Ciencias de la Tierra y el Espacio, enero-junio, 2022 Vol.22, No. 1, pp. 12-29 ISSN 1729-3790

Potencialidades de la plataforma Copérnico para el monitoreo y evaluación de eventos regionales de contaminación atmosférica

Bárbara-Liz-Miravet-Sánchez[1], Elieza-Meneses-[1], Alberto-Enrique-García-Rivero[2], Alina-Roing-Rassi[1]

[1]*Cubaenergía, Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía, CITMA, La Habana, Cuba,*
[2]*Escuela Profesional de Geografía, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.*
Email: liz@cubaenergia.cu
ORCID: 0000-0002-9636-3169

Recibido: junio 2022	*Aceptado: junio 2022*

Resumen

Los satelitales representan una opción de bajo costo para el monitoreo atmosférico complementando las redes terrestres. El programa COPERNICO, con el sentinel-5p Tropomi es considerado el espectrómetro de monitoreo atmosférico más avanzado a nivel mundial, con una alta resolución espacial y temporal. El trabajo presenta las potencialidades que nos brinda COPERNICO para el diagnóstico y pronóstico de la calidad de aire y su comparación con otras herramientas como el HYSPLIT y los datos de la AQM65. Como resultado se pudo corroborar, en el marco de la influencia de la erupción del volcán Cumbre Vieja, que las trayectorias simples para tres alturas de la capa limite planetaria (1500, 1000, 500) de HYSPLIT, coincide con la de 500 metros de altitud del sentinel 5P de Copérnico y la AQM65 para el caso de Cuba y las observaciones realizadas por Copérnico, coincidieron en los puntos de máximo pico para las concentraciones de NO_2.

Palabras clave: monitoreo atmosférico, Copérnico, Sentinel 5P, HYSPLIT, AQM65

Potential of the Copernicus platform for the monitoring and assessment of regional atmospheric pollution events

Abstract

Satellites represent a low-cost option for atmospheric monitoring, complementing terrestrial networks. The COPERNICO program, with the Tropomi sentinel-5p, is considered the most advanced atmospheric monitoring spectrometer in the world, with high spatial and temporal resolution. The work presents the potential that COPERNICO offers us for the diagnosis and forecast of air quality and its comparison with other tools such as HYSPLIT and AQM65 data. As a result, it was possible to corroborate, within the framework of the influence of the Cumbre Vieja volcano eruption, that the simple trajectories for three heights of the planetary boundary layer (1500, 1000, 500) of HYSPLIT, coincide with that of 500 meters of altitude. of Copernicus' 5P sentinel and the AQM65 for the case of Cuba and the observations made by Copernicus, coincided in the points of maximum peak for NO_2 concentrations.

Keywords: atmospheric monitoring, Copernicus, Sentinel 5P, HYSPLIT, AQM65

1. Introducción

Algunas de las preocupaciones ambientales más importantes de la actualidad se relacionan con el cambio en la estructura y composición de la atmósfera. La creciente concentración de gases de efecto invernadero y el efecto de enfriamiento de los aerosoles son impulsores importantes de un clima cambiante, pero el alcance de su impacto a menudo sigue siendo incierto.

Las partículas constitutivas de los aerosoles emitidas directamente (primarias) o formadas en la atmósfera (secundarias) se encuentran distribuidas en un amplio rango de formas y tamaños que abarca desde los nanómetros hasta los micrómetros. La presencia de aerosoles tanto primarios como secundarios a través de diversas escalas espacio-temporales está asociada con problemas ambientales locales, regionales y globales.

Las partículas pueden llegar a ser un elemento importante como factor contaminante en la atmósfera de una ciudad, una zona o sitio y pueden estar depositadas sobre el suelo, aunque generalmente flotan en el aire. El hecho de flotar en el aire se favorece principalmente debido a su tamaño ya que son muy pequeñas, tanto que para hablar de su medida se utiliza el término micrómetro o micra, como es el caso de PM_{10} para menores o igual de 10 μm y $PM_{2,5}$ para menores o igual que 2,5 μm. Estas dimensiones las hacen ser sumamente ligeras, aspecto que se combina con su forma y con diversos factores de tipo climático entre los cuales está la temperatura del ambiente y los vientos.

En la superficie de la Tierra, los aerosoles, el ozono y otros gases reactivos como el dióxido de nitrógeno determinan la calidad del aire que nos rodea, ellos afectan la salud humana, la esperanza de vida, la salud de los ecosistemas y la estructura del entorno construido. Las distribuciones de ozono en la estratosfera influyen en la cantidad de radiación ultravioleta que llega a la superficie. El polvo, la arena, el humo y los aerosoles volcánicos afectan la operación segura de los sistemas de transporte y la disponibilidad de energía de la generación solar, la formación de nubes y lluvias y la teledetección por satélite de la tierra, el océano y la atmósfera.

Si bien existe un avance del conocimiento sobre la contaminación atmosférica en esta área, todavía es necesario estudiar otros componentes clave de los aerosoles atmosféricos sobre todo aquellos que son marcadores de los efectos regionales y globales:

- Los niveles de aerosol marino en la atmósfera tienen un rol importante en varios procesos atmosféricos físicos y químicos a escala urbana, regional y global. A pesar de ello, la investigación sobre la contaminación atmosférica local, tradicionalmente más preocupada por los impactos sobre la salud humana, prestó menor atención a este componente relativamente benigno. Sin embargo, la perspectiva reciente sobre el rol del cloro y los óxidos de nitrógeno como mediadores de la producción de ozono (Osthoff et al., 2008) reviste preocupación en zonas urbanas costeras.

- La desertificación es un problema ambiental y socio-económico de alcance mundial. Uno de los procesos que desencadena la desertificación es la erosión y está asociado con la emisión y transporte de aerosoles a grandes distancias. Estos aerosoles producen una serie de impactos sobre el sistema climático causando forzamiento radiactivo y alteración de los ciclos biogeoquímicos e hidrológicos.

- La quema de biomasa a cielo abierto, si bien puede producirse por causas naturales (rayos) proviene principalmente del accionar humano. En la región existen áreas que suelen tener mayor densidad de quemas y las emisiones resultantes se transportan a grandes distancias.

- América Latina y el Caribe es una región de alto riesgo volcánico. Si bien las ciudades andinas reciben la mayor cantidad de la masa de partículas emitidas, las partículas más finas se transportan a grandes distancias e impactan en la calidad del aire de toda la región.

- Las nubes de polvo del Sahara han afectado la región del Caribe desde hace muchos años. Sin embargo, han sido los avances científicos y tecnológicos los que han permitido su visualización.

Para abordar estas preocupaciones ambientales, se necesitan datos e información procesada. El monitoreo ambiental constituye una herramienta efectiva para aportar datos de contaminación atmosférica, sin embargo, estos no están siempre disponible por la insuficiente infraestructura de monitoreo que existe en muchos países, principalmente aquellos en vías de desarrollo.

Las mediciones in situ son herramientas imprescindibles para evaluar los niveles de material particulado $PM_{2,5}$ y PM_{10} que caracterizan la calidad del aire de una zona, aunque para que estas sean eficientes, se debe contar con una red de estaciones de monitoreo de calidad del aire que cubran el territorio con la densidad establecida. Sin embargo, se conoce de antemano que las estaciones de monitoreo de calidad del aire son costosas, a lo que se le añaden los gastos anuales en operación y mantenimiento.

