



***Facultad
de
Ciencias***

**Análisis de la contribución de las
erupciones volcánicas
(Cumbre Vieja, 2021) al balance de gases
en la atmósfera
mediante medidas registradas por Sentinel-
5P**

**(Analysis of the contribution of volcanic
eruptions (Cumbre Vieja 2021) to the gas
balance in the atmosphere through
measurements made by Sentinel-5P)**

**Trabajo de Fin de Grado
para acceder al**

GRADO EN FÍSICA

Autor: Irene Castañeda Díez

Director: Alberto González Díez

Junio - 2022

Resumen

Los estudios de cambio global revelan como el clima del planeta se está transformando rápidamente como consecuencia del impulso humano. No obstante, procesos naturales, como las erupciones volcánicas, pueden alterar esta cambio, por lo que resulta de gran interés científico analizar su contribución al balance de gases en la atmósfera. Los satélites de observación terrestre ofrecen enormes posibilidades de recoger datos de gases atmosféricos y monitorear su evolución. Un ejemplo es el sensor TROPOMI, que va a bordo del satélite Sentinel-5P del programa Copernicus. En este trabajo se han obtenido, procesado y analizado medidas de gases y aerosoles emitidos a la atmósfera durante la erupción del volcán cumbre Vieja del año 2021, empleando TROPOMI. La metodología seguida en este trabajo emplea dos ventanas de observación: una mensual y otra diaria. En cualquiera de ellas se comparan las observaciones de gases y aerosoles registradas en el año de la erupción (2021) con las del año precedente (2020), con el fin de identificar el patrón de cambio de la anomalía registrada. Los gases y aerosoles observados son: SO_2 , CO , NO_2 , O_3 y aerosoles (partículas de tamaño PM_{10}), que generan efecto invernadero directo (O_3) e indirecto (CO , NO_2), pero también de efecto invernadero contrario (SO_2 y aerosoles). Durante la erupción, el SO_2 es el contaminante que más se ha emitido a la atmósfera, hasta $0,2 \text{ mol/m}^2$; a continuación, el CO (con máximos de hasta $0,05 \text{ mol/m}^2$); los datos de NO_2 no permiten establecer diferencias significativa; en cambio los de O_3 suponen una contribución relevante ($0,15 \text{ mol/m}^2$); por último, los aerosoles se han incrementado significativamente hasta más de un 86 %. Cualquiera de los gases y aerosoles estudiados presentan una vida en la atmósfera limitada (de un par de meses), pero predominan los de efecto contrario al invernadero sobre los de efecto invernadero y dentro de estos últimos, se emiten en proporciones similares tanto los de efecto directo como indirecto. La principal conclusión de este trabajo es que los datos registrados por el sensor TROPOMI permiten analizar el balance de gases emitidos en una erupción volcánica como la ocasionada por la actividad del volcán Cumbre Vieja de 2021. Asimismo, aportan herramientas útiles para estimar la contribución volcánica al balance total de gases, y la importancia de los procesos volcánicos al calentamiento global.

Palabras clave: TROPOMI, erupción volcánica, gases, aerosoles, clima.

Abstract

The studies of global change reveal how the climate of the planet is being rapidly transformed as a consequence of human activity. Nevertheless, natural processes, as volcanic eruptions, can alter this change. Because of that, it is of great scientific interest to study its contribution to the gas balance in the atmosphere. Earth observation satellites offer a great variety of possibilities to obtain data of atmospheric gasses and to monitor its evolution. One example is the sensor TROPOMI, which travels aboard the satellite Sentinel-5P of the Copernicus program. In this work it has been obtained, processed and analysed gas measurements, as well as aerosol's ones, all of them emitted during the eruption of Cumbre Vieja volcano (year 2021) using TROPOMI. The methodology followed has used two viewing windows: one monthly and another daily. In both of them it has been compared the observations of gasses and aerosols registered at the year of the eruption (2021) and the previous one (2020), with the aim of identify the model of change of the anomaly detected. The gasses and aerosols observed are: SO_2 , CO , NO_2 , O_3 and aerosols (particles of size PM_{10}), which generate direct greenhouse effect (O_3) or indirect (CO , NO_2), but also the contrary effect (SO_2 and aerosols). During the eruption, SO_2 has been the most emitted contaminant to the atmosphere, with values of $0,2 \text{ mol/m}^2$, then the CO (with maximum of $0,05 \text{ mol/m}^2$); the NO_2 data does not allow to establish significant differences, instead, aerosols have been increased up to increments of 86 %. All of the gasses and the aerosols studied show a limited atmospheric lifetime of more or less than two months, but the gasses of contrary effect to the greenhouse have been predominant. Between the direct greenhouse effect or indirect, the proportions have been similar. The principal conclusion of this project is that the data registered with the sensor TROPOMI allows to analyse the balance of the emitted gasses in a volcanic eruption, such as the one caused by the Cumbre Vieja volcano in 2021. What is more, they provide useful tools for estimate the contribution of volcanic eruptions to the total gas balance, as well as the importance of volcanic processes to the global warming.

