma del sudor de los demás. Que un hombre solo no vale nada, y que la dependencia humana, además de necesaria, es hermosa".

José Martí

Quiero extender mi profundo agradecimiento a los que han hecho posible la realización de este trabajo de diploma:

A mi mamá, por ser mi guía, mi fuerza, mi inspiración, la que siempre me ha motivado a seguir adelante, por su amor incondicional.

A mi padre, por su sacrificio, por su apoyo.

A mi hermana por acompañarme.

A mis abuelos, mi ejemplo a seguir, que con su nobleza y cariño me han apoyado siempre.

A mis amigas, las mejores amigas, porque en ustedes encontré una nueva familia, por todo el tiempo que pasamos juntas, por esas risas y tristezas compartidas.

*A Jose Luis Mederos, por ser mi amigo, mi cómplice, por apoyarme
aun cuando sabias que me estaba equivocando, por ser como ese
hermanito que no tuve.*

*A mis compañeros de aula, a esa gran familia que fuimos, con
nuestras altas y bajas, pero al final siempre unidos, por todo lo vivido,
por ser el mejor grupo, pequeño, pero el mejor grupo con el que pude
haber compartido toda la carrera.*

*A mi tutora Daniellys por darme la posibilidad de superarme en el
marco de su investigación.*

*A los profesores y personal de la facultad de Química, que de una
manera u otra me ayudaron.*

A todos y cada uno de ustedes.

¡Muchas gracias!

Resumen

El PM es uno de los contaminantes identificados como “contaminante criterio” por sus conocidos impactos sobre la salud humana y el medio ambiente. En Cuba, es regulado en la NC 1020: 2014 como PM_{2.5} y PM₁₀. En los últimos años, los sensores de bajo costo se han presentado como una alternativa viable para el monitoreo de la calidad del aire. En esta investigación las concentraciones de PM_{2.5} y PM₁₀ fueron monitoreadas con el sensor OPC-N3 en tres sitios de la ciudad de Santa Clara afectados por diferentes fuentes. Los resultados obtenidos se corresponden con las características de los escenarios evaluados, registrándose los menores valores en el sitio representativo de las concentraciones de fondo y los mayores, en los otros dos con valores picos coincidentes con el evento del Sahara sucedido en el país.

Abstract

PM is one of the pollutants identified as a "criterion pollutant" due to its known impacts on human health and the environment. In Cuba, it is regulated in NC 1020: 2014 as PM_{2.5} and PM₁₀. In recent years, low-cost sensors have emerged as a viable alternative for air quality monitoring. In this investigation, the concentrations of PM_{2.5} and PM₁₀ were monitored with the OPC-N3 sensor at three sites in the city of Santa Clara affected by different sources. The results obtained correspond to the characteristics of the evaluated scenarios, registering the lowest values in the representative site of the background concentrations and the highest, in the other two with peak values coinciding with the Sahara event that occurred in the country.

ÍNDICE

Introducción.....	2
Capítulo 1. Marco teórico	6
1.1. Contaminación del aire	6
1.1.1. Origen de la contaminación del aire.....	6
1.2. Clasificación de los contaminantes atmosféricos	8
1.2.1. Material particulado. Clasificación	10
1.3. Técnicas de monitoreo de contaminantes del aire.....	13
1.3.1. Técnicas de monitoreo para PM.....	17
1.4. Efectos adversos de los contaminantes del aire.	23
1.4.1. Material particulado. Efectos adversos.....	26
1.5. Conceptos estadísticos aplicados en la investigación.....	29
1.5.2. Media móvil	31
1.5.3. Asimetría.....	32
1.5.4. Curtosis.....	33
Capítulo 2: Materiales y métodos	36
2.1. Estrategia de monitoreo.....	36
2.1.2. Condiciones climatológicas	38
2.1.3. Selección de los sitios de muestreo. Características	39
2.1.4 Selección del periodo de muestreo	39
2.2. Monitoreo de PM2.5 y PM10	39
2.3. Características del sensor OPC-N3.....	40
Capítulo 3: Análisis de los resultados	43
3.1 Sitios y periodos de muestreo seleccionados	43
3.2 Medición de PM2.5 y PM10.....	45
3.2.1 Resultado de la medición de PM2.5 y PM10	46
3.2.1.1 Sitio de muestreo UC	46
3.2.1.2 Sitio de muestreo C	48
3.2.1.3. Sitio de muestreo CESAM.....	51
CONCLUSIONES.....	55
RECOMENDACIONES	56

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....57



Introducción

Introducción

El material particulado (MP) es uno de los contaminantes atmosféricos más estudiados en el mundo, este se define como el conjunto de partículas sólidas y/o líquidas (a excepción del agua pura) presentes en suspensión en la atmósfera, que se originan a partir de una gran variedad de fuentes naturales o antropogénicas y poseen un amplio rango de propiedades morfológicas, físicas, químicas y termodinámicas [1].

La presencia en la atmósfera de este contaminante ocasiona variedad de impactos a la vegetación, materiales y el hombre, entre ellos, la disminución visual en la atmósfera, causada por la absorción y la dispersión de la luz. Además, la presencia del material particulado está asociada con el incremento del riesgo de muerte por causas cardiopulmonares , respiratorias y alérgicas en muestras de adultos [2].

Las fuentes fijas y móviles son las principales causantes de la contaminación del aire [3]. En Cuba se reportan pocos estudios acerca de la contaminación ambiental por PM encaminados a la evaluación de la calidad del aire en ambientes exteriores, así como al estudio de fuentes de contaminación [4-6].

Por ello es necesario realizar mediciones de la concentración de este contaminante, evaluar su comportamiento en el espacio y el tiempo, asociándolo con los fenómenos meteorológicos, composición química y origen, los cuales permitan orientar estrategias de control y realizar seguimiento por parte de las autoridades ambientales interesadas.

La principal limitación para la investigación de este contaminante está relacionada con el equipamiento para la toma y recolección de la muestra y es aquí donde se muestran los sensores como una alternativa cuyo funcionamiento es simple y su costo es bajo si se compara con los otros métodos de muestreo reportados en la literatura.

Los sensores se presentan como una herramienta de alta utilidad en el diseño de sistemas de control y monitoreo, ya que pueden ser colocados en el sitio donde se está produciendo la contaminación generando lecturas en tiempo real permitiendo de esta manera una evaluación inmediata de la problemática existente.

En los momentos actuales existen una alta variedad de sensores que se utilizan en la medición de los contaminantes atmosféricos. Van desde precios muy elevados, como los que se emplean en las estaciones de monitoreo hasta una gama más baja de precios donde se sitúan los sensores de bajo costo. Estos últimos poseen una mayor producción, destacándose el elevado número de fabricantes.

En la ciudad de Santa Clara, a pesar de existir zonas afectadas por la emisión de PM generado por fuentes fijas y móviles no se realizan estudios que comprendan este contaminante por las limitaciones con el equipamiento de muestreo, de ahí que en el marco del desarrollo del proyecto internacional "AIR@PORT: Low-cost decision support system to evaluate the impact of ships on the air quality in the port city Cienfuegos surge la idea de evaluar este contaminante con el uso de sensores de bajo costo. Por esta razón, el **objetivo general** de esta investigación es: medir la concentración de PM_{2.5} y PM₁₀ con el sensor OPC-N3 en diferentes ambientes exteriores de la ciudad de Santa Clara.

Para dar cumplimiento a este objetivo general se plantean los siguientes **objetivos específicos**:

- ✓ Seleccionar los sitios de muestreo para medir la concentración de PM_{2.5} y PM₁₀.
- ✓ Seleccionar los periodos de muestreo.

- ✓ Medir la concentración de PM2.5 y PM10 en los sitios seleccionados.



Marco teórico

Capítulo 1. Marco teórico

1.1. Contaminación del aire

Aunque no se vea, existen muchos contaminantes atmosféricos químicos con distintas repercusiones en la atmósfera y en la salud humana. Al día se inhalan unos 8000 litros de aire (o más en condiciones de trabajo físico fuerte, unos 10000 litro) y con ellos un cóctel de agentes nocivos en forma de gases, vapores y partículas en suspensión [3].

1.1.1. Origen de la contaminación del aire.

La contaminación atmosférica es una de las formas principales en que puede ser degradado o afectado parte del ambiente. Según su origen, puede ser clasificada por causas naturales o antropogénicas. Las naturales siempre han existido, mientras que las antropogénicas, como su nombre lo indica, son causadas por las actividades humanas [7].

Las fuentes naturales son factores que contaminan independientemente de las actividades humanas, como los vientos que producen polvaredas, las erupciones volcánicas, la erosión del suelo, los incendios forestales, etc [8].

El aire siempre porta contaminantes naturales como polen, esporas, moho, levaduras, hongos y bacterias; los incendios forestales, los vendavales, las erupciones volcánicas y las sequías producen humo, aerosoles y otros contaminantes que entran al aire. Con todo, la contaminación que surge de la naturaleza cuenta poco comparada con los efectos de los contaminantes asociados con las actividades humanas [7].

En cuanto a las fuentes artificiales, se conoce que el dominio del fuego favoreció la evolución de los homínidos, pero ese gran salto en la lucha por la supervivencia es

considerado por algunos como el origen de la contaminación atmosférica antropogénica [9].

El hacinamiento, el humo y los malos olores condicionaron la vida del hombre primitivo en el interior de las cavernas. El empleo de este elemento permitió a los humanos realizar numerosas actividades domésticas (cocinar, calentarse, producir luz), colonizar ambientes fríos, defenderse, pintar, adquirir recursos del entorno, entre otras acciones. Esto facilitó también la alteración de la estructura de la vegetación, al emplearla como combustible, y del régimen natural de los incendios forestales. Posteriormente, la llegada de la agricultura facilitó la sedentarización del hombre y la formación de comunidades que fueron creciendo progresivamente. Esto supuso el agotamiento local de la madera y la consiguiente búsqueda de combustibles alternativos, como el carbón [3].

La llegada de la revolución industrial marcó un dramático y decisivo punto entre la actividad económica y el medio ambiente. Los requerimientos de energía de una tecnología basada en el hierro y el acero, condujeron a la contaminación del aire más generalizada [10].

También el desarrollo tecnológico provocó un aumento, sobre todo por el uso del carbón como forma primordial de energía y por los propios contaminantes tóxicos que generaban las fábricas. Las industrias se situaban, por lo general, en el interior de los núcleos de población, con lo que sus emisiones se sumaban a las domésticas. Así se comenzaron a registrar localmente niveles elevados de sustancias que originaron los primeros episodios graves para la salud, el deterioro de las construcciones, la pérdida de la visibilidad y el efecto de la contaminación en la vegetación. Es evidente que la

economía crecía, pero a costa de la destrucción del medio ambiente y del malestar de la población [3].

El continuo desarrollo industrial y la invención del automóvil, unidos a la escasa eficacia de la política de control de emisiones, siguieron agravando los problemas ambientales en el siglo XX. La mejora en el transporte facilitó el crecimiento y la expansión de las urbes, concentrando grandes poblaciones en territorios relativamente pequeños. El progreso tecnológico de este periodo se logró con un impacto significativo en el medio ambiente y en la salud humana.

En la actualidad se reconoce que la contaminación atmosférica, que no entiende de fronteras, se ha convertido en un problema de dimensión mundial. La ciencia ha mostrado que la deficiente calidad del aire puede ocasionar graves consecuencias para el medio ambiente y para la salud [10].

El crecimiento económico y la urbanización, asociados al desarrollo de diversas actividades como la industria petrolera, los servicios, la agroindustria y el incremento de las unidades automotoras, traen como resultado un consumo intenso de combustibles fósiles; al mismo tiempo, la práctica de actividades agropecuarias no apropiadas inciden en la generación de elevados volúmenes de contaminantes, que al relacionarse con las condiciones atmosféricas dañan la salud humana, los ecosistemas y los recursos materiales [11].

1.2. Clasificación de los contaminantes atmosféricos

Los contaminantes atmosféricos son partículas sólidas o líquidas, vapores y gases, contenidos en la atmósfera, que no forman parte de la composición normal de aire, o

que están presentes en cantidades tales que afectan al bienestar, salud y confort de las personas y al uso y disfrute de sus bienes [10].

Según sea el origen de los contaminantes, éstos pueden clasificarse en dos grandes grupos, los primarios y los secundarios [12].

Los contaminantes primarios proceden directamente de las fuentes de emisión, tal es el caso de los Óxidos de carbono (CO), los compuestos nitrogenados (NO_x, NH₃, N₂O), los compuestos azufrados (SO_x), el material particulado (PM, del inglés **P**articulate **M**atter), los hidrocarburos y los metales [13, 14].

Los contaminantes secundarios son aquellos que se originan en el aire a raíz de reacciones químicas que pueden ocurrir entre dos o más contaminantes primarios, o entre contaminantes primarios y elementos propios de la atmósfera. Ejemplo, el ozono (O₃), los hidrocarburos oxidados, los aerosoles orgánicos secundarios, los sulfatos, los nitratos y el material particulado secundario [13].

En el planeta los contaminantes atmosféricos que más preocupan por encontrarse durante varios días al año por encima de las normas de salud son el ozono y las partículas suspendidas menores a 10 micrómetro. Dentro de estas últimas se encuentran las partículas menores a 2.5 micrómetros [3, 10].