La modelación es otra de las vías para evaluar la contaminación atmosférica. El uso de modelos tiene particular importancia en Cuba debido a que la capacidad de las estaciones de monitoreo disponibles es extremadamente limitada. Actualmente en el país se dispone de la NC 1059: 2014, que establece un enfoque por niveles para realizar modelaciones de la contaminación atmosférica. Esta norma propone en su nivel más refinado el uso del sistema de modelos AERMOD, de uso reglamentado por muchos países y de alcance menor a 50 km (EPA, 2004).

También se han implementado con resultados consistentes, modelos regionales de corto alcance, entre decenas de metros y 300 km, como el CALPUFF (Scire et al., 2000), que incluyen una química sencilla, y utiliza una rejilla meteorológica tridimensional que es necesaria para lograr alta precisión en casos de condiciones meteorológicas complejas. A pesar de que la modelación constituye una herramienta menos costosa que las mediciones. Son necesario datos de las fuentes contaminantes y de la meteorología local, no siempre disponible.

Los datos e imágenes satelitales por su parte, son de gran utilidad para el diagnóstico y pronóstico, cualitativo y cuantitativo de la calidad de aire, y ante eventos de escalas regionales, locales y global, tan importantes como incendios forestales y el polvo del Sahara, por solo mencionar algunos. Aunque estos no presentan la misma precisión que una medición real, pueden proveer de información necesaria que ayude al diagnóstico de la contaminación atmosférica pues aporta una visión global de la zona de estudio, indicando inclusive las fuentes de contaminación y donde se deben enfocar aquellas medidas de prevención y control.

El empleo de datos e imágenes satelitales se considera una de las opciones menos costosas y la información que estos brindan complementa la falta de datos causado por la falta de infraestructura de una red de monitoreo, además el uso de datos satelitales es aceptable para estimar la concentración de partículas por sus características físicas ya que pueden ser detectadas a partir del espectro electromagnético. A pesar de su limitación temporal, las imágenes satelitales aportan con una visión única sobre la calidad del aire.

Los datos e imágenes satelitales nos proveen de mucha información atendiendo diferentes aspectos, como:
- Desarrollo y planificación urbana.
- Mapeo / planificación / administración de uso de suelos.
- Infraestructura, teléfono, alcantarillado, agua potable, electricidad, gas etc.
- Alineamientos, carreteras, canales, tuberías etc.
- Recursos naturales – forestales, petróleo, minería etc.
- Investigación ambiental: cuencas hidrológicas, planos de inundación, vegetación.
- Agricultura: "agricultura de precisión," clasificación de cultivos etc.

- Negocios o geografía empresarial: bienes y raíces, turismo, seguimiento de vehículos, espionaje industrial etc.
- Respuestas rápidas a desastres naturales, emergencias; como incendios, erupciones volcánicas, o de carácter meteorológico como ciclones.
- Asuntos militares, tales como planeación, simulación, monitoreo, mapeo de fronteras y otras áreas sensitivas.
- Análisis químico de la atmósfera.

En la actualidad se incrementan el número de satélites que aportan datos de contaminación atmosférica entre ellos se destaca los del programa COPERNICOS, iniciativa de la Unión Europea y la Agencia Espacial Europea, justamente el trabajo tiene el *objetivo de establecer las potencialidades que nos brinda este programa para el diagnóstico y pronóstico de la calidad de aire y comparar con otras herramientas.*

2. Materiales y Métodos

A continuación, se abordan los principios básicos sobre el funcionamiento y manejo de la plataforma Copérnico, base fundamental del presente trabajo. El programa Copérnico anteriormente llamado Global Monitoring for Environment and Security, también conocido como Copernicos, está dirigido conjuntamente por la Agencia Espacial Europea (ESA) y por la Unión Europea a través de la Agencia Europea de Medio Ambiente, que pretende lograr una completa, continua y autónoma capacidad de observación terrestre de alta calidad, cuyos resultados son accesibles libremente por la comunidad científica o cualquier otra persona interesada.

2.1 El programa Copérnico

El objetivo general es proveer de información exacta, fiable y continua, para, entre otras cosas, mejorar la gestión y conservación del medio ambiente, comprender y mitigar los efectos del cambio climático y asegurar la seguridad civil. Agrupa diferentes fuentes de información de satélites ambientales y bases terrestres para proporcionar una visión global del «estado de salud» de la Tierra. El programa inicialmente se llamó Global Monitoring for Environment and Security (GMES) (Comisión Europea, 2021).

La información geoespacial proporcionada por Copérnico se agrupa en seis temáticas: la tierra, los océanos, respuesta a emergencias, la atmósfera, seguridad y cambio climático. Además, el programa Copérnico se apoya en tres pilares: el segmento espacial, compuesto por los satélites junto con su infraestructura terrestre; las medidas in situ, red de información terrestre y aerotransportada que recolecta información sobre los océanos, la superficie de los continentes y la atmósfera; y los servicios para los usuarios.

Sentinel es un proyecto multisatelite desarrollado por ESA en el marco del programa Copérnico. La Agencia Espacial Europea, desde el año 2014 viene poniendo en órbita una serie de misiones satelitales denominadas Sentinels. Desde 2014, estos satélites suministran datos de manera operativa para numerosas aplicaciones de manera continua, incluyendo entre otros la recopilación de información acerca de agricultura de precisión, movimiento de suelos, monitorización de algas, gestión del agua, monitorización de bosques, monitorización del clima, etc.

Cada misión Sentinel está formada por una constelación de dos satélites, lo que permite cumplir los requisitos de cobertura y frecuencia de observación y ofrecer un conjunto de datos para los servicios del programa Copérnico. Estas misiones transportan las tecnologías más avanzadas para la observación de la Tierra, como los instrumentos radar o multiespectrales que permiten monitorizar cualquier cambio en el terreno, en los océanos o en la atmósfera.

Los Sentinel ya proporcionan imágenes ópticas y de radar de alta resolución de nuestro planeta y seguirán haciéndolo en el futuro. En particular:

- Sentinel-1 es una misión de imágenes de radar diurnas y nocturnas en órbita polar y para todo tipo de clima para servicios terrestres y oceánicos. Sentinel-1A fue lanzado el 3 de abril de 2014 y Sentinel-1B el 25 de abril de 2016.
- Sentinel-2 es una misión de obtención de imágenes de alta resolución multiespectrales en órbita polar para la vigilancia terrestre, con el fin de obtener, por ejemplo, imágenes de la vegetación, la cubierta del suelo y el agua, las vías navegables interiores y las zonas costeras. El Sentinel-2 también puede proporcionar información para los servicios de emergencia. El Sentinel-2A se puso en marcha el 23 de junio de 2015 y el Sentinel-2B el 7 de marzo de 2017.
- Sentinel-3 es una misión de instrumentos múltiples para medir la topografía de la superficie del mar, la temperatura de la superficie del mar y de la tierra, el color del océano y el color de la tierra con una precisión y fiabilidad de alto nivel. La misión presta apoyo a los sistemas de predicción oceánica, así como a la vigilancia ambiental y climática. Sentinel-3A fue lanzado el 16 de febrero de 2016 y Sentinel-3B el 25 de abril de 2018.
- Sentinel-4 es una carga útil dedicada a la vigilancia atmosférica que se embarcará en un satélite Meteosat de tercera generación (MTG-S) en órbita geoestacionaria.
- Sentinel-5 es una carga útil que monitorizará la atmósfera desde la órbita polar a bordo de un satélite MetOp de segunda generación. La misión del satélite precursor Sentinel-5 está dedicada a la vigilancia atmosférica. El satélite fue lanzado el 13 de octubre de 2017.
- La misión Sentinel-6 lleva un altímetro de radar para medir la altura global de la superficie del mar, principalmente para la oceanografía operacional y para los estudios climáticos.