Key words: TROPOMI, volcanic eruption, gasses, aerosols, climate.

Agradecimientos

Lo primero de todo, agradecer a mi tutor en este trabajo, Alberto González Díez, por guiarme y abrirme la puerta a este campo de estudio.

Es imposible no agradecer a los que siempre han sido mi mayor apoyo: mi madre, Fátima Díez, y mi padre, Alejandro Castañeda. Los cuáles siempre me han hecho saber que pase lo que pase, siempre podré contar con ellos y llamar a algún sitio hogar. También agradecer a mi abuela y abuelo, Maria Antonia y Carlos, por siempre sentirse tan orgullosos de mí. No podría sino agradecer y dedicarle este trabajo a Leía, la cuál desde mis diez años ha sido mi compañera, y no sabes lo feliz que me hace poder haber cerrado esta etapa también a tu lado.

Puedo sentirme muy agradecida de tener valiosas amistades, y personas que me han ofrecido siempre su máximo soporte. Sin embargo, si he de mencionar en este trabajo, Paula y Silvia, gracias por estos dos años, sin vosotras este camino hubiese sido mucho más duro. Nunca olvidaré estos años viviendo juntas.

Índice

1. Introducción	1
1.1. Planteamiento general del trabajo	1
1.2. El clima del planeta, factores influyentes	1
1.3. Los gases y aerosoles, y su efecto en la atmósfera	2
1.4. Los satélites de observación terrestre para estudio del clima	4
1.5. Hipótesis y objetivos del trabajo	5
2. Área de Estudio y Metodología	6
2.1. Área de Estudio	6
2.2. Satélites y sensores	8
2.3. Descarga de los datos	11
2.4. Nomenclatura de los ficheros, estructura de los datos, procesamiento y análisis	12
3. Resultados	13
3.1. Dióxido de azufre: SO_2	14
3.2. Monóxido de carbono: CO	17
3.3. Dióxido de nitrógeno: NO_2	21
3.4. Ozono: O_3	24
3.5. Aerosoles	28
3.6. Reflexiones finales	31
4. Conclusiones	31
Referencias	33
A. Gráficas	37
A.1. Dióxido de azufre	37
A.2. Monóxido de carbono	39
A.3. Dióxido de nitrógeno	43
A.4. Ozono	46
A.5. Aerosoles: $\lambda_1 = 340 \text{ nm}$ y $\lambda_2 = 380 \text{ nm}$	50
A.6. Aerosoles: $\lambda_1 = 354 \text{ nm}$ y $\lambda_2 = 388 \text{ nm}$	52
B. Mapas	53
B.1. Dióxido de azufre	53
B.2. Monóxido de carbono	54
B.3. Dióxido de nitrógeno	55
B.4. Ozono	56
B.5. Aerosoles: $\lambda_1 = 340 \text{ nm}$ y $\lambda_2 = 380 \text{ nm}$	57
C. Códigos	58
C.1. Medidas en una localización	58
C.2. Mapas	65

1. Introducción

1.1. Planteamiento general del trabajo

Los estudios de cambio global revelan como el clima del planeta se está transformando rápidamente como consecuencia del impulso humano, rompiendo el natural equilibrio existente entre la contribución natural y antrópica [1]. Los datos registrados en la mayoría de las estaciones meteorológicas de seguimiento, muestran que existe un aumento de la temperatura media global, que se atribuye al incremento de la concentración de gases de efecto invernadero por la combustión de combustibles fósiles [2]. No obstante, otros procesos naturales, como por ejemplo las erupciones volcánicas, pueden alterar esta causa, por lo que resulta de gran interés científico analizar su contribución al balance de gases en la atmósfera [3].