Las partículas y gases descargados a la atmósfera pueden tener diferente comportamiento [9]:

- Desplazamiento en el sentido de la dirección del viento con difusión progresiva lateral y vertical.

- Transformación física y química de los contaminantes primarios dando origen a otros más tóxicos (contaminantes secundarios) por la acción fotoquímica de la fracción ultravioleta de la luz.
- Eliminación de la atmósfera por diversos procesos naturales.

La Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) ha identificado seis contaminantes criterio como contaminantes de preocupación debido a sus impactos en la salud y el medio ambiente. Los contaminantes criterio son: (O_3), (PM), el monóxido de carbono (CO), (NO_2), (SO_2) y el plomo (Pb). Bajo la Ley de Aire Limpio, la EPA ha establecido Estándares Nacionales de Calidad del Aire Ambiental primarios y secundarios para estos seis contaminantes [14].

Los estándares primarios están diseñados para proteger la salud pública, especialmente las poblaciones sensibles mientras que, los estándares secundarios están diseñados para proteger el bienestar público que incluye el medio ambiente [15].

1.2.1. Material particulado. Clasificación.

El material particulado o, más apropiadamente, el aerosol atmosférico es actualmente un tema de extensa investigación, aunque fue solo a principios de los años 80 cuando el tema comenzó a recibir una mayor atención por parte de la comunidad científica atmosférica. Los aerosoles atmosféricos afectan la calidad del aire y, a su vez, el bienestar humano y del ecosistema y también tienen un papel importante en el sistema climático de la Tierra [16].

Son partículas en fase sólida o líquida que están dispersos en el aire. Se originan por fuentes naturales como polvos arrastrados por el viento, cenizas volcánicas, incendios forestales, sal marina y polen; y por fuentes antropogénicas como plantas de

generación de energía térmica, la industria, las instalaciones comerciales y residenciales y los vehículos automotores que utilizan combustibles fósiles [8]

El material particulado atmosférico se puede clasificar en diversos tipos atendiendo a varios criterios:

- Granulometría. El PM se separa, principalmente, en partículas ultrafinas, partículas finas (PM_{2.5}) y partículas gruesas (PM₁₀).
- Tiempo de residencia en la atmósfera. Dependiendo de sus características, el PM permanece mayor o menor tiempo en suspensión en la atmósfera.
- Mecanismo de formación. Se clasifica en partículas primarias o partículas secundarias.
- Naturaleza o composición. El PM puede estar formado por distintos compuestos químicos, dependiendo de la fuente de procedencia.
- Origen. Puede ser de origen natural o antropogénico.

En la Figura 1 se muestra la comparación del tamaño de las partículas de PM con el cabello humano y con un grano de arena fina de playa, en promedio el cabello humano mide 70 μm de diámetro, lo que lo hace 30 veces más grande que la partícula fina más grande.

Para el estudio de la calidad del aire, las partículas se clasifican en fracciones granulométricas: PTS, PM_{2.5}, PM₁₀. El término PTS se refiere a las Partículas en Suspensión Totales, mientras que los términos PM₁₀, PM_{2.5} corresponden a las partículas con diámetro inferior a 10 y 2.5 μm , respectivamente. Concretamente se definen, como la masa de partículas que atraviesa un cabezal de tamaño selectivo para un diámetro aerodinámico de 10 y 2.5 μm , respectivamente, con una eficiencia de corte del 50 % [17].

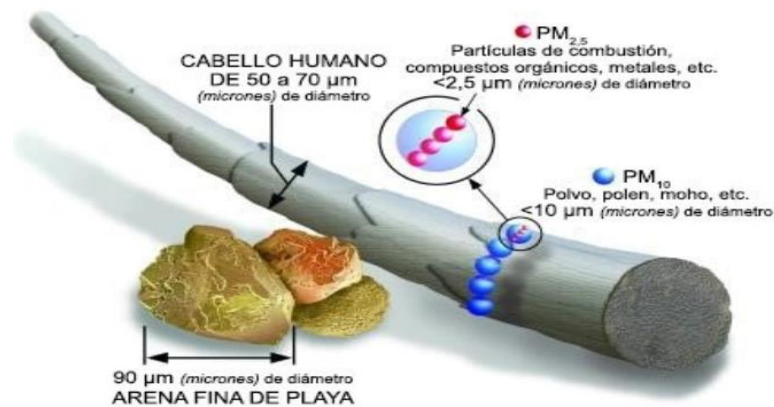


Figura 1.1. Comparación del tamaño de las partículas de PM con el cabello humano y con un grano de arena fina de playa.

Como se ha indicado anteriormente, el material particulado se clasifica, según su génesis, en partículas primarias y secundarias.

La mayor parte de las partículas más gruesas PM₁₀, tienen su origen en partículas primarias que provienen de emisiones a la atmósfera de causas naturales o humanas. Se forman básicamente por disgregación de partículas de mayor tamaño por procesos de rotura, molturación y abrasión y por procesos de evaporación [17]. Estas partículas suelen pertenecer a la parte superficial del suelo y las rocas y tras ir afinándose y disminuyendo su tamaño son levantadas por el viento, introduciéndose a la atmósfera [1].

Se asocian generalmente a la combustión no controlada, algunas están relacionadas con la desintegración mecánica de la materia o la re-suspensión de partículas en el ambiente esto incluye procesos de combustión en vehículos, principalmente aquellos que usan diésel, industrias de fundición, pinturas, cerámica y plantas de energía [18].

Como principales fuentes naturales de partículas primarias se destacan las emisiones fugitivas de los suelos, los aportes procedentes de transportes a larga distancia, el aerosol marino procedente de la superficie de mares y océanos y fuentes biogénicas. Las emisiones volcánicas también son una fuente de partículas primarias, aunque su contribución a los niveles de material particulado atmosférico no es significativa, pues están limitadas en el tiempo y el espacio [19].

Tanto las partículas gruesas como las partículas finas (PM_{2.5}) pueden ser primarias, sin embargo, de manera general se considera que las partículas finas son mayoritariamente secundarias.

Las partículas secundarias se forman por procesos de nucleación de especies gaseosas, por condensación, coagulación o por reacciones en fase líquida; están compuestas fundamentalmente por sulfatos y nitratos, amonio, carbono elemental, compuestos orgánicos y metales [1].

Las principales fuentes naturales de gases precursores son las emisiones de SO₂ volcánicas, el dimetil sulfuro de origen biogénico marino, la transpiración de los suelos los rayos y grandes zonas forestales que emiten vapores orgánicos debido a la transpiración de las plantas [20].

Al igual que las partículas primarias las fuentes antropogénicas más trascendentales de las partículas secundarias se encuentran en zonas urbanas e industriales y emisiones procedentes del sector residencial y servicios [18].

1.3. Técnicas de monitoreo de contaminantes del aire

Las técnicas para muestreo dentro del monitoreo atmosférico pueden ser divididos en cinco tipos genéricos:

Muestreador pasivo: Estos dispositivos de toma de muestra colectan un contaminante específico por medio de su adsorción y absorción en un sustrato químico seleccionado. Después de su exposición por un apropiado período de muestreo, que varía desde un par de horas hasta un mes, la muestra se regresa al laboratorio, donde se realiza la desorción del contaminante y después se le analiza cuantitativamente. Las principales ventajas del muestreo pasivo son su simplicidad y bajo costo.

Muestreo activo: A diferencia de los muestreadores pasivos, este tipo de equipos requieren energía eléctrica para bombear el aire a muestrear a través de un medio de colección físico o químico. El volumen adicional de aire muestreado incrementa la sensibilidad, por lo que pueden obtenerse mediciones diarias promedio.

Analizadores o monitores automáticos: A pesar de las ventajas económicas de los muestreadores activos o pasivos, existen aplicaciones de monitoreo que necesitan de la rápida respuesta, en horas o menor tiempo, que proporciona un analizador automático. Estos instrumentos se basan en propiedades físicas o químicas del gas que va a ser detectado continuamente, utilizando métodos optoelectrónicos. El aire muestreado entra en una cámara de reacción donde, ya sea por una propiedad óptica del gas que pueda medirse directamente o por una reacción química que produzca quimioluminiscencia o luz fluorescente, se mide esta luz por medio de un detector que produce una señal eléctrica proporcional a la concentración del contaminante muestreado.

Sensores remotos: Los sensores remotos a diferencia de los monitores automáticos, pueden proporcionar mediciones integradas de multicomponentes a lo largo de una trayectoria específica en la atmósfera (normalmente mayor a 100 m), y sistemas más

complejos, pueden hasta proveer mediciones con rangos de resolución a lo largo de la trayectoria.

Bioindicadores: Se ha mostrado gran interés en el uso de bioindicadores para estimar algunos factores ambientales, entre los que se incluyen la calidad del aire, particularmente en la investigación de sus efectos. El término biomonitoreo cubre una multitud de muy diferentes muestreos y enfoques de análisis con muy diferentes grados de sofisticación y desarrollo [8].

En la actualidad, gracias al desarrollo de la instrumentación y microelectrónica, se disponen de sensores de medición electroquímicos que cuentan con características de operación muy ventajosas, tales como: respuesta de lectura directa, tamaño compacto, bajo costo, facilidad de integración, portabilidad, selectividad y baja complejidad de implementación.

La tendencia actual, particularmente en robótica, es emplear el término sensor para designar el transductor de entrada, y el término actuador o accionamiento para designar el transductor de salida. Los primeros pretenden la obtención de información, mientras que los segundos buscan la conversión de energía.

Los sensores son dispositivos electrónicos con la capacidad de detectar la variación de una magnitud física, tales como: temperatura, iluminación, movimiento y presión entre otros, y de convertir el valor de esta, en una señal eléctrica, ya sea analógica, digital o magnética [21].

La compañía Alphasense fabrica sensores electroquímicos de gases selectivos compactos (Figura 2), que pueden ser fácilmente integrados dentro de equipos y sistemas de medición automáticos. Estos sensores son inalámbricos, alimentados por

una batería y un panel solar. Poseen conexión wifi además de ser geo-localizables (GPS incorporado). Los datos se envían a la nube y pueden leerse desde cualquier PC con conexión a internet. Poseen 4 electrodos diseñados para medir los niveles del gas en nmol/mol. El primero de los electrodos se denomina “Electrodo de Trabajo”, el segundo se llama “Electrodo de Referencia”, el tercero es el “Electrodo Contador” y el último, el “Electrodo Auxiliar” se utiliza para corregir el cero ante los cambios de corriente. Éste no está en contacto con el gas, por lo tanto, proporciona información útil sobre el efecto de la temperatura ambiental. Cada sensor brinda dos señales, la segunda de ellas es la señal de fondo del electrodo que debe ser restada a los valores suministrados por el sensor del Electrodo de Trabajo [22].



Figura 1.2. a) y b) Sensores Alphasense, selectivos de gases y c) sensor contador de partículas por dispersión de luz.

Los sensores de bajo costo también se presentan como una de las vías para el monitoreo de PM, estos ofrecen un monitoreo de la contaminación del aire a un costo menor que los métodos convencionales, lo que en teoría hace posible el monitoreo de los contaminantes en muchos más lugares además forman parte de la alta variedad de sensores utilizados en la medición del material particulado, estos permiten monitorizar multitud de variables, aportan interesantes utilidades a las diversas áreas y abren

nuevas puertas en el control y monitoreo de los contaminantes en el aire tienen la ventaja de ser más económicos a la hora de realizar la medición [23, 24].

Hay varias categorías de sensores disponibles actualmente:

- Los sensores electroquímicos se basan en una reacción química entre los gases en el aire y el electrodo en un líquido dentro de un sensor.
- En un sensor de óxido metálico (sensor resistivo, semiconductor) los gases en el aire reaccionan en la superficie del sensor y modifican su resistencia.
- Los contadores de partículas ópticos detectan la contaminación por partículas midiendo la luz dispersada por las partículas.
- Los sensores ópticos detectan gases como el monóxido de carbono y dióxido de carbono midiendo la absorción de luz infrarroja.

Las señales de los sensores no solo dependen del aire contaminante de interés, sino también en una combinación de varios efectos, como otros compuestos interferentes, temperatura, humedad, presión y desviación de la señal (inestabilidad de la señal). A altas concentraciones, la señal del contaminante del aire puede ser fuerte, pero en niveles de aire ambiente la señal es más débil en comparación a los efectos de interferencia. Por tanto, la calidad de los resultados del sensor depende de la tecnología e implementación (aplicación, sitio, condiciones, configuración) [24].

1.3.1. Técnicas de monitoreo para PM.

Para la determinación de la concentración de material particulado menor a 2,5 micras y menor a 10 micras en aire, se realiza una medición de forma convencional utilizando métodos gravimétricos, en el cual una componente de entrada, que puede ser pasiva o activa, entra en un muestreador, de naturaleza muy diversa. Por diferentes principios

físicos se obtiene la muestra, quedando separadas las partículas según distintos parámetros, como puede ser sus pesos o tamaño [25].