El Servicio de Vigilancia Atmosférica de COPERNICOS da soporte a numerosas aplicaciones en diversos ámbitos, como la salud, la vigilancia ambiental, las energías renovables, la meteorología y la climatología. El servicio se centra en cinco áreas principales: calidad del aire y composición de la atmósfera; capa de ozono y radiación ultravioleta; emisiones y flujos de superficie; radiación solar, y forzamiento climático. Es de interés para el presente trabajo, el uso del Sentinel-5P.

2.1.1 Sentinel-5P

Sentinel-5P monitorea gases y partículas en nuestra atmósfera que afectan el cambio climático y la calidad del aire. El primer centinela atmosférico desarrollado por los Países Bajos y la European Space Agency (ESA*)* como parte del programa COPERNICOS. Lanzado en octubre de 2017, reporta datos desde julio de 2018. Los datos del Sentinel-5P están disponibles gratuitamente.

Las aplicaciones de este satélite son:

1- Pronóstico y evaluación de la calidad del aire,
2- Monitoreo de emisiones,
3- Registros de datos climáticos,
4- Índice UV (capa de ozono) y
5- Detección de cenizas volcánicas para la seguridad de la aviación

TROPOMI monitorea los siguientes contaminantes:

- Gas metano de efecto invernadero (CH_4)
- Monóxido de carbono (CO)
- Ozono (O_3)
- Dióxido de nitrógeno (NO_2)
- Dióxido de azufre (SO_2)

- Formaldehídos
- Capacidad mejorada para detectar nubes y partículas finas (aerosoles) y su altitud

El TROPOMI es el sensor de Sentinel-5P (Precursor). La matriz bidimensional que se muestra en la **"Fig. 1"**, explica el principio de medición del sensor. El swath, línea perpendicular a la dirección de vuelo es la detección de cada pixel que forman con el guía. El espectrómetro trabaja con 720 longitudes de onda, se consideran resoluciones espectrales muy altas. Un swath de 2600 km, se considera como satélite operacional, para tener cobertura global diaria de 2600 km, significa que en un solo día da datos de calidad de aire en todo el planeta.

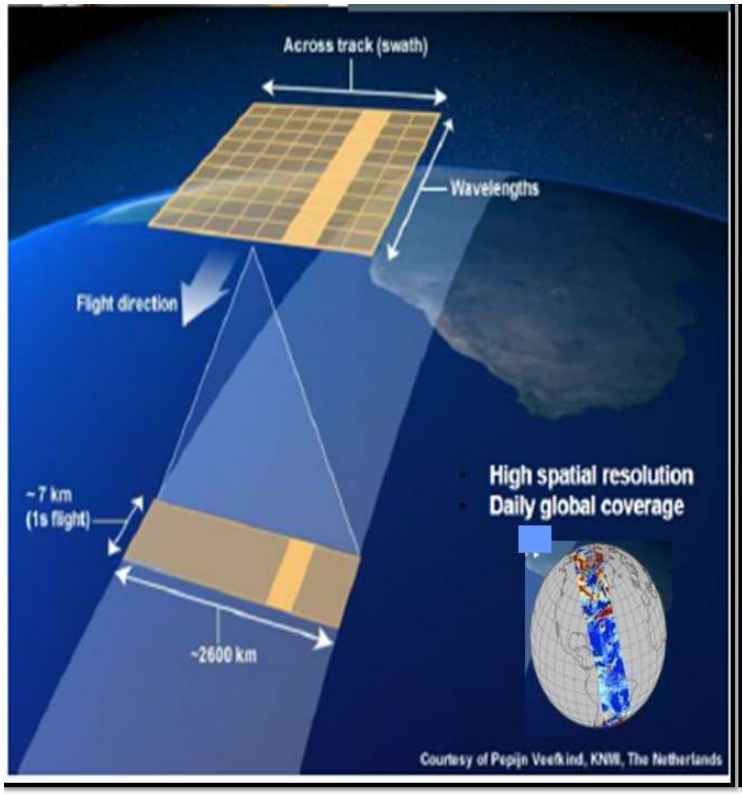


Fig. 1. Principio de medición del TROPOMI
(Veefkindet al., 2012)

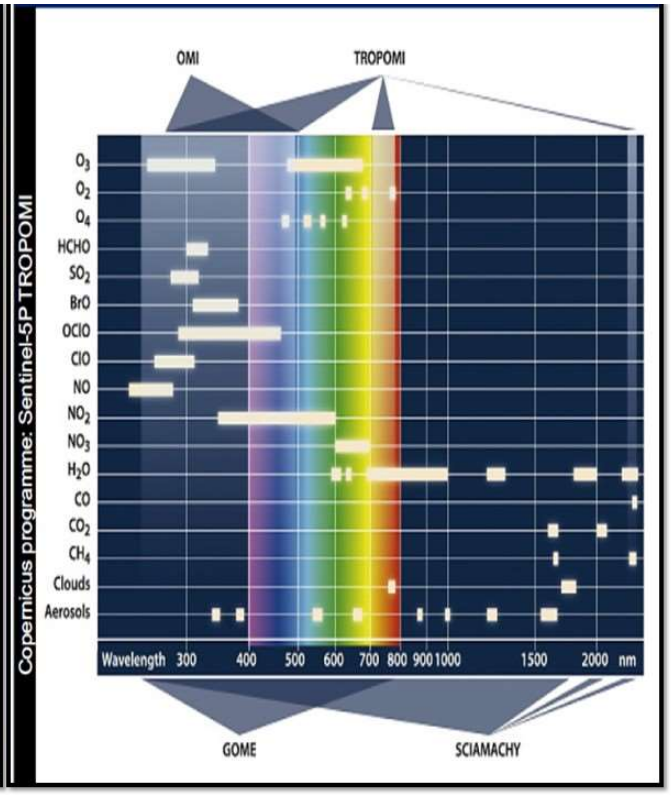


Fig. 2 Rangos espectrales del TROPOMI y los instrumentos OMI, SCIAMACHY y GOME

El eje vertical (ordenada) de la **"Fig. 2"**, se encuentran todos los gases que se pueden detectar a través del sensor TROPOMI, nubes y aerosoles, en las abscisas se puede detectar esos gases en la zona del espectro, estamos hablando del ultravioleta para longitudes de onda inferiores a 0,3 micras y llegamos más allá de las 2 micras. Como se puede observar el metano (CH_4) aparece con una señal muy débil para observarlo, tiene muy poca zona del espectro, donde tiene los picos fuertes de la absorción para aplicarle el algoritmo de observación diferenciado y es justamente el TROPOMI el que lo intenta.