Para diferenciar entre las partículas finas o gruesas existen varios instrumentos de medida que lo permiten:

- ❖ Filtros: el caudal isocinético atraviesa un filtro donde se retiene el material particulado, según el diámetro que interesa. Para obtener la concentración del material se resta el peso del caudal original y el caudal tras el muestreo, dividiendo entre el volumen total.
- ❖ Colector en cascada: se fuerza a la corriente de aire a pasar entre placas, aumentando su velocidad. Al llegar a estas placas las partículas de un diámetro específico o mayores impactarán, quedando adherida a la pared, recubiertas de un sustrato adherente. Mientras tanto, las partículas menores pasarán a la siguiente, donde el diámetro de corte se irá reduciendo.
- ❖ Ciclones: se somete a la corriente de material particulado a una fuerza centrífuga, de modo que parte de las partículas de un cierto tamaño chocan con las paredes del ciclón, donde son recolectadas. Aquellas de menor tamaño salen del ciclón sin ser recolectadas. Para un mayor rendimiento es conveniente utilizar varios ciclones en serie, de modo que cada uno recoja distintos diámetros de partículas.
- ❖ Asentadores de gravedad: Un flujo de gas lento recorre una cámara, de forma que las partículas se depositan en un vaso colector debido a la fuerza gravitatoria. Son de fácil construcción y tienen un bajo costo de inversión y mantenimiento, pero necesitan grandes espacios para su construcción.

Otros métodos utilizados para la determinación de la concentración de PM, son los métodos electrostáticos y los métodos ópticos.

El método electrostático utiliza un campo eléctrico para atraer las partículas y efectuar recolección. El instrumento con el que se detectan las partículas en suspensión se denomina electrofiltro.

Su funcionamiento es el siguiente: una corriente de gases entrante es cargada eléctricamente con signo negativo y las placas del electrofiltro, cargadas con una corriente positiva, de signo contrario a las partículas, atraen a aquellas que tengan un peso menor a la fuerza eléctrica generada.

Los métodos ópticos, o espectrométricos, miden los distintos tamaños de partículas de una muestra a partir de la variación angular de un haz. El instrumento correspondiente proyecta una radiación electromagnética, u otras partículas, que inciden en la cámara de medición, por la cual circula la muestra de partículas. Estas partículas provocan la dispersión del haz, formando un ángulo con respecto al rayo incidente, que depende del diámetro particular.

Entre las ventajas de los métodos ópticos destacan su amplio rango, ya que puede medir partículas de menos de una micra, su velocidad de medición y su alto rendimiento, además de la no necesidad de calibración.

En la actualidad se cuentan con dispositivos muy sensibles que utilizan técnicas ópticas de conteo de partículas suspendidas a un costo considerablemente menores y con mayor facilidad de automatización e integración como son el Nova SDS011 (2014) y el DFRobot SEN0177 (2015). Por otro lado, la miniaturización de estos dispositivos ha abierto otras posibilidades de uso, tales como su integración en redes amplias de sensores o incluso redes colaborativas de medición usando, por ejemplo, las redes de

telefonía celular, lo que amplía considerablemente la cobertura de medición y proporciona mayor cantidad de información [25].

También existen otros métodos para determinar la concentración de PM, como son la Fluorescencia de Rayos-X (FRX), una técnica de ensayo no destructiva, que permite conocer con alta exactitud la composición química elemental del material, determinando todos los elementos presentes en forma simultánea desde el Sodio (Na^{11}) hasta el Uranio (U^{92}) [26].

La cromatografía iónica, es otra de las técnicas para determinar la composición de PM, ha sido la más utilizada en los últimos tiempos para la determinación de especies aniónicas. Las técnicas cromatográficas tienen la ventaja de permitir el acoplamiento de una técnica de separación muy eficaz en continuo, con técnicas de detección sensibles y universales o selectivas, según las necesidades del análisis a realizar. La elección de la técnica cromatográfica debe realizarse teniendo en cuenta la polaridad y la temperatura de ebullición de las sustancias a separar. La eficacia de un análisis cromatográfico depende, de manera fundamental, de la correcta elección de la columna y la fase móvil. La columna se elige en función de la posible interacción entre las sustancias a separar y la fase estacionaria, es decir, del mecanismo de interacción entre el soluto con la fase móvil y la fase estacionaria a utilizar [27].

La utilidad del microanálisis de rayos x inducidos por partícula (PIXE, por sus siglas en inglés) en la búsqueda de soluciones a la problemática ambiental es indiscutible. Tanto la EPA como la Agencia de Protección Ambiental de la Unión Europea reconocen a la técnica PIXE entre las técnicas de análisis aceptadas para realizar estudios de contaminación atmosférica por partículas.

Esta técnica tiene importantes aplicaciones en el estudio y tecnología de materiales sólidos, arqueología y estudios biomédicos, entre otros, y en particular en el estudio de las partículas suspendidas en el aire, en donde la técnica PIXE es una de las más explotadas debido a que proporciona resultados confiables para la identificación y cuantificación de elementos químicos desde el aluminio hasta el uranio, incluyendo todos los elementos metálicos [28-33].

En Cuba, los estudios realizados han utilizado los captadores activos de pequeño volumen Dekati impactor y ECHO PM de la firma TCR TECORA con posterior análisis gravimétrico [34, 35].

1.3.2. Desarrollo de sensores para medir PM.

Los sensores se han visto involucrados en muchísimos estudios sobre control, monitoreo y purificación del aire [34, 36, 37]. En el año 2016 Campos y colaboradores utilizaron los sensores Arduino, AM2301 y el sensor de polvo GP2Y1010AU en Bogotá, Colombia, con el fin de conocer los valores de temperatura, humedad y material particulado a los que estaban expuestos los trabajadores de la compañía Olaflex S.A.S [38].

También, se han creado alternativas innovadoras para la medición de parámetros ambientales, como son el uso de vehículos aéreos no tripulado, dotados de un sensor óptico de partículas y un sensor de temperatura y humedad relativa, siendo programados ambos sensores con un microcontrolador Arduino Ethernet [39].

Por otra parte, se han diseñado prototipos portátiles para la detección de material particulado en las actividades mineras subterráneas, que son capaces de emitir una

señal cuando se sobrepasa el límite permisible de contaminantes a los que puede exponerse el ser humano [40].

La necesidad de monitorear el aire ha llevado a buscar alternativas más económicas y he ahí que empiezan los estudios sobre los sensores de bajo costo. En el año 2018 la EPA puso en práctica un proyecto para el uso de un equipo de monitoreo compacto móvil para la detección de material particulado. Durante ese mismo año en España se desarrolló una investigación para la creación de un módulo de detección de PM_{2.5} y PM₁₀, enfocada en el desarrollo de un sensor para las variables meteorológicas y las variables propiamente de calidad del aire [41].

Sin embargo, para que estos sensores de bajo costo sean útiles, es necesario cuantificar su exactitud y precisión. El centro de Ciencias de la Tierra y del Medio ambiente de la Universidad de Birmingham en colaboración con los Laboratorios de Química Atmosférica Wolfson de la Universidad de York, en Reino Unido, realizó la evaluación del sensor Alphasense OPC-N2, un prometedor contador de partículas ópticas en miniatura de bajo costo que se evaluó colocando 14 dispositivos en un sitio para investigar la variación en las concentraciones medidas. Se realizó la comparación con dos contadores ópticos de partículas de referencia diferentes, así como con un TEOM-FDMS, que permitió evaluar la precisión del sensor. En general, se encontró que el sensor Alphasense OPC-N2 mide con precisión la concentración de masa de partículas en el aire ambiental siempre que estén calibradas correctamente y corregidas para la humedad relativa [42, 43].

1.4. Efectos adversos de los contaminantes del aire.

La contaminación del aire es un problema para todos. La exposición humana a los contaminantes del aire puede resultar en una variedad de problemas a la salud, dependiendo del tipo de contaminante, la magnitud, duración, frecuencia de exposición y la toxicidad asociada del contaminante específico [27], en casos extremos, ha llegado incluso a causar la muerte [8].

Las personas entran en contacto con contaminantes en el aire tanto en interiores como al aire libre durante sus actividades diarias. La toxicidad de los contaminantes y sus concentraciones en el aire interior puede, por ejemplo, contener compuestos orgánicos, partículas o microbios que podrían provocar alergias u otros efectos sobre la salud [11].

Datos publicados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) en 2018 muestran que más de 32 0000 muertes al año son atribuibles a la exposición a contaminantes atmosféricos [44]. Los efectos de la contaminación sobre la salud varían enormemente de persona en persona. Los más afectados son los ancianos, lactantes, mujeres embarazadas y enfermos crónicos del pulmón y corazón. Las personas que hacen ejercicios al aire libre también están propensas pues respiran más rápida y profundamente, lo que permite el ingreso de más contaminantes a los pulmones. Los corredores y ciclistas que se ejercitan en áreas de gran tránsito se pueden causar más daño que beneficio. Asimismo, existen otras vías de exposición, como la contaminación del agua potable, la contaminación de los alimentos y la absorción por la piel [8].

Al igual que las fuentes móviles, las emisiones que proceden de fuentes fijas (industria, hogares, agricultura y vertederos) son nocivas para la salud humana, producen

corrosión en diferentes materiales y causan daños a la vegetación, así como perjuicios a la agricultura y la silvicultura [9].

Los efectos nocivos de los contaminantes de los vehículos (hidrocarburos, óxido de nitrógeno, monóxido de carbono y partículas) sobre la salud humana y el medio ambiente han sido probados científicamente y con el paso de los años estos efectos han de seguir aumentando [4, 45].

Las sustancias en las emisiones vehiculares pueden provocar efectos inflamatorios irritativos en el aparato respiratorio las principales son: nitrógeno, ozono, oxidantes fotoquímicos, dióxido de azufre y las partículas [9].

El efecto del monóxido de carbono a corto plazo es similar a la sensación de fatiga que se experimenta en altura o cuando se padece de anemia. La exposición al monóxido de carbono puede exacerbar las enfermedades del corazón y del pulmón. La ingesta de CO afecta la percepción y el pensamiento, desacelera los reflejos, y puede causar mareos, angina, inconsciencia o la muerte [8].

El SO₂, está asociado con una disminución de la función pulmonar y un mayor riesgo de mortalidad y morbilidad. Los efectos adversos para la salud del SO₂ son, entre otros, tos, flema, malestar en el pecho y bronquitis [8].

El efecto del NO₂ más adverso para la salud se produce en la intersección de las vías respiratorias y la región de intercambio gaseoso de los pulmones [8].

En la actualidad el mundo se enfrenta a la peor epidemia hasta ahora conocida, del siglo XXI, el brote de enfermedad por coronavirus (Covid-19) causada por el virus SARS-CoV-2, fue notificado por primera vez en Wuhan, China el 31 de diciembre de 2019 [46].

Para esta enfermedad, la contaminación del aire, se considera como un factor de riesgo, por ser un agente que coopera con la infección respiratoria Covid-19, debido al traslado de microorganismos que arremeten sobre el sistema inmune de la persona, convirtiéndose más débil al ataque de diversos patógenos. Además, existen reportes que el Covid-19 puede mantenerse en aerosoles por varias horas. Diversos investigadores, encontraron, que los efectos del PM2.5 y PM10 repercuten sobre la gravedad del Covid-19, ocasionando la muerte de los pacientes, si estos continuaran ante la exposición de la contaminación atmosférica y que los efectos de esta enfermedad se presentarán a largo plazo. Por lo cual, se podría especular que se observa una correlación en lugar de una causalidad. Existen varios estudios que resaltan la correlación entre el aumento de concentración de ciertos contaminantes con la mortalidad por Covid-19, donde los infectados son propensos a enfermedades respiratorias crónicas [46-48].

La contaminación del aire actúa como condicionante para la salud, pues favorece la ocurrencia de eventos cerebrovasculares, neumopatías crónicas y agudas, trombosis, inflamación y disfunción endotelial de las arterias [49, 50].

Por una parte, está bien establecido que los contaminantes atmosféricos son un factor que impacta en la salud humana incrementando el riesgo de aparición y complicación de varios padecimientos. Aún sin la pandemia, vivir en sitios con contaminación del aire se ha vinculado con tasas más altas de enfermedades pulmonares como asma y enfermedad pulmonar obstructiva crónica [51, 52].

Otros efectos de la contaminación atmosférica pueden ser daños a la economía, a la vegetación provocando alteraciones foliares, reducción del crecimiento de las plantas,

destrucción de flores, etc, además, provoca alteraciones del medio ambiente como son la reducción de la visibilidad, el efecto de invernadero, la afectación de la capa de ozono, lluvias ácidas, entre otros. En los animales puede causar la muerte, fluorosis, efectos genéticos y acortamiento de la vida y en el hombre provoca efectos psicológicos y fisiológicos agudos y crónicos [9].

1.4.1. Material particulado. Efectos adversos.

Numerosos estudios han mostrado que tanto los aerosoles naturales como antropogénicos tienen un gran impacto sobre la salud humana. Debido al conocimiento limitado de las fuentes de emisión, la composición, las propiedades y fenómenos complejos de transporte entre otros aspectos, los efectos de los aerosoles sobre la salud no son cuantificados ni entendidos en su totalidad [53]. Estudios epidemiológicos muestran correlaciones entre las partículas finas y efectos severos como el aumento de enfermedades cardiovasculares, respiratorias y alérgicas que se relacionan con un aumento de la mortalidad. En octubre de 2013 el grupo de trabajo de la Agencia Internacional para las Investigaciones del Cáncer clasificó al PM como cancerígeno humano. Investigaciones toxicológicas “in vivo” e “in vitro” empleando aerosoles modelos y ambientales, han demostrado gran toxicidad pulmonar, estrés oxidativo y respuestas inflamatorias, si bien los mecanismos bioquímicos y procesos biológicos que causan estos efectos siguen bajo estudios que permitan su dilucidación [54]. Las partículas de PM10 suponen los mayores problemas, debido a que pueden llegar a la profundidad de los pulmones, y algunas hasta pueden alcanzar el torrente sanguíneo y han llegado a causar, incluso, la muerte prematura en personas con enfermedades cardíacas o pulmonares [55].

Otros efectos adversos provocados por la exposición a PM, son el asma agravada, ataques al corazón, pulsaciones irregulares y el aumento en síntomas tales como irritación de las vías respiratorias, tos o dificultad al respirar [56-58].

En relación al SARS, hace unos años atrás se evaluó la exposición a contaminantes, como las partículas PM10, las cuales podían influir en el pronóstico del SARS y conducir a un mayor riesgo de muerte, al comprometer el sistema respiratorio. El efecto producido por la exposición a las PM10 fue ampliamente estudiado, demostrando que cada 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de elevación en PM10 representan un 6% de aumento al riesgo de mortalidad cardiopulmonar. Asimismo, la exposición a largo plazo a PM2.5 desarrolla un estímulo inflamatorio crónico, especialmente en niños y poblaciones poco saludables, mientras que una exposición a corto plazo de PM2.5 aumenta la susceptibilidad a infecciones, mediante un debilitamiento del sistema inmune [59]. Por otra parte, hay estudios que demuestran que a mayores concentraciones de PM2.5 y PM10, existe mayor tasa de mortalidad [60] donde aparentemente la exposición de las poblaciones a PM2.5 contribuyen a corto y largo plazo a una mayor incidencia de letalidad. En cambio, la exposición a corto plazo a una concentración elevada de SO_2 , se relaciona con una clara disminución de infección a Covid-19 [61].

La exposición a estos contaminantes provoca procesos de estrés oxidante e inflamación de las vías respiratorias y los pulmones ocasionando efectos adversos a la salud de las personas a corto y largo plazo. Los contaminantes atmosféricos, además, son capaces de alterar de manera importante la respuesta del sistema inmunológico. Son varios los estudios epidemiológicos que han mostrado una asociación entre el incremento de los

contaminantes y las admisiones hospitalarias que tienen como diagnóstico infecciones respiratorias bacterianas y virales [62-65].

En Cuba, un factor que ha repercutido en el aumento de los casos de Covid-19 es la presencia de los llamados polvos del Sahara.

Desde hace años se ha estado reportando la llegada durante los primeros meses del verano de nubes de polvo procedentes del Sahara hasta la región del Caribe y Cuba. Diversos estudios realizados demuestran que el contenido de este polvo incluye numerosos agentes patógenos y elementos contaminantes que son capaces de afectar la salud humana, provocando por lo general aumentos de enfermedades respiratorias, asma bronquial, crisis alérgicas, trastornos en la vista y dermatológicos, por el contacto directo con las partículas de polvo. En el 2020 la llegada de nubes de polvo hasta Cuba sucedió más temprano que en años anteriores, con una extensión y concentración también mayor a lo usual. La Figura 1.3 muestra la intensa nube de polvo que influyó durante varios días sobre una extensa área del océano Atlántico, el mar Caribe y Cuba a partir del 10 de abril de 2020 [66].

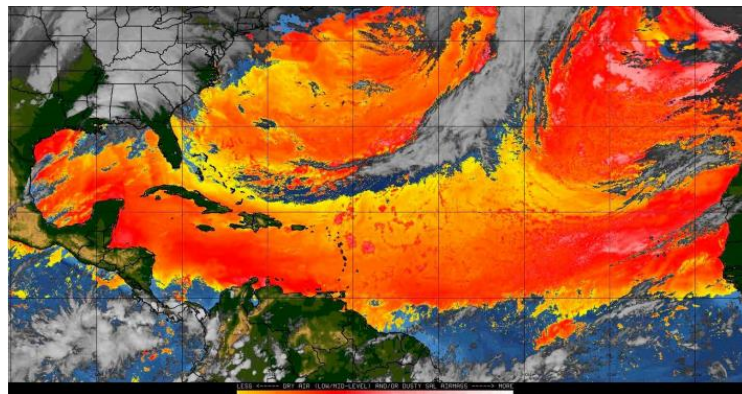


Figura 1.3 Nube de polvo del Sahara que afectó Cuba el 12 de abril de 2020.

1.5. Conceptos estadísticos aplicados en la investigación.

Varios son los parámetros estadísticos que pueden ser utilizados para evaluar la data obtenida de las mediciones de contaminantes del aire. Entre estos están las series de tiempo, el cálculo de la media móvil y todo un conjunto de valores que resultan de aplicar estadística descriptiva a la data.

Para que los datos sean válidos para el cálculo de los valores promedios, se debe contar con el 75 % de los datos del periodo de tiempo a evaluar, si la cantidad de datos invalidados es superior a la cuarta parte de la cantidad total de datos, entonces para ese grupo de datos no debe calcularse la media móvil, ni mucho menos establecer algún valor por extrapolación o interpolación para compararlo con la norma.

Para el cálculo de los promedios en el tiempo: Se define una “hora” como el periodo de sesenta minutos transcurridos “inmediatamente antes” de la hora reportada, es decir los datos de vigilancia correspondientes a las 7 a.m. son los recolectados desde las 6:01 a.m. a las 7:00 a.m. Esta definición se justifica por la necesidad de correspondencia entre los datos de vigilancia de calidad del aire y los datos meteorológicos. Tal definición ha sido establecida de acuerdo con los estrictos lineamientos de la Organización Meteorológica Mundial, y está basada en el razonamiento de que la hora reportada solo puede cubrir eventos que ya han sucedido.

El día se define como el periodo de 24 horas transcurrido entre las 00:01 y las 24:00, donde 00:01 es el primer minuto del día, después de la media noche. Es decir, en un día se obtendrán 24 promedios horarios desde la 1 que es la primera hora del día, hasta las 24 que es la última. Esta definición es fundamental cuando se quiere calcular promedios diarios [67].

El promedio aritmético de todos los n datos recolectados en determinado período de tiempo se calcula mediante la siguiente expresión.

$$(C_{prom})_j = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{n} \text{ para } i = 1, 2, 3, \dots, n;$$

Donde:

$(C_{prom})_j$: concentración promedio del período de tiempo

$j \sum_{i=1}^n C_i$: Suma de los n datos de concentración del contaminante \dot{i} obtenido en el período de tiempo j .

n : cantidad de datos obtenidos en el período de tiempo j .

1.5.1. Series de tiempo

Una serie temporal es un conjunto de datos cuyos valores representan observaciones de un fenómeno, uniformemente espaciadas a lo largo del tiempo. Bajo este concepto, los datos reportados por los equipos de monitoreo de calidad de aire, corresponden a series cronológicas o temporales que representan la concentración de determinado tipo de contaminante, en este caso, a las mediciones de material particulado recopiladas cada cierto intervalo de tiempo; la tendencia de una serie, viene dada por el movimiento general a largo plazo de la serie [68, 69].

La línea de tendencia de muchas series muestra que algo aumenta o disminuye a un ritmo constante; cuando la serie de tiempo presenta un comportamiento curvilíneo se dice que este comportamiento es no lineal [70].

1.5.2. Media móvil

La media móvil es el promedio de un valor de la serie y los que le rodean. Las medias móviles se utilizan para suavizar las series cronológicas, es decir, para reducir el ruido o las fluctuaciones en las series. En el caso en el que se desee calcular medias móviles de por ejemplo ocho (8) horas, para un conjunto de datos de calidad de aire, el procedimiento sería tomar el primer conjunto de ocho datos y calcular su valor promedio (este primer conjunto corresponderá a las ocho primeras horas para las cuales se tenga la serie de datos. En la Figura 1.4 se muestra un ejemplo de cálculo para los valores de concentración de O₃ de las horas 00:00 hasta las 07:00, reportados por una estación de monitoreo de calidad de aire, luego se procede a calcular el valor promedio para los datos correspondientes a las horas 01:00 hasta las 08:00, el tercer valor calculado de la media móvil corresponderá al promedio del grupo de datos reportados para las horas comprendidas entre las 02:00 hasta las 09:00 y así sucesivamente para todo el conjunto de datos que se tengan y que se vayan a evaluar. El procedimiento de cálculo de la media móvil debe seguirse para todos los conjuntos de datos que conformen el período al que se esté haciendo referencia; es decir, si se desea realizar un informe trimestral, se deberá contar con datos válidos registrados por la estación para cierto contaminante durante los tres meses que hacen parte del informe.

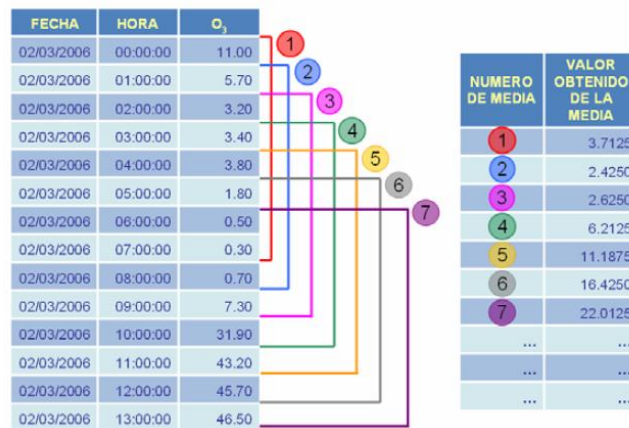


Figura 1.4 Ejemplo de metodología para la estimación de la media móvil para 8 horas de un conjunto de datos.

1.5.3. Asimetría

El objetivo de la medida de la asimetría es, sin necesidad de dibujar la distribución de frecuencias, estudiar la deformación horizontal de los valores de la variable respecto al valor central de la media. Las medidas de forma pretenden estudiar la concentración de la variable hacia uno de sus extremos [71].

Cuando una distribución de frecuencia es simétrica, la media (\bar{x}), mediana (Me) y moda (Mo) coinciden en su valor ($\bar{x} = Me = Mo$) (Figura 1.5).

En caso contrario, decimos que la distribución es Asimétrica, y entonces puede ser de dos tipos:

- Asimétrica a la izquierda.

En una distribución sesgada a la izquierda, la moda es menor a la mediana, y esta a su vez menor que la media ($Mo < Me < \bar{x}$) (Figura 1.5).

- Asimétrica a la derecha.

En una distribución sesgada a la derecha la relación se invierte, la moda es mayor a la mediana, y esta a su vez mayor que la media. ($Mo > Me > \bar{x}$) (Figura 1.5).

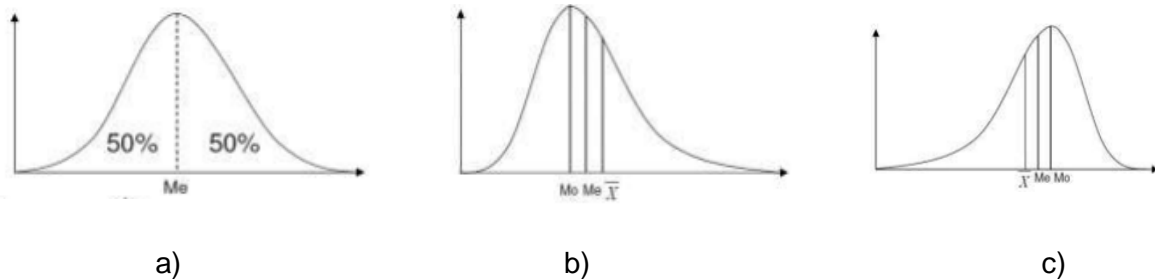


Figura 1.5 a) Distribuciones asimétricas b) sesgada a la izquierda y c) sesgada a la derecha.

El coeficiente de asimetría mide el grado de asimetría de la distribución con respecto a la media. Un valor positivo de este indicador significa que la distribución se encuentra sesgada hacia la izquierda (orientación positiva). Un resultado negativo significa que la distribución se sesga a la derecha.

1.5.4. Curtosis

La curtosis es un parámetro estadístico que sirve para caracterizar la distribución de probabilidad de una variable aleatoria, indicando el grado de concentración de los valores alrededor de la medida central [72, 73].

La curtosis puede tener cualquier valor, sin limitaciones. Su cálculo se lleva a cabo dependiendo de la manera en que se entreguen los datos, a continuación, dos de las expresiones más utilizadas.