Las 720 longitudes de onda del TROPOMI salen de 4 bandas como aparece en la **"Fig. 3"**

1- Ultravioleta (UV) con 2 intervalo
2- Ultravioleta visible (UVIS) con 2 intervalo
3- Infrarrojo cercano (NIR) con 2 intervalo
4- SWIR con 1 intervalo

	UV		UVIS		NIR		SWIR
Detector band	1	2	3	4	5	6	7
Spectral range (nm)	270–300	300–320	310–405	405–500	675–725	725–775	2305–2385
Spectral resolution (nm)	1.0	0.5	0.55	0.55	0.5	0.5	0.25
Spectral sampling (nm)	0.065	0.065	0.2	0.2	0.1	0.1	<0.1
Spatial sampling (km)	21 × 28	7 × 7	7 × 7	7 × 7	7 × 7	7 (1.8)[c] × 7	7 × 7
Detector binning factor	16	4	4	4	4	4 (1)	1
Minimum signal-to-noise	100–800[a]	90–700[a]	800–1000[a]	800–1000[a]	100–500[a]	100–500[a]	100–120[b]

[a] The minimum SNR is specified for a scene with an albedo of 2% and the Sun in zenith.
[b] The minimum SNR is specified for a scene with an albedo of 5% and solar zenith angle of 70^0.
[c] The spatial sampling of Band 6 can be reduced to improve the spatial coregistration with the other bands.

Fig. 3. Rangos espectrales de medición del TROPOMI

El tamaño del pixel es de 7 x 3,5 km^2 para todas las bandas espectrales con excepción para UVI (7 x 28 km^2) y para SWIR (7 x 7 km^2).

El reto y potencialidad está en la resolución espacial, que se obtiene con el TROPOMI es de 7 km x 7 km, esto se logra por primera vez para un sensor atmosférico.

2.1.2 HYSPLIT

Se utilizó el HYSPLIT es un sistema completo para calcular trayectorias de porciones simples de aire, así como simulaciones complejas de transporte, dispersión, transformación química y deposición. Continúa siendo uno de los modelos de dispersión y transporte atmosférico más utilizados en la comunidad de ciencias atmosféricas. Una aplicación común es un análisis de trayectoria inversa para determinar el origen de las masas de aire y establecer relaciones fuente-receptor, **"Fig. 4".**



Fig. 4. Modelo HYSPLIT

HYSPLIT también se ha utilizado en una variedad de simulaciones que describen el transporte atmosférico, la dispersión, y la deposición de contaminantes y materiales peligrosos. Algunos ejemplos de las aplicaciones incluyen el seguimiento y la previsión de la liberación de material radiactivo, humo de incendios forestales, polvo arrastrado por el viento, contaminantes de diversas fuentes de emisión estacionarias y móviles, alérgenos y cenizas volcánicas.

La aplicación en línea tienes las opciones de simular solamente las trayectorias y/o correr el modelo de dispersión donde se simula las emisiones de fuentes naturales como volcanes.

2.2 Datos de estaciones automáticas de calidad de aire (AQM65)

En el caso de la República de Cuba, se cuenta con algunas estaciones que de una forma u otra monitorean variables relacionados con la composición atmosférica. Entre ellas se destaca la del Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía (CUBAENERGÍA), ubicada en **"Fig. 5"**, la cual ha sido la fuente de los datos que se utilizan en el presente estudio, asumiendo una representatividad espacial de un radio de 50 km **"Fig. 6"** y el periodo de tiempo de abril 2019 al 2020 para las variables CO_2, NO_2, PM_{10} y SO_2.



Fig. 5. Estaciones automáticas de calidad de aire (AQM)

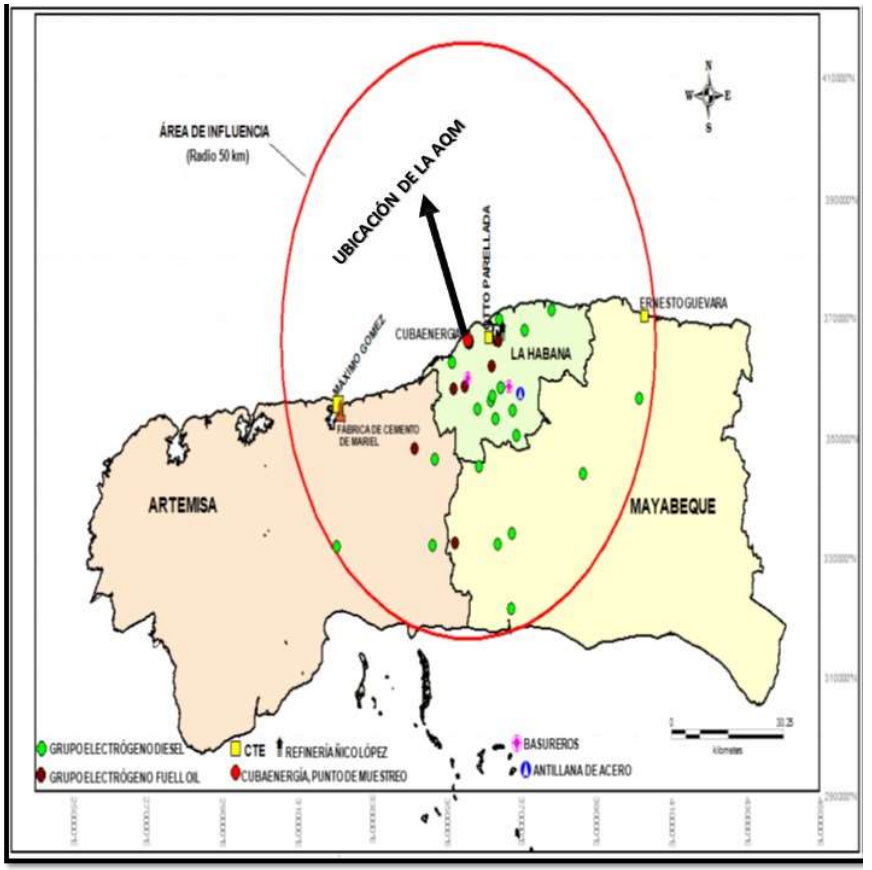


Fig. 6. Ubicación y área de influencia de la AQM65

2.3 Comparación de la información satelital, el Modelo HYSPLIT y los datos de la AQM65

Como parte final se estableció una comparación entre la información brindada por el Modelo HYSPLIT, el sentinel 5p de COPÉRNICO y los valores de la AQM65, durante el periodo de influencia de la erupción volcánica de septiembre 2021 en las Islas Canarias, La Palma y su repercusión de la composición atmosférica en los días posteriores.

3. Resultados y discusión

A continuación, se presentan los principales resultados relacionados con las comparaciones de las diversas fuentes de información sobre la influencia de la explosión volcánica sobre la composición de la atmósfera y las mediciones de la AQM sobre el archipiélago cubano.