Datos sin agrupar o agrupados en frecuencias y datos agrupados en intervalos.

$$g_2 = \frac{1}{N} \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{\sigma^4}$$

$$g_2 = \frac{1}{N} \frac{\sum_{i=1}^N f_i (mx_i - \bar{x})^4}{\sigma^4}$$

Donde:

g_2 : Coeficiente de curtosis; \bar{x} : media aritmética; x_i : valor i-ésimo; σ : desviación estándar; N: número de datos; f_i : frecuencia del valor i-ésimo; m_{x_i} : marca de clase

En la Figura 1.6 se representan los distintos tipos de distribución de acuerdo a los valores de curtosis, para una curtosis igual o aproximadamente igual a cero la distribución será mesocúrtica, si la curtosis es mayor que cero la distribución es leptocúrtica y en el caso de que sea menor que cero es una distribución platicúrtica.

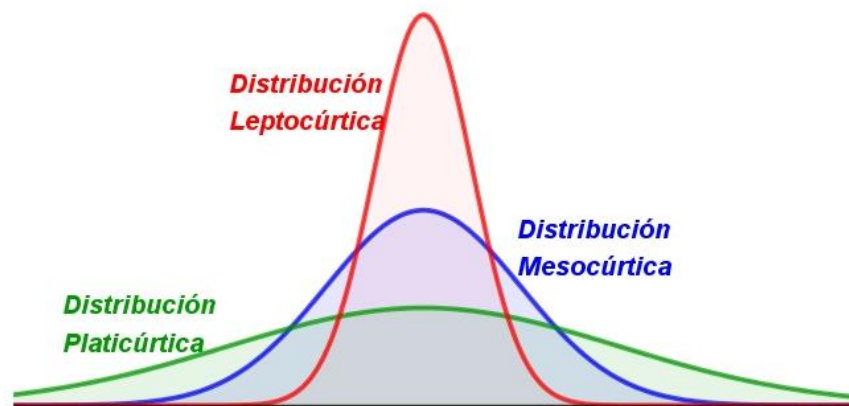


Figura 1.6 Tipos de distribuciones según el valor de la curtosis.



Materiales y métodos

Capítulo 2: Materiales y métodos

En este capítulo se describe la zona bajo estudio identificando, además, las fuentes fijas localizadas en la ciudad que son emisoras de PM y la principal arteria de tráfico vehicular que también incide en los niveles de este contaminante. También se refieren los puntos de muestreo seleccionados según lo establecido en la NC 111: 2004 y el periodo de muestreo.

2.1. Estrategia de monitoreo

Como ha sido mencionado en el capítulo anterior, el PM_{2.5} y PM₁₀ están entre los contaminantes regulados en la NC 1020: 2014 [74] por sus conocidos impactos sobre la salud humana. La industria y el transporte fueron identificados entre las fuentes principales de emisión de estos contaminantes razón por la cual, se han tomado como criterio para la selección de los sitios de monitoreo. Dada la influencia de las variables meteorológicas sobre la dispersión de los contaminantes atmosféricos estas también fueron registradas durante los periodos de muestreo [75-78]

2.1.1. Caracterización de la zona bajo estudio.

Santa Clara (Figura 2.1) es la capital de la provincia Villa Clara y está entre sus principales ciudades, tiene alrededor de 237 581 habitantes y ocupa un área de 668,82 km² (Oficina Nacional de Estadísticas 2011). Está situada aproximadamente a 120 m sobre el nivel del mar y predominan las zonas llanas hacia el norte y el noreste y colinas bajas hacia el sur. El municipio cuenta con 19 Consejos Populares. La ciudad está atravesada por la carretera central del este al oeste [75, 79].

Santa Clara



Figura 2.1. Santa Clara, Cuba.

Con relación a las fuentes fijas, se localizan 84 en el perímetro urbano y suburbano que emiten, fundamentalmente, gases derivados de la combustión y hollín, algunos de los cuales son reales o potenciales emisores de gases tóxicos, polvos y malos olores clasificándose, siete de estas, como emisoras de polvos que aportan abundante material particulado. Dentro de las fuentes emisoras de polvo se distingue la Recapadora de Neumáticos “David Díaz Guadarrama”, ubicada en el área habitacional. El transporte, otra de las fuentes emisoras de contaminantes, constituye el principal aporte de estos desde fuentes móviles dado por la circulación de vehículos antiguos consumidores de gasolina y petróleo con problemas de funcionamiento. La mayor incidencia de estos es en la zona del centro de la ciudad. La circulación máxima

promedio de vehículos por las principales calles de la ciudad ocurre en horarios picos (7:00 a 9:00; 11:00 a 13:00 y 17:00 a 19:00) [75].

2.1.2. Condiciones climatológicas

El clima de la ciudad de Santa Clara es tropical, estacionalmente húmedo con influencia marítima y rasgos de semicontinentalidad. Los valores históricos de las variables meteorológicas en los meses de muestreo se describen a continuación:

La temperatura promedio del mes de marzo es de 22,5 °C, oscilando la media diaria entre 21.3 °C y 23.8 °C siendo la temperatura mínima media 17.3 °C, y la máxima media 29.1 °C.

La Humedad Relativa media es de 73 %, oscilando los valores medios diarios entre 70 % y 74 % con una Humedad Relativa mínima media de 47 % y la máxima media de 95 %. El promedio de lluvias es de 61.6 mm y los vientos presentan componentes predominantes del Este, con una velocidad media de 11.48 km/h.

En junio la temperatura promedio es de 26.1 °C, oscilando la media diaria entre 25.4 °C y 26.6 °C, las temperaturas máximas y mínimas medias son de 31,8 °C y 21,9 °C respectivamente, además posee una Humedad relativa media del 80 %, oscilando los valores medios diarios entre 79 % y 82 %, en cuanto al promedio de lluvia es de 170.9 mm y los vientos presentan componentes predominantes del Este, con una velocidad media de 7.39 km/h.

Para agosto la temperatura promedio es de 26.3°C, oscilando la media diaria entre 25.9 °C y 26.8 °C, con una temperatura mínima media de 22.1 °C y una temperatura máxima media de 32.4 °C, en cuanto a la Humedad Relativa media es de 80 %, oscilando los valores medios diarios entre 79 % y 82 %, con un promedio de lluvia de

163.4 mm y los vientos tiene una velocidad media de 7.52 km/h con componentes predominantes del Este.

2.1.3. Selección de los sitios de muestreo. Características

Para la selección de los sitios de muestreo se tuvieron en cuenta las consideraciones que aparecen en la NC 111: 2004 de estas, las de mayor relevancia para este trabajo son: la clasificación de las fuentes contaminantes, la localización de las fuentes emisoras con respecto a las zonas habitables, la cantidad de habitantes en el asentamiento humano, que los puntos estén ubicados en espacios abiertos en todas direcciones fuera de la acción de la sombra aerodinámica de edificaciones o accidentes topográficos y, que el orificio del dispositivo utilizado para la toma de muestras esté ubicado entre 1,5 y 2,0 metros de altura sobre el nivel del terreno.

2.1.4 Selección del periodo de muestreo

Los periodos de muestreo se tomaron en días representativos de la emisión de PM_{2.5} y PM₁₀, o sea, días de trabajo de la fuente fija industrial y en concordancia con las condiciones imperantes en la etapa de desarrollo de este trabajo que coincidió con la presencia de la Covid-19 en Cuba con una alta incidencia en la ciudad de Santa Clara y, la presencia del evento meteorológico, Polvos del Sahara.

2.2. Monitoreo de PM_{2.5} y PM₁₀

Para la selección del sensor se tuvo en cuenta su costo de adquisición y el rango de concentraciones del medio al que se va a exponer. También se consideraron los límites permisibles normados para este contaminante. Según la NC 1020: 2014 [74] la concentración máxima admisible de PM_{2.5} y PM₁₀ en 1 hora es 100 µg/m³ y 200 µg/m³ y en 24 horas es 25 µg/m³ y 50 µg/m³ respectivamente.

El sensor seleccionado formará parte de un equipo de medición de calidad del aire compuesto por varios sensores que miden tanto contaminantes del aire como variables meteorológicas.

El monitoreo de estos contaminantes cumple con lo establecido en la NC 111: 2004, el mismo está comprendido dentro de los planes de monitoreo especiales ya que se establecen con límites de tiempo previamente determinados para su ejecución para la realización de investigaciones concretas referentes a la calidad del aire con el objetivo de dar respuesta a situaciones concretas, tales como: conflictos o quejas y, la caracterización de los “niveles de contaminación de fondo.

2.3. Características del sensor OPC-N3

El sensor de bajo costo utilizado en este estudio es el Contador de partículas ópticas (por sus siglas en inglés OPC-N3) lanzado en enero de 2019 por la compañía Alphasense [80].

Como sugiere su nombre, el OPC-N3 utiliza métodos ópticos para detectar, dimensionar y contar partículas. Como todos los contadores ópticos de partículas convencionales mide la luz dispersada por partículas individuales transportadas en una corriente de aire de muestra a través de un rayo láser. Estas mediciones son utilizadas para determinar el tamaño (basado en la Teoría de Dispersión de Mie) y la concentración del número de partículas. La carga de masa de partículas: PM_{2.5} y PM₁₀, se calculan a partir de los espectros de tamaño de partícula y los datos de concentración, asumiendo la densidad y el índice de refracción. Para generar la corriente de aire el OPC-N3 utiliza un pequeño ventilador de bajo consumo. Posee un sensor combinado de temperatura y humedad dentro del propio encapsulado [81].

El sensor puede clasificar y contar partículas en 24 contenedores según su tamaño, entre un rango de 0,3 μm y 40 μm . Los datos del histograma de tamaño de partícula se utilizan automáticamente para calcular la masa de material particulado por unidad de volumen de aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) para PM_{2,5} y PM₁₀. Este cálculo asume una densidad de partículas por defecto de 1,65 g/cm^3 y índice de refracción =1,5 [80].

El OPC-N3 tiene un mayor rango de detección de partículas y flujo laminar mejorado con relación a otras versiones del mismo, lo que permite que se mantenga más limpio en ambientes altamente contaminados y que pueda medir desde salas limpias hasta niveles de contaminación de 2000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{2.5} con la característica única de poder medir el polen [82].



Análisis de los resultados

Capítulo 3: Análisis de los resultados

En este capítulo se muestran los sitios y periodos de muestreo seleccionados y los resultados de la medición de los contaminantes PM_{2.5} y PM₁₀ en dichos sitios con el sensor de bajo costo OPC-N3.

3.1 Sitios y periodos de muestreo seleccionados

El estudio no se realizó una zona específica de la ciudad de Santa Clara, sino que se tomaron sitios representativos de diferentes escenarios para los contaminantes monitoreados. Los escenarios seleccionados son:

- a) área densamente poblada y afectada por fuente fija con una alta incidencia en la emisión de material particulado. Este es el punto nombrado “Consultorio” (C) ubicado en las coordenadas 22°24'12.6"N y 79°58'32.6"W cercano la Recapadora de Neumáticos “David Díaz Guadarrama” [83].
- b) zona en el centro de la ciudad con alta densidad poblacional y de tráfico por la Carretera Central, este punto se nombra “CESAM” (CS).
- c) sitio para medir concentraciones de fondo (niveles base), situado en la “Universidad Central de Las Villas” (UC).

Los sitios seleccionados se muestran en la Figura 3.1.



Figura 3.1. Sitios de muestreo.

Los sitios de muestreo “C” y “CS” están comprendidos en los Consejos Populares Condado Norte y Centro cuya densidad poblacional es alta, con 19257 y 22217 habitantes respectivamente lo cual implica que mayor número de personas pudieran estar expuesta a la contaminación provocada por estos contaminantes.

Dada la disponibilidad del equipamiento para realizar el estudio, los cortes de electricidad imprevistos que implican pérdida de datos y las condiciones reales impuestas por la pandemia de la Covid-19 con restricción de movimiento en las diferentes fases dictadas por el Consejo de Defensa Provincial los periodos de muestreo son cortos, estos se reflejan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Periodo de muestreo

Punto de muestreo	Periodo: fecha/hora		Observaciones
	Inicio	Final	
UC	11/08/21-0:00	18/08/21-23:59	UCLV cerrada y cero moviidades por fase de transmisión autóctona.
C	04/03/20-14:00	06/03/20-18:41	Condiciones de vida normal, antes de la Covid.
CS	23/06/20-10:28	28/06/20-14:14	Zona de alta densidad de tráfico, Fase 1 recuperación postcovid y evento del polvo del Sahara.

3.2 Medición de PM2.5 y PM10

El sensor OPC-N3 para medir PM2.5 y PM10 forma parte de un sistema de monitoreo del aire ambiente que se denomina: HZS-GARP-AQ-03, el cual ha sido diseñado y construido en el marco de un proyecto internacional. Este, tiene la capacidad para medir, además, la concentración de los gases contaminantes CO₂, SO₂, CO, O₃ y también, variables meteorológicas como la T y la HR. En la Figura 3.2 se muestra el equipo de monitoreo y uno de los sitios donde fue tomada la muestra (CESAM).

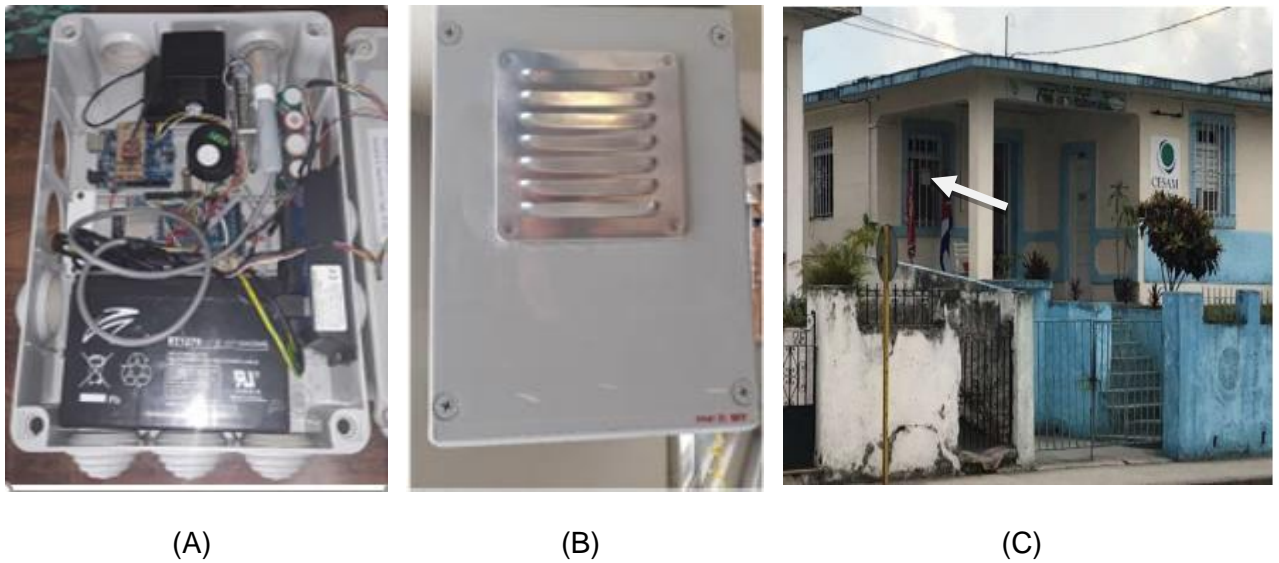


Figura 3.2. Sistema de monitoreo, HZS-GARP-AQ-03. (A) abierto y (B) cerrado y (C) sitio de muestreo “CESAM”

3.2.1 Resultado de la medición de PM_{2.5} y PM₁₀

El análisis de los resultados se realizó aplicando los conceptos estadísticos mencionados en el capítulo 1 y aplicando la estadística descriptiva por medio del uso Microsoft Excel 2013 con un nivel de confianza de 0,5 %.

3.2.1.1 Sitio de muestreo UC

En la Figura 3.3 se muestran las concentraciones promedio horarias y diarias obtenidas en el punto de muestreo ubicado en la Facultad de Ingeniería Eléctrica en la Universidad Central “Martha Abreu de las Villas”, Como se puede observar ningún valor excede el establecido en la Norma Cubana ni en la establecida por la OMS cuyos valores son coincidentes de 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{2.5} y PM₁₀ en 1 h y 24 h respectivamente lo cual es coherente con los resultados esperados, pues este sitio representa las concentraciones de fondo de este contaminante y por tanto, no hay ni fuentes fijas ni móviles que tributen a la generación del mismo en sus

inmediaciones; las variables meteorológicas no variaron significativamente durante el período de muestreo. Reportándose los siguientes valores de temperatura media de 25.704 °C, humedad relativa media de 74,25% y no se apreciaron lluvias significativas.

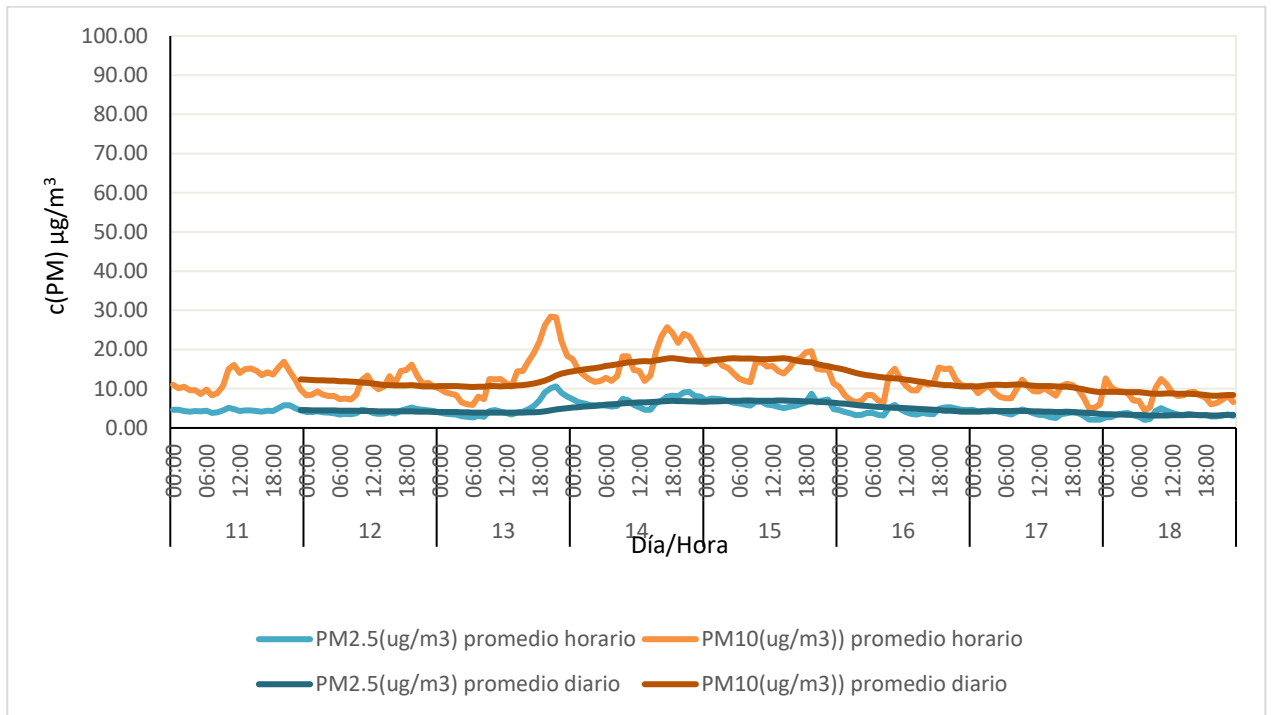


Figura 3.3 Concentración promedio horaria y diaria de PM2.5 y PM10 en el punto de muestreo UC.

Los valores de concentración máximos y mínimos obtenidos (Tabla 3.2) son 10,597 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 2,045 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM2.5 y 28,403 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 4,516 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM10 en los datos horarios, y 7,001 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 3,152 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM2.5 y 17,806 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 8,191 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM10 en los diarios. El valor promedio obtenido para PM10 fue 12,587 en 24 h el cual es menor que el valor reportado en condiciones similares en Camagüey [4]. Los coeficientes de asimetría para los cuatro casos dan valores positivos por lo que los datos tienen una distribución sesgada a la izquierda, lo que es muy positivo porque significa que la mayor cantidad de valores se encuentra por debajo de la media. En

cuanto a los valores de curtosis, en el caso de las concentraciones promedio horaria las distribuciones son leptocúrticas y para las diarias son platicúrticas lo cual significa que las concentraciones tanto de PM2.5 como de PM10 horarias se mueven en un intervalo amplio y están menos dispersos no así, las concentraciones diarias de ambos contaminantes cuyos rangos son más estrechos y están más dispersas.

Tabla 3.2. Variables estadísticas de las concentraciones horarias y diarias medidas en el sitio UC.

Variables estadísticas	PM			
	1 h		24 h	
	PM2.5	PM10	PM2.5	PM10
Media	4.747	12.243	4.864	12.587
Mediana	4.333	11.286	4.355	11.375
Desviación estándar	1.631	4.612	1.234	3.012
Curtosis	1.141	1.345	-1.112	-1.100
Coefficiente de asimetría	1.129	1.084	0.522	0.524
Mínimo	2.045	4.516	3.152	8.191
Máximo	10.597	28.403	7.001	17.806

3.2.1.2 Sitio de muestreo C

En la Figura 3.4 se muestra la concentración promedio horaria de PM2.5 y PM10 medida en el sitio de muestreo Consultorio. Como se puede observar los datos fluctúan entre los 4 y 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM2.5 y entre los 15 y 95 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM10, entre las 6:00

de la mañana y las 12:00 del día lo cual coincide con el horario de producción de la Recapadora.

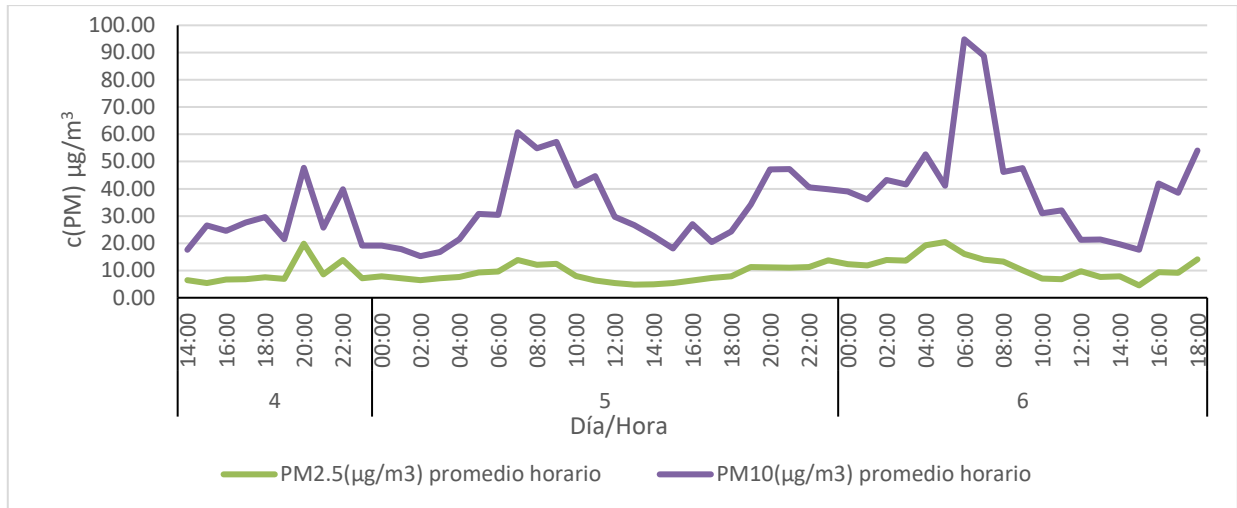


Figura 3.4. Concentración promedio horaria de PM2.5 y PM10 en el sitio de muestreo C.

Las concentraciones promedio horarias medidas en el período fueron 9,79 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM2.5 y 35,41 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM10 los cuales no superan lo establecido por la NC 1020: 2014 de 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM2.5 y PM10 respectivamente en 1 hora [74].

En la tabla 3.3 se muestra las variables estadísticas reportadas para las mediciones horarias de PM2.5 y PM10 con coeficientes de asimetría iguales 0,980 y 1,519 lo que significa que las distribuciones se encuentran sesgadas hacia la izquierda por lo que la mayor cantidad de valores se encuentra por debajo de la media lo que es favorable y, la curtosis para las mediciones de PM2.5 resultó ser de 0,563 mientras que para PM10 es igual a 3,352 lo que representa que ambas distribuciones son leptocúrticas y que como el coeficiente de PM10 es mayor tiene una mayor variación de las concentraciones.

Tabla 3.3. Variables estadísticas de las concentraciones horarias y diarias del punto de muestreo en el Consultorio.

Variables estadísticas	PM			
	1h		24h	
	PM2.5	PM10	PM2.5	PM10
Media	9.794	35.415	9.868	36.436
Mediana	8.614	31.040	9.891	37.276
Desviación estándar	3.886	16.588	1.189	4.462
Curtosis	0.563	3.352	-1.842	-1.783
Coefficiente de asimetría	0.980	1.519	0.021	-0.104
Mínimo	4.537	15.267	8.407	30.555
Máximo	20.452	94.872	11.663	42.402
Nivel de confianza (95,0%)	1.071	4.572	0.444	1.666

En la Figura 3.5 se muestran las concentraciones promedio diaria obtenidas en el muestreo del Consultorio, alcanzando valores de 9,86 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 36,43 para PM2.5 y PM10 respectivamente, estos resultados coinciden con los horarios de producción de la Recapadora. Las variables meteorológicas tuvieron un comportamiento estable con valores de temperatura media igual a 28,010 °C, humedad relativa media de 80,31 % y no hubieron lluvias significativas. En ninguno de los dos casos se supera los valores establecidos por la NC 1020: 2014 en 24h [74].

Para las concentraciones promedio horaria y diaria de PM2.5 y PM10 (Figura 3.5) se obtuvieron valores de desviación estándar de 3,886 y 1,189 para PM2.5 y 16,588 y 4.462 para PM10 respectivamente. La mayor desviación estándar de las concentraciones de PM10 indica que los datos varían en un rango de valores más amplio.