3.1 Contribución de la aplicación del HYSPLIT Y COPÉRNICO, caso de estudio: Volcán Cumbre Vieja 2021

La erupción volcánica de Cumbre Vieja, en La Palma en el año 2021 **"Fig.7"** se inició el 19 de septiembre en el paraje de Cabeza de Vaca, en la isla de La Palma, perteneciente al archipiélago atlántico de Canarias. La erupción se detuvo el 13 de diciembre tras 85 días de actividad, siendo la erupción histórica más larga registrada en la isla y tercera en el archipiélago.

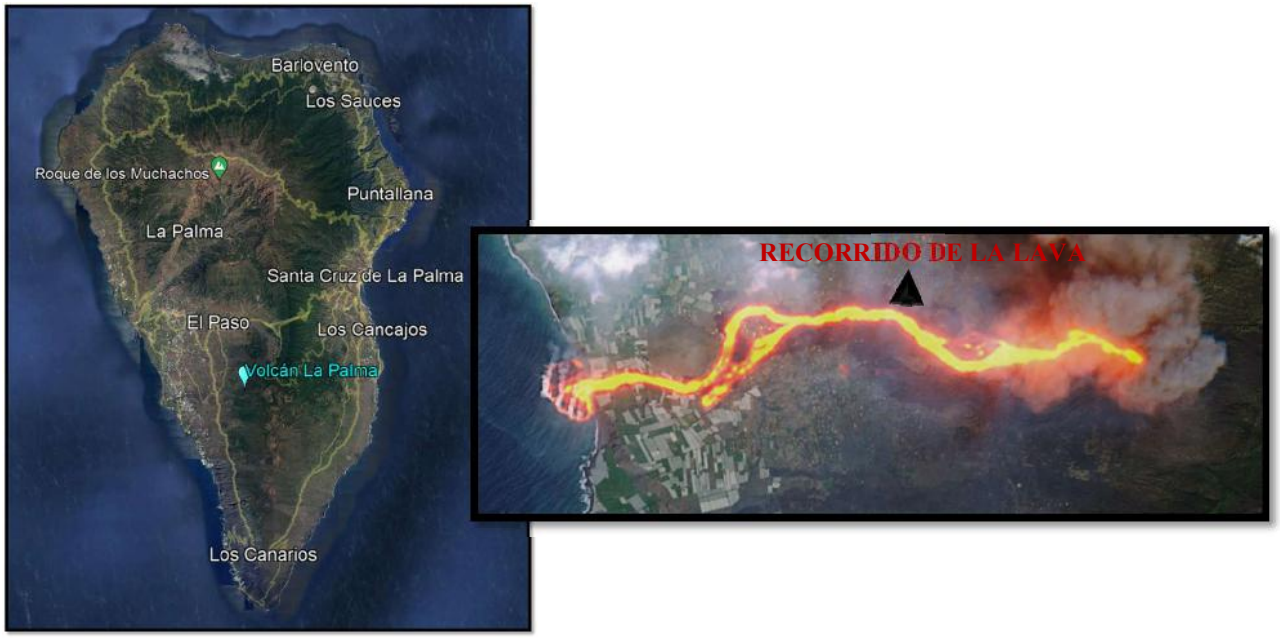


Fig. 7. Volcán Cumbre Vieja, La Palma, Islas Canarias

Las toneladas de ceniza que ha emitido el volcán Cumbre Vieja desde que comenzaron las erupciones el 19 de septiembre no es el único impacto ambiental que ha dejado. Uno de los efectos que más se ha propagado es el dióxido de azufre, que es el gas incoloro que libera el volcán.

Pero las consecuencias de este gas van más allá. El Instituto Volcanológico de Canarias (Involcan) calcula que Cumbre Vieja ha emitido al menos 250.000 toneladas de dióxido de carbono. Esta cantidad es tanta que ha llegado hasta el norte de África y el Caribe, puntualmente a Puerto Rico y a República Dominicana, como lo detectó el Satélite Copernicos/Sentinel de la Agencia Espacial Europea (Medio Ambiente, 2021).

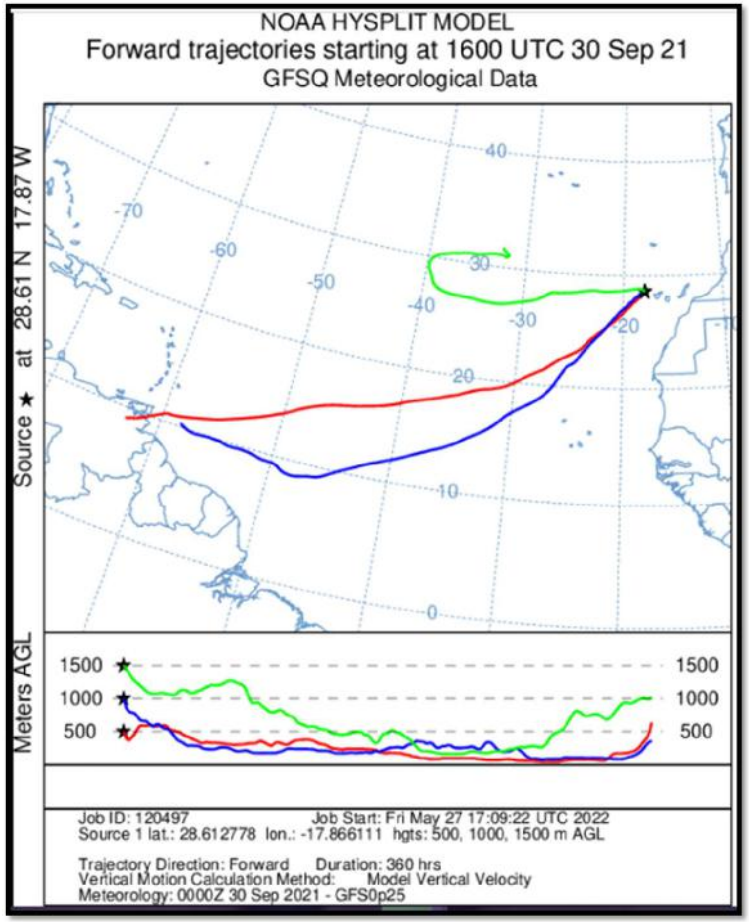


Fig. 8. Trayectorias desde el volcán Cumbre Vieja del 2021-09-30 al 2021-11-10 por el Modelo HYSPLIT



Fig. 9a. Sentinel 5p de Copérnico del 30 de septiembre 2021 de la erupción del volcán Cumbre Vieja