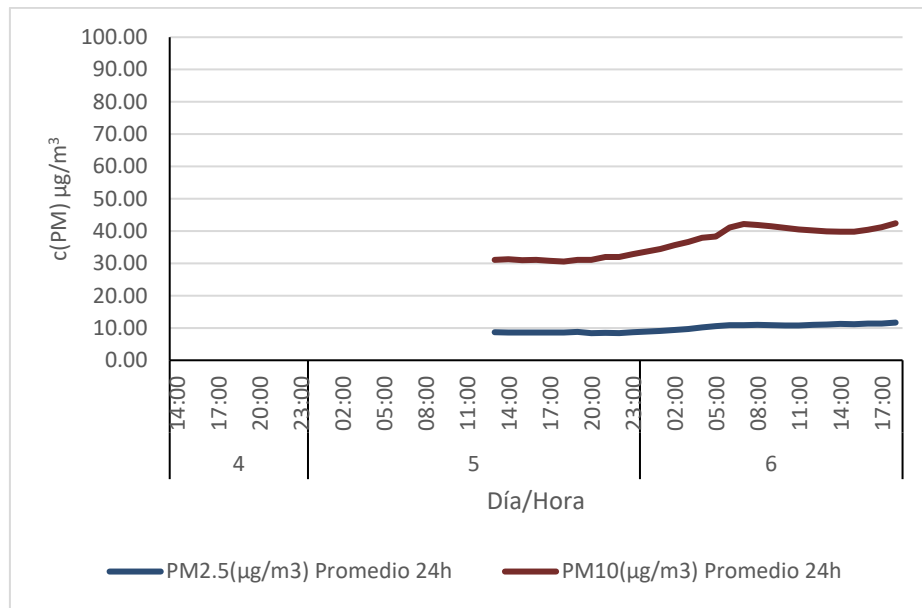


Figura 3.5. Concentración promedio diaria de PM2.5 y PM10 en el punto de muestreo C. Se obtuvieron coeficientes de asimetría iguales a 0,021 y a -0,104 lo que significa que en el caso de PM2.5 la distribución de encuentra sesgada hacia la izquierda por tanto la mayor cantidad de valores se va a encontrar por debajo del valor de la media, no siendo así para la distribución de PM10 que al tener un valor negativo se encuentra sesgada hacia la derecha. En el caso de la curtosis, con valores iguales a -1,842 para PM2.5 y 1,783 para PM10 resultó ser una distribución platicúrtica, por lo tanto, hay una mayor dispersión, pero fluctúan en un menor rango.

3.2.1.3. Sitio de muestreo CESAM.

En la figura 3.6 se muestran las concentraciones promedio horarias de PM medidas en el CESAM. Como se puede apreciar la mayoría de los picos se encuentran por debajo del valor que establece la NC (representados en el gráfico), excepto, los valores máximos medidos el día 24 entre las 10:00 de la mañana y 2:00 de la tarde, que alcanzan los 612,75 y 672,39 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM2.5 y PM10 respectivamente, estos

resultados coinciden con el evento de polvo del Sahara que afectó a Cuba; específicamente el PM10 alcanzó un valor de 23,782 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24 h el cual es comparable con el reportado en Camagüey de 37,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en un evento similar [4]. En los días del 23 al 26 también se observan picos que no son significativos comparados con el del día 24 pero que se relacionan con la cantidad de transporte que circula por esa zona en el horario pico. En un conteo realizado se contabilizó un mayor número de motos (131), motonetas (46), carros ligeros (211), almendrones (13), microbuses (45) y guaguas (45) que los días 27 y 28 que corresponden al fin de semana

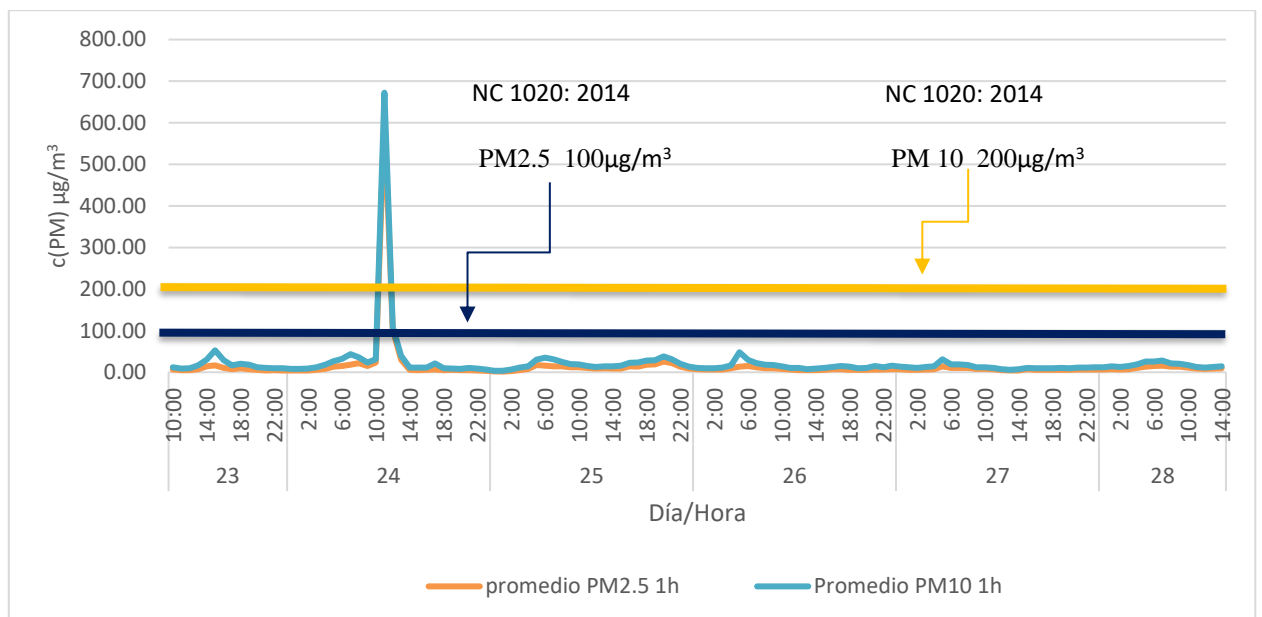


Figura 3.6. Concentración promedio horaria de PM2.5 y PM10 en el CESAM

En la Tabla 3.4 se muestran los variables estadísticas para el PM2.5 donde la desviación estándar obtenida fue de 54,792 este valor esta dado por los picos de concentración generados por el evento del Sahara, el valor mínimo medido fue 1,456 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con coeficientes de asimetría igual a 10,689 que demuestra que la distribución

es sesgada a la izquierda que al igual que en los otros puntos de muestreo demuestra que la mayor cantidad de valores se va a encontrar por debajo del valor de la media y con una curtosis igual a 117,128 resultando en una distribución leptocúrtica. Para los datos de PM10 se obtuvo una desviación estándar de 59,874 con un valor mínimo igual a 3,524 y además se puede apreciar que igual que para los datos de PM2.5 se obtiene una distribución leptocúrtica sesgada a la izquierda por lo que la mayor cantidad de valores se encuentra por debajo de la media.

Tabla 3.4. Variables estadísticas de las concentraciones horarias y diarias en el CESAM

Variables estadísticas	PM			
	1h		24h	
	PM2.5	PM10	PM2.5	PM10
Media	14.686	22.614	15.978	23.782
Mediana	7.296	13.607	9.359	16.990
Desviación estándar	54.792	59.874	12.742	14.443
Curtosis	117.128	114.368	-0.454	-0.479
Coeficiente de asimetría	10.689	10.496	1.208	1.163
Mínimo	1.456	3.524	7.074	12.259
Máximo	612.751	672.388	40.126	53.241

El promedio diario de las concentraciones medidas (Figura 3.7) muestra que al igual que para los datos horarios, el día 24 se superaron los valores permisibles por la NC, lo que corresponde con el evento del Sahara registrado ese día.

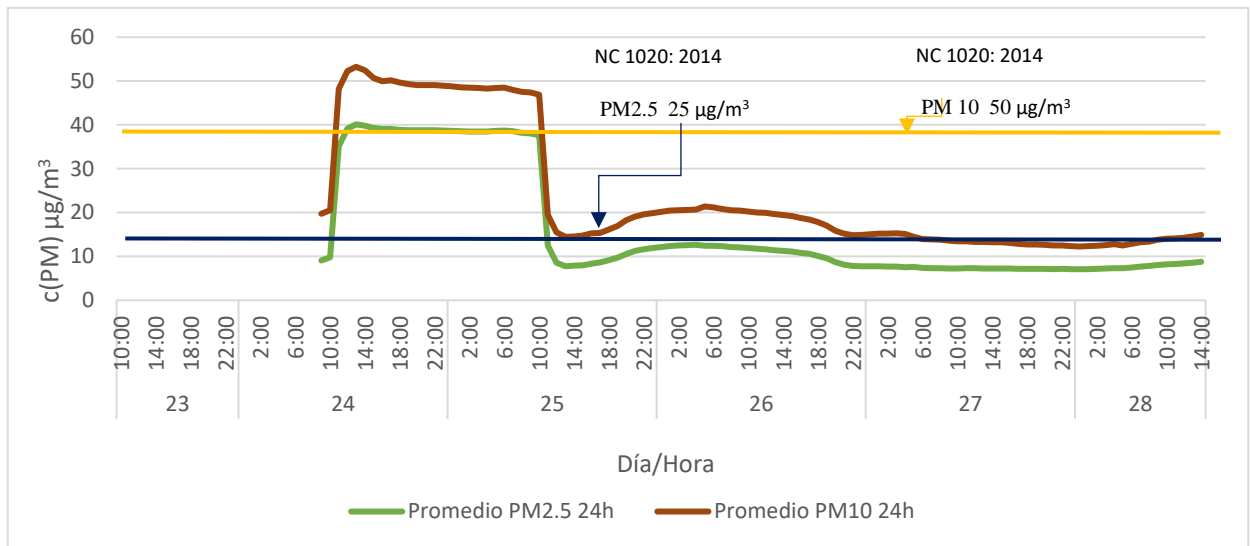


Figura 3.7 Concentración promedio diario de PM2.5 y PM10 en el punto de muestreo CESAM.

Para PM2.5 se obtuvo una desviación estándar igual a 12,742, con 40,126 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ como valor máximo y 7,074 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ como mínimo al igual, para PM10 se obtuvo una desviación estándar de 14,443, con valores máximos y mínimos de 53,241 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 7,074 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, esto significa que para los valores de PM10 los datos se extienden sobre un rango de valores más amplio.

El coeficiente de asimetría, positivo para ambos casos, muestra que para ambos contaminantes que la distribución es sesgada a la izquierda donde la mayor cantidad de datos se encuentra por debajo del valor medio y en el caso de la curtosis los valores son menores que cero por lo que la distribución es platicúrtica lo que significa que el rango de concentraciones de ambos contaminantes es estrecho, pero están dispersas en el tiempo.

CONCLUSIONES

- Los sitios y periodos de muestreo fueron seleccionados considerando las fuentes de emisión de PM y los criterios establecidos en la NC 111:2004 respectivamente.
- Las concentraciones de PM_{2.5} y PM₁₀ fueron medidas en tres sitios de la ciudad afectadas por diferentes fuentes usando el sensor OPC-N3. Los máximos valores durante todo el muestreo se registran en el sitio “CESAM” atribuible al evento del Sahara. Se muestran, además, otros incrementos que se corresponden con un aumento de las emisiones desde fuentes móviles en este propio sitio y a una fuente fija que afecta el sitio de muestreo “Consultorio”.

RECOMENDACIONES

- Extender los periodos y puntos de muestreo.
- Realizar comparaciones de las mediciones del sensor con otro tipo de captador y con otros estudios realizados en el mundo en ambientes similares.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Maqueira, F.P., *Integración y Test de Módulos de Medición de Partículas PM2.5 y PM10 para la valoración de la calidad del aire*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2018.
2. Organization, W.H., *Monitoring ambient air quality for health impact assessment*. 1999: Copenhagen: WHO Regional Office for Europe.
3. Boldo, E., *La contaminación del aire*. 2016: Instituto de Salud Carlos III.
4. Barja, B., et al., *Atmospheric particulate matter fractions measured at Camagüey, Cuba. Preliminary results*. *Óptica Pura y Aplicada*, 2011. **44**: p. 115-125.
5. Barja, B., et al., *Atmospheric particulate matter levels, chemical composition and optical absorbing properties in Camagüey, Cuba*. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2013. **15**(2): p. 440-453.
6. ESQUIVEL, E.M., et al., *Comportamiento de las fracciones fina y gruesa de PM10 en la estación de monitoreo de calidad del aire en Centro Habana. Campaña 2006-2007*. *Hig. Sanid. Ambient*, 2011. **11**: p. 820-826.
7. Noji, E.K., *Impacto de los desastres en la salud pública*. 2000: Pan American Health Org.
8. Inche, J., *Gestión de la calidad del aire: causas, efectos y soluciones*. Instituto de Investigación de Ingeniería industrial–UNMSM. Lima, Perú, 2004.
9. Romero Placeres, M., F. Diego Olite, and M. Álvarez Toste, *La contaminación del aire: su repercusión como problema de salud*. *Revista cubana de higiene y epidemiología*, 2006. **44**(2): p. 0-0.
10. Gutiérrez, I.J.M., “Contaminación atmosférica”, in

Facultad de Ingeniería Química. 2018, Universidad Tecnológica de La Habana

“José Antonio Echeverría”

11. Venegas, E., *Calidad del aire y sus efectos en la salud humana*. CEGESTI, 2010. **1**(149): p. 1-5.
12. De la Vega, A.L., *Sistema de monitoreo de contaminantes atmosféricos para aplicaciones agropecuarias*.
13. *Guía de la calidad del aire y educación ambiental*. 2021.
14. Victoria, E., *A Guide to the Sampling and Analysis of Air Emissions and Air Quality*. EPA Victoria, 2002.
15. *Environments and Contaminants | Criteria Air Pollutants*. 2015.
16. Fuzzi, S., et al., *Particulate matter, air quality and climate: lessons learned and future needs*. Atmospheric chemistry and physics, 2015. **15**(14): p. 8217-8299.
17. rovira, M.A., *BLOQUE I INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y METODOLOGÍA* 2005.
18. Joint, W. and W.H. Organization, *Health risks of particulate matter from long-range transboundary air pollution*. 2006, Copenhagen: WHO Regional Office for Europe.
19. Canales-Rodríguez, M.Á., et al., *Las partículas respirables PM10 y su composición química en la zona Urbana y rural de Mexicali, Baja California en México*. Información tecnológica, 2014. **25**(6): p. 13-22.
20. Aneja, V.P., et al., *Measurements and analysis of criteria pollutants in New Delhi, India*. Environment International, 2001. **27**(1): p. 35-42.