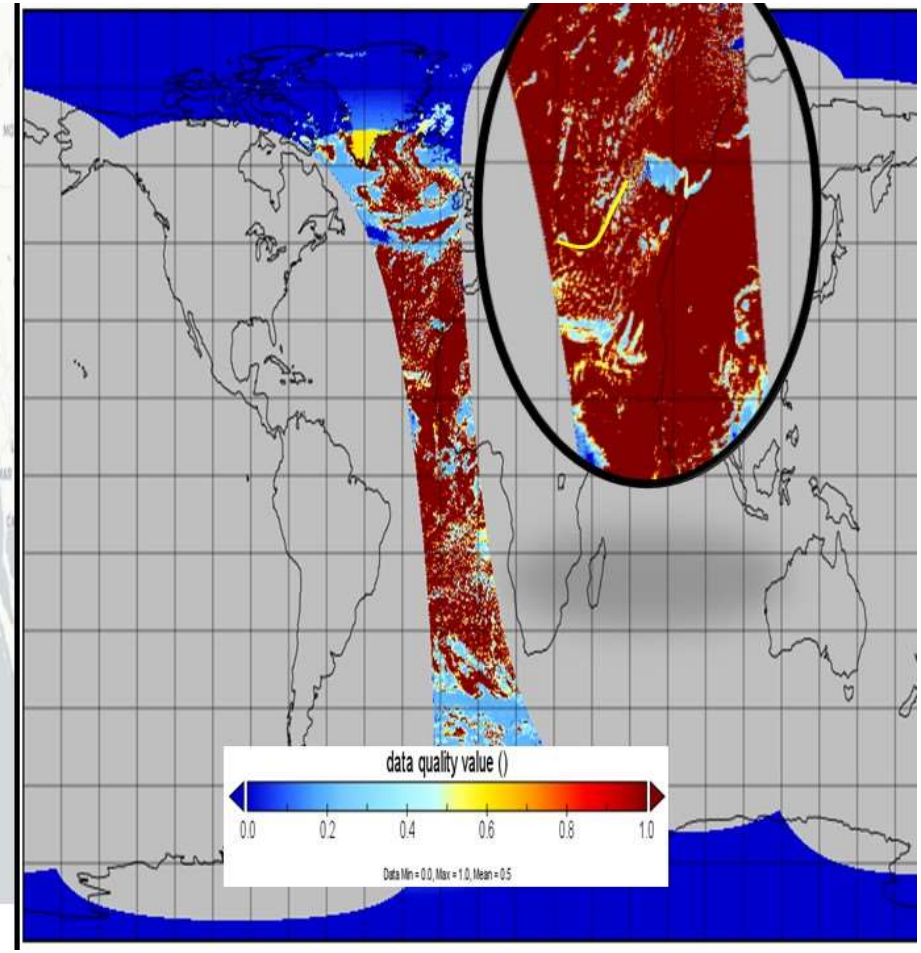


Fig. 9b. Sentinel 5p de Copérnico, contenido de SO_2 del pilar de la columna total, del 30 de septiembre 2021 de la erupción del volcán Cumbre Vieja

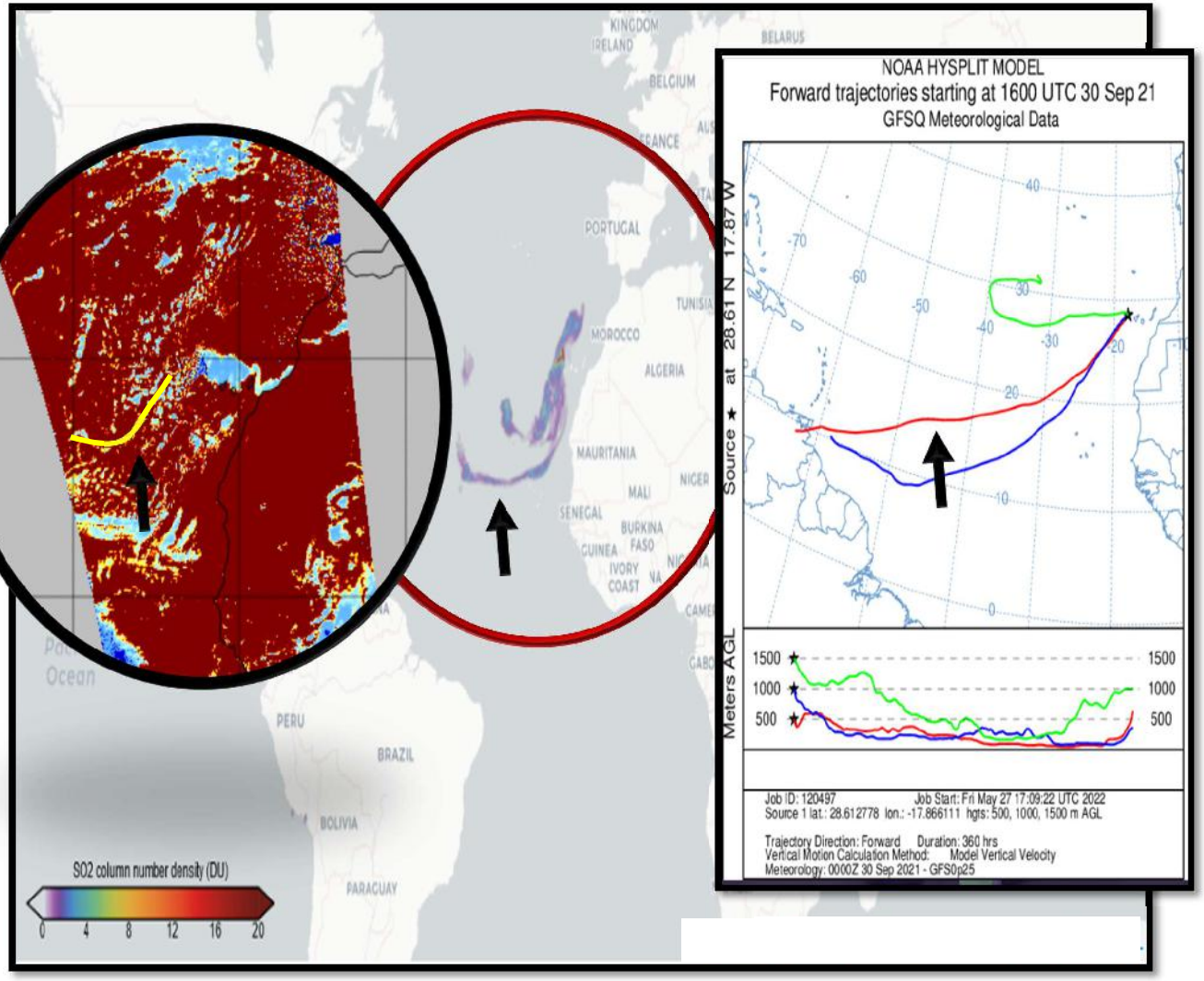


Fig. 10. Integración de Sentinel 5p COPERNICO y HYSPLIT

Se calcularon las trayectorias, a partir del modelo de dispersión HYSPLIT y como resultado del procesamiento de la información del HYSPLIT se establecieron trayectorias simples para tres alturas de la capa limite planetaria (1500 m, 1000 m y 500 m), las cuales se pueden apreciar en la **"Fig.8"**. Al comparar dichas trayectorias con las reportadas por el sentinel 5p en la **"Fig.9a"** se aprecia el recorrido del SO_2 por el portal web de COPERNICO y en la **"Fig.9b"** se observa el contenido de SO_2 del pilar de la columna total, se encontró muy buena coincidencia para la altura de 500 m. Esta similitud de trayectorias se explica por el hecho de que el movimiento de esas masas de aire ocurre principalmente a esas alturas. En la **"Fig.10"** se puede observar la integración de HYSPLIT y COPERNICO, demostrándose la similitud de ambos.

3.2 Contribución de las mediciones de la AQM65 y COPÉRNICO, Caso de estudio: Cuba para el NO_2

Al comparar los resultados de AQM 24 horas, con los valores permisibles para la NC 1020, 2014, los valores del NO_2, son superiores a los permisibles, durante el periodo de enero a abril del 2020, como se puede ver en la **"Fig.11"**.

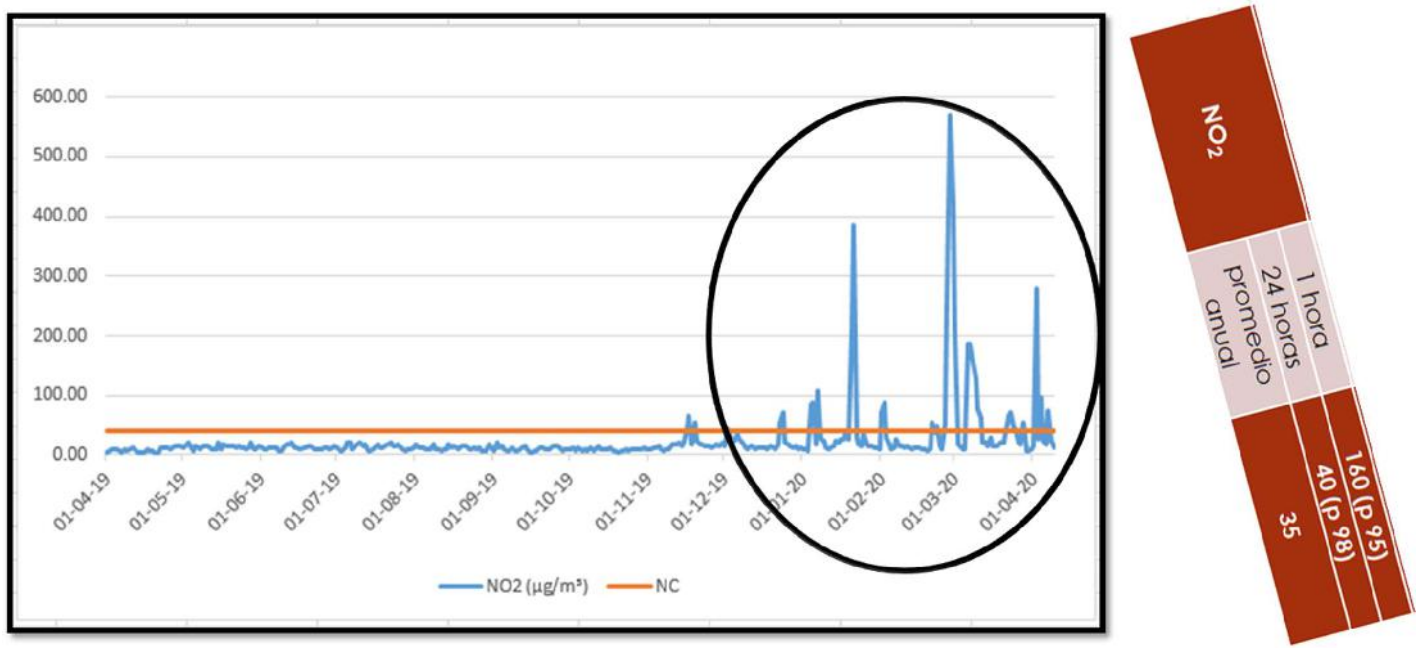
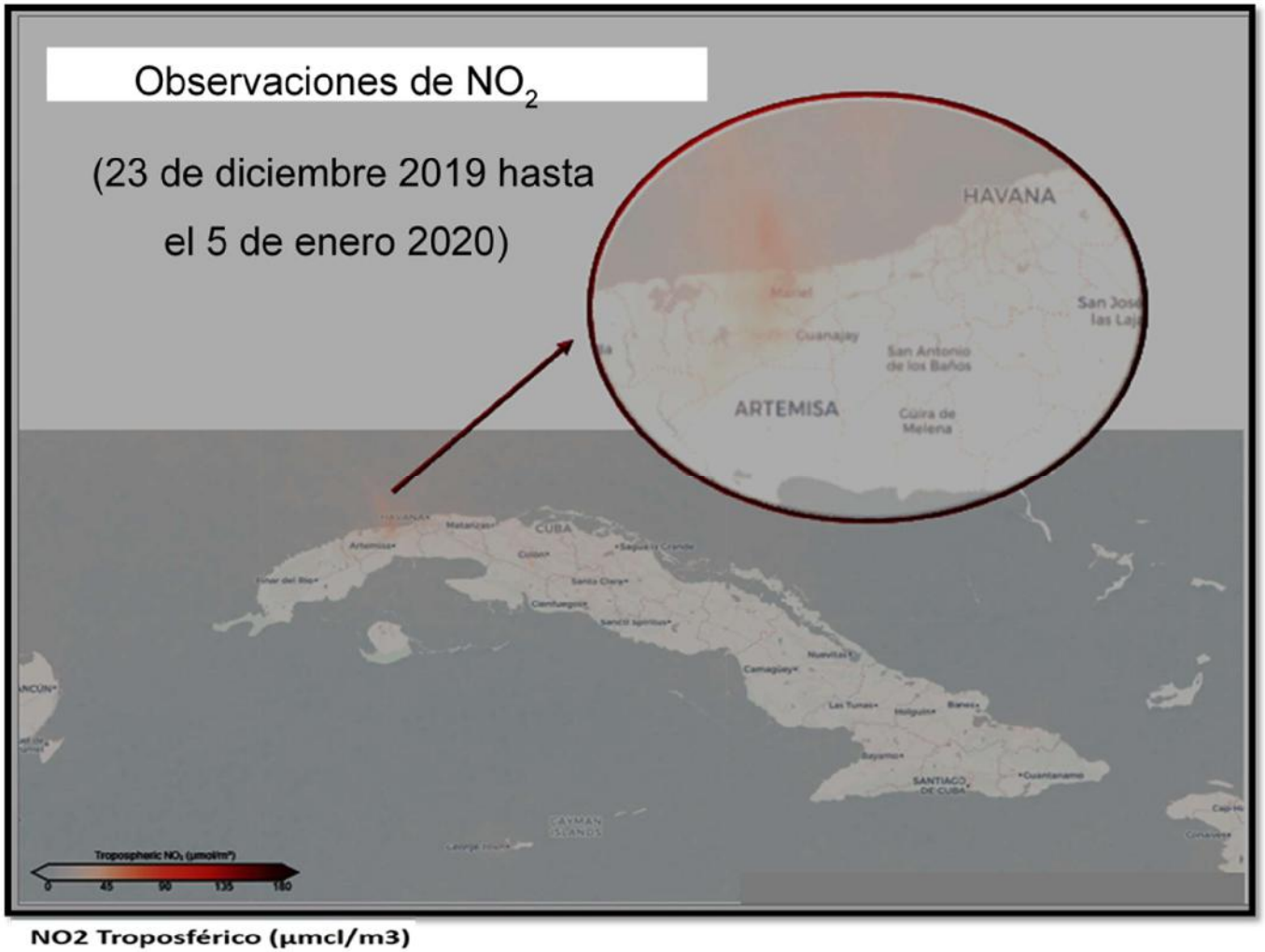


Fig. 11. Valores del NO_2 de abril del 2019 a abril del 2020

De igual forma para ese periodo las imágenes de COPERNICO, atendiendo a sus valores pico presenta una buena coincidencia con los valores resultantes de AQM65. **"Fig.12a"** y. **"Fig.12b"**



NO2 Troposférico (µmcl/m3)

Fig. 12a. Valores del NO_2 de diciembre 2019 a enero 2020, (valores superiores a los permisibles)



"Fig. 12b". Valores del NO_2 de marzo 2020 a abril 2020, (valores superiores a los permisibles)

Conclusiones

1-Dentro de la plataforma COPERNICO el sentinel 5p, TROPOMI, aporta datos de contaminación atmosférica. Incluye los parámetros claves de calidad del aire NO_2, O_3, SO_2, HCHO, OCHCHO y AEROSOLES y es superior en cuanto al número de contaminantes al incluir, además, CH_4 Y CO.