21. Areny, R.P., *Sensores y Acondicionadores de Señal 4a*. 2005: Marcombo.
22. Luna, A., Á. Talavera, and L. Cano, *Uso de sensores electroquímicos de bajo costo para el monitoreo de la calidad del aire en el distrito de San Isidro-Lima-Perú*. 2017.
23. Gerboles, M., A. Borowiak, and L. Spinelle, *Measuring air pollution with low-cost sensors*. Thoughts on the Quality of Data Measured by Sensors, 2017.
24. Commission, E., *Measuring air pollution with low-cost sensors. Thoughts on the quality of data measured by sensors*. 2020.
25. Baltuano, O., et al., *Evaluación de la operación de un medidor remoto de calidad del aire basado en sensores de lectura directa*. Revista de Investigación de Física, 2020. **23**(2): p. 1-6.
26. Parra, A.Q., M.J.Q. Vargas, and J.A.H. Martínez, *Caracterización fisicoquímica del material particulado fracción respirable PM_{2.5} en Pamplona-Norte de Santander-Colombia*. Bistua: revista de la facultad de Ciencias Basicas, 2010. **8**(1): p. 1-20.
27. Hernández-Domínguez, C., P. Álvarez-Muñoz, and J. Zapa-Cedeño, *Técnicas analíticas para el control de la contaminación ambiental*. Revista Ciencia UNEMI, 2016. **9**(20): p. 118-131.
28. Pérez, G., et al., *PIXE analysis and source identification of airborne particulate matter collected in downtown Havana City*. 2009.
29. Pérez, G., et al., *First Study of Airborne Particulate Pollution using PIXE Analysis in Havana City, Cuba*. International Journal of PIXE, 2009. **19**(03n04): p. 157-166.

30. Pérez, G., et al., *Caracterización Másica de Partículas Finas y Gruesas de Aerosol Urbano*. 2010.
31. Pinnera, I., et al., *Identifying sources of atmospheric fine particles in Havana City using Positive Matrix Factorization technique*. 2011.
32. Ugalde, F.A. and J.F. Maldonado, *Veinticinco años de estudio de la contaminación atmosférica mediante microanálisis de rayos x inducidos por partícula (pixe)*.
33. Zayas, G.P., et al., *Use of PIXE analysis to study urban atmospheric aerosols from downtown Havana City*. Nucleus, 2009(46).
34. Arroyo, P., et al., *Electronic nose with digital gas sensors connected via Bluetooth to a smartphone for air quality measurements*. Sensors, 2020. **20**(3): p. 786.
35. VARONA, M.M., et al., *Comportamiento de la fracción de PM10 en zona cercana a un molino de arroz*.
36. Díaz, J.J., et al., *Tecnificación de un Ciclón para Material Particulado y Tratamiento de Gases Technification of a Cyclonic Purifier for Particulate Matter and Gas Treatment*.
37. Moreno Jiménez, A. and D. Méndez Arranz, *La concentración de partículas en el aire: análisis estadístico de la relación espacial entre medidas de superficie y del sensor MODIS para dos tipos de tiempo en la Comunidad de Madrid*. 2020.
38. Campos, M.A., C. Bonilla Toro, and M. Vanegas, *Red inalámbrica de sensores para la medición de temperatura, humedad y material particulado en la compañía Olaflex SAS*. 2016.

39. Salazar, M.Á.L. *Determinación de la Concentración del Material Particulado PM10 en zonas de la Universidad del Atlántico mediante el Uso de un Sensor Dispuesto en un Vehículo Aéreo no Tripulado.* in *Congreso Colombiano y Conferencia Internacional de Calidad del Aire y Salud Pública.* 2019.
40. Salazar Quispe, J., *Diseño de un prototipo portátil para la detección del monóxido de carbono y material particulado en las actividades mineras subterráneas.* 2020.
41. RICO SOTO, K.G., *Sensores de bajo costo para el monitoreo de la calidad del aire en la ciudad de Hermosillo, Sonora.* 2018.
42. Diez, S., et al., *Allin-Wayra: una estación experimental para el monitoreo continuo de la calidad del aire empleando sensores de bajo costo.* *Rev. Fac. Cs. Exactas, Físicas y Naturales (UN Córdoba),* 2018. **5:** p. 45-49.
43. Campos Falcon, E.V., *Construcción, calibración y validación de dispositivo de registro de datos de bajo coste para el monitoreo de material particulado respirable.* 2017.
44. Oyarzún, M., *Contaminación aérea y sus efectos en la salud.* *Revista chilena de enfermedades respiratorias,* 2010. **26(1):** p. 16-25.
45. Olmo, N.R.S., et al., *A review of low-level air pollution and adverse effects on human health: implications for epidemiological studies and public policy.* *Clinics,* 2011. **66(4):** p. 681-690.
46. Workowski, K. and G. Bolan, *Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades. Enfermedades de transmisión sexual guías de tratamiento,* 2015. *MMWR recom Rep,* 2015. **64:** p. 1.

47. Ale, T.M.L., K. Moreno-Salazar, and B. Luque-Zúñiga, *Perspectiva del COVID-19 sobre la contaminación del aire*. Revista de la Sociedad Científica del Paraguay, 2020. **25**(2): p. 155-182.
48. Félix-Arellano, E.E., et al., *Revisión rápida: contaminación del aire y morbimortalidad por Covid-19*. Salud publica de Mexico, 2020. **62**(5): p. 582-589.
49. Román, O., M.J. Prieto, and P. Mancilla, *Contaminación atmosférica y daño cardiovascular*. Revista médica de Chile, 2004. **132**(6): p. 761-767.
50. Bacardit, N.S., et al., *Contaminación atmosférica, riesgo cardiovascular e hipertensión arterial*. Hipertensión y riesgo vascular, 2018. **35**(4): p. 177-184.
51. Cohen, A.J., et al., *Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015*. The Lancet, 2017. **389**(10082): p. 1907-1918.
52. Organization, W.H., *Review of evidence on health aspects of air pollution: REVIHAAP project: technical report*. 2021, World Health Organization. Regional Office for Europe.
53. !!! INVALID CITATION !!! (Bernstein, Alexis et al. 2004, Pöschl 2005).
54. Chen, C., et al., *The microbiota continuum along the female reproductive tract and its relation to uterine-related diseases*. Nature communications, 2017. **8**(1): p. 1-11.
55. Kim, H.J., et al., *Predictive and prognostic biomarkers of respiratory diseases due to particulate matter exposure*. Journal of cancer prevention, 2017. **22**(1): p. 6.

56. Jaramillo Meneses, L.M., *Estudio de la exposición a material particulado 2.5 a lo largo de corredores viales principales en la ciudad de Bogotá*. 2015, Bogotá-Uniandes.
57. FABRICIO, G.G.W., *PROPUESTA PARA LA EVALUACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO MP2. 5 μ m Y MP10 μ m GENERADO POR FUENTES FIJAS Y MÓVILES EN LA AVENIDA SAN JUAN BOSCO SECTOR FERTISA SUR DE GUAYAQUIL*. 2019, UNIVERSIDAD AGRARIA DEL ECUADOR.
58. Folino, A.F., et al., *Individual exposure to particulate matter and the short-term arrhythmic and autonomic profiles in patients with myocardial infarction*. European heart journal, 2009. **30**(13): p. 1614-1620.
59. Yao, Y., et al., *Association of particulate matter pollution and case fatality rate of COVID-19 in 49 Chinese cities*. Science of the Total Environment, 2020. **741**: p. 140396.
60. Mehmood, K., M.I. Saifullah, and M.M. Abrar, *Can exposure to PM2. 5 particles increase the incidence of coronavirus disease 2019 (COVID-19)?* The Science of the Total Environment, 2020. **741**: p. 140441.
61. Zhu, Y., et al., *Association between short-term exposure to air pollution and COVID-19 infection: Evidence from China*. Science of the total environment, 2020. **727**: p. 138704.
62. Ortinez, A., et al., *Coronavirus SARS-CoV-2, contaminación atmosférica y riesgos a la salud*.
63. Contini, D. and F. Costabile, *Does air pollution influence COVID-19 outbreaks?* 2020, Multidisciplinary Digital Publishing Institute.

64. Wu, X., et al., *Exposure to air pollution and COVID-19 mortality in the United States*. MedRxiv, 2020.
65. Travaglio, M., et al., *Links between air pollution and COVID-19 in England*. Environmental Pollution, 2021. **268**: p. 115859.
66. Estela, L.L., *Servicios meteorológicos para enfrentar la Covid-19 en Cuba: análisis de tres Casos de Estudio: Meteorological services to face Covid-19 in Cuba: analysis of three Study Cases*. Revista Cubana de Transformación Digital, 2020. **1**(3): p. 51-66.
67. Amaya, M.I., et al., *PROTOCOLO PARA EL MONITOREO Y SEGUIMIENTO DE LA CALIDAD DEL AIRE 2008*.
68. Martines López, E. and L. Cortés, *ANALISIS DE LOS COEFICIENTES ESTADÍSTICOS DE FORMA PARA DETERMINAR LA NO LINEALIDAD DE UN MODELO DE MEDICIÓN*.
69. Villavicencio, J., *Introducción a series de tiempo*. Puerto Rico, 2010.
70. Sarmiento, E.M., *Predicción con series de tiempo y regresión*. Panorama, 2008. **2**(4): p. 2.
71. Jiménez Gómez, A.E. and L.F. Melo Velandia, *Modelación de la asimetría y la curtosis condicionales en series financieras colombianas*. Revista Desarrollo y Sociedad, 2016(76): p. 273-321.
72. García, P.F. and G.V. Seco, *Efecto de la curtosis y de las matrices de dispersión en los diseños de medidas repetidas*. REMA, 1997. **2**(2): p. 7-22.

73. Fernández García, M.P. and G. Vallejo Seco, *Efecto de la curtosis y de las matrices de dispersión en los diseños de medidas repetidas*. REMA, 2 (2), 1997.
74. CALIDAD DEL AIRE — CONTAMINANTES —
CONCENTRACIONES MÁXIMAS ADMISIBLES Y VALORES
GUÍAS EN ZONAS HABITABLES 2014.
75. Arq. Gladys M. Moner Rodríguez, I., et al., *Perspectivas del ambiente urbano, Geo Santa Clara*. 2008.
76. Echabautez Quispe, P., *Las variables meteorológicas y su influencia en la dispersión de material sedimentable emitido por las ladrilleras. Nievería-Huachipa, 2017*. 2017.
77. Molina Esquivel, E., et al., *Crisis de asma y enfermedades respiratorias agudas: Contaminantes atmosféricos y variables meteorológicas en Centro Habana*. Revista Cubana de Medicina General Integral, 2001. 17(1): p. 10-20.
78. Vallejo, A.I.C., et al., *Evaluación de la concentración de PM10 y sus posibles implicaciones a nivel salud en dos puntos de Bogotá DC*. Ingenierías USBMed, 2020. 11(1): p. 31-43.
79. ANUARIO
ESTADÍSTICO DE
SANTA CLARA. 2016.
80. Soroka, E.G., *Indoor and Outdoor Measurements of Particulate Matter with the Low-Cost Optical Sensor OPC-N3*. 2020.
81. Rodríguez, I.E.H., *Diseño de un sistema de medición y monitoreo de variables asociadas a calidad del aire in Facultad de Ingeniería Eléctrica*

Departamento de Control Automático 2020, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

82. Bezantakos, S., et al., *Qualification of the Alphasense optical particle counter for inline air quality monitoring*. *Aerosol Science and Technology*, 2020. **55**(3): p. 361-370.
83. Cruz, A.A., *Cuantificación de dióxido de azufre del aire ambiental en la zona de protección sanitaria de una empresa recapadora de neumáticos mediante sensores de bajo costo*. 2021, Universidad Central Martha Abreus de las Villas.