2-La mayoría de los estudios a nuestro alcance, nos ofrecen un análisis de la información descargada de esta plataforma, la cual es óptima para un monitoreo de contaminación, cuando se tiene ausencia de datos de medición en tierra.

3-Se pudo corroborar con trayectoria similar, la reportada por el sentinel 5p de COPÉRNICO y la trayectoria calculada con el HYSPLIT, en el caso de estudio del volcán del 30 de septiembre.

4-El sentinel 5p es una herramienta ùtil y en vínculo con modelos como HYSPLIT se utiliza para el pronóstico de calidad del aire ante la ocurrencia de eventos regionales.

5-La comparación entre los valores de AQM65 y los de COPERNICOS presentan muy buena coincidencia entre la ocurrencia de los valores de picos máximo.

6-Las estaciones automáticas de calidad del aire (AQM65) tienen un costo entre 35-45 mil euros. Los productos satelitales nunca podrán sustituir los datos que ellas aportan, pero cuando se carece de estas estaciones, son una buena herramienta para el diagnóstico de la calidad del aire.

7-A pesar de su limitación temporal, las imágenes satelitales aportan con una visión única sobre la calidad del aire.

8-Los resultados son accesibles libremente por la comunidad científica.

9-El reto y potencialidad está en la resolución espacial que se obtiene con el TROPOMI del sentinel 5p de COPERNICO, es de 7 km x7 km, esto se logra por primera vez para un sensor atmosférico.

Bibliografía

Ambientum 2021. https: //www.ambientum.com/ambientum/contaminacion/la-contaminacion-del-aire-vuelve-a-niveles-pre-covid.asp, consultado mayo 2021.

Comisión Europea 2021. https: //www.copernicus.eu/es, consultado febrero-mayo 2021.

EPA 2004a, EPA-454/B-03-001, User's Guide for the AMS/EPA regulatory model – AERMOD, Office of Air Quality Planning and Standards Emissions, Monitoring, and Analysis Division.

NC 1059:2014 Calidad del aire — metodología para modelar las afectaciones de la calidad del aire a escala local debido a las emisiones de contaminantes atmosféricos desde fuentes fijas.

Osthoff, H.D., J.M. Roberts, A.R. Ravishankara, E.J. Williams, B.M. Lerner, R. Sommariva, T.S. Bates, D. Coffman, P.K. Quinn, J.E. Dibb, H. Stark, J.B. Burkholder, R.K. Talukdar, J. Meagher, F.C. Fehsenfeld, S.S. Brown. 2008.High levels of nitryl chloride in the polluted subtropical marine boundary layer.*Nat. Geosci*., 1, 324-328

Scire, J.S., Robe, F.R., Fernau, M.E., Yamartino, R.J., 2000. A User's Guide for the CALMET Dispersion Model (Version 5). EarthTech. Inc., Concord, MA.

https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-5p

https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/data-products

https://scihub.copernicus.eu/

https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/sentinel-data-access/typologies-and-services

https://maps.s5p-pal.com/co/

https://www.france24.com/es/programas/medio-ambiente/20211010-medio-ambiente-efectos-volcan-cumbre-vieja-palma

Agradecimientos

PROYECTO "INTEGRACIÓN DE METODOLOGÍAS PARA LA EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA POR MATERIAL PARTÍCULADO"

- **EJECUTA**: CUBAENERGÍA
- **PROGRAMA**: Programas de Ciencia, Tecnología e Innovación Sectoriales y Proyectos No Asociados a Programas gestionados por la Agencia de Energía Nuclear y Tecnologías de Avanzada (AENTA)

- **FINANCIADO**: Agencia de Energía Nuclear y Tecnologías de Avanzada (AENTA)

Acerca de los autores:

Dra. Bárbara Liz Miravet Sánchez: Graduada en Ingeniería Geofísica, ISPJAE 1993, Master en Geofísica Aplicada, ISPJAE 2001, Doctora en Ciencias Técnicas, en Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría 2017. Investigador agregado del Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía (CUBAENERGIA). Especialista en Estudios Ambientales (Línea Base, Estudio de Impacto y Diagnóstico), Estudios geo-ambientales de territorios y/o instituciones y empresas, Teledetección y cartografía digital, Desarrollo e implementación de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y estudios de la calidad del aire y de agua.
ORCID: 0000-0002-9636-3169

Msc. Elieza Meneses: Graduada de Licenciatura en Física, Universidad de La Habana, 1992. Jefa del grupo de Impacto Ambiental y Calidad de aire del Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía. Investigadora auxiliar. Especialista en los temas del uso de la energía solar para calentamiento de agua, generación eléctrica y estudios de radiación solar. Investigadora en los temas de contaminación por material particulado y deposición de polvo y estudios de la calidad del aire. Jefa de proyecto Ramal sobre impacto de la contaminación en material particulado.
ORCID: 0000-0002-8195-111X

Dr.C Alberto Enrique García Rivero: Geógrafo y Dr. En Ciencia Geofísicas, Investigador – Consultor-profesor principal, en las líneas de Geoecologia de los Paisajes, GIZMC, GIRH, GRD, ordenamiento ambiental y territorial, desarrollo turístico, calidad de aire y de agua y EIA. Impartiendo docencia de pre y postgrado en Cuba y Perú. Actual profesor de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Con más de 35 artículos en revistas indexadas, libros y capítulos de libro, participante en diversos eventos científicos nacionales y extranjeros, asesor de tesis de grado, maestría y doctorados, ha realizado estancias de trabajo y estudio en prestigiosas instituciones científicas y docentes de América y Europa.
ORCID: 0000-0002-8344-9529

Lic Alina Roig Rassi: Graduada de Licenciatura en Física, Universidad de La Habana, 1999. Vicedirectora de la División de Energía y Medio Ambiente del Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía. Investigadora auxiliar. Profesora asistente de la CUJAE y UH. Especialista en los temas del uso de la energía solar para calentamiento de agua, generación eléctrica y estudios de radiación solar. Investigadora en los temas de contaminación por material particulado y deposición de polvo y estudios de la calidad del aire. Jefa de proyecto Nacional sobre impacto de la contaminación en la generación fotovoltaica. ORCID: 0000-0003-3380-7786