Los satélites de observación terrestre ofrecen enormes posibilidades de recoger datos de gases presentes en la atmósfera y monitorear su evolución. Por lo tanto, son de gran utilidad a la hora de analizar la contribución de procesos naturales, como las erupciones volcánicas, al balance atmosférico de gases y aerosoles. Así por ejemplo, el satélite Sentinel-5P, perteneciente al programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea, constituye una referencia en el seguimiento de gases atmosféricos debido a la gran calidad de sus datos [4]. Esta plataforma incorpora diferentes sensores específicamente diseñados a la medida de los componentes gaseosos de la atmósfera. Así, el espectrómetro TROPOMI (Tropospheric Monitoring Instrument), permite tomar medidas de las concentraciones atmosféricas de gases como: O_3 , SO_2 , NO_2 , CO , CH_4 , CH_2O , pero también de partículas de pequeño tamaño conocidas como aerosoles; sustancias que también pueden dificultar el balance térmico [4].

El análisis de la contribución de los procesos volcánicos a la concentración de gases en la atmósfera depende de la posibilidad de poder estudiar un evento eruptivo desde el inicio hasta el final, para así medir la aportación de este proceso al balance total de gases. Un ejemplo de gran interés, es la erupción del volcán Cumbre Vieja (19 de Septiembre- 13 de Diciembre, 2021) , en la isla de La Palma [5]. Los datos aportados por Sentinel-5P permiten analizar las emisiones producidas, su distribución espacial y evolución, y compararlas con las existentes un año antes de la erupción. De este modo, se puede conocer la importancia de la acción de este proceso en la atmósfera.

El objetivo del presente Trabajo de Fin de Grado (en adelante TFG) consiste en obtener, procesar y analizar las medidas de gases, tanto de efecto invernadero como de efecto contrario, registradas por TROPOMI para el volcán de Cumbre Vieja antes, durante la erupción de 2021. De esta forma, se pretende poder medir la contribución volcánica al balance de gases y aerosoles (contaminantes) emitidos a la atmósfera, de manera que se pueda analizar su influencia en el balance total de gases, para así poder estimar correctamente la importancia de este proceso y su influencia en el cambio global. A continuación, se presentan una revisión sobre el “estado del arte” de algunos de los conceptos presentados en los párrafos anteriores.

1.2. El clima del planeta, factores influyentes

La definición más aceptada de clima, según la Enciclopedia Británica [6], considera que es fruto de “..condiciones de la atmósfera en un lugar determinado durante un largo periodo de tiempo..”. El clima es, por tanto, “..la suma, a largo plazo, de los elementos atmosféricos (y sus variaciones), como son: la radiación solar, la temperatura, la humedad, las precipitaciones (tipo, frecuencia y cantidad), la presión atmosférica y el viento (velocidad y dirección)” [6] . Efectivamente, dichos elementos pueden reclasificarse nuevamente desde un punto de vista físico, atendiendo a su comportamiento termodinámico: temperatura atmosférica (grado de calor específico en el aire), presión atmosférica (peso de la columna de aire sobre la vertical del punto de muestreo), vientos (velocidad del movimientos de la columna de aire debidas a diferencias de presión); o del agua contenida en la atmósfera (humedad, que es la cantidad de vapor de agua presente en el aire) y precipitación (cantidad de agua desprendidas hacia la superficie terrestre). De manera que, si analizamos el comportamiento de dichos elementos en periodos de tiempo corto, medimos el tiempo atmosférico [6].

Geográficamente, en la definición del clima, se considera el tiempo atmosférico promedio que caracteriza a un lugar determinado, durante un lapso aproximado de 30 años. De manera que, las clasificaciones climáticas (Köppen 1918) [7], delimitan la superficie del planeta atendiendo a una combinación de factores, como son: latitud, vientos predominantes, corrientes marinas, distancia al mar, altitud, relieve, etc. Todos ellos, condicionados por el promedio de tiempo atmosférico. Así por ejemplo la: altura

del relieve (influye sobre la presión atmosférica y temperatura del aire), continentalidad (afecta al movimiento de las masas de aire: circulación general atmosférica, brisas, etc.), corrientes oceánicas (regulador térmico y de humedad) y la vegetación (regulador térmico y de humedad)[7].

Considerando la velocidad a la que se pueden producir dichos cambios, existen otros factores que implican modificaciones de amplio rango temporal y que condicionan la predominancia climática, como:

- La cantidad de energía recibida del Sol, que es dependiente de factores relativos al propio Sol y a su actividad (implicados en la formación de manchas solares). Asimismo, considera factores de tipo astronómico, que controlan la distancia al Sol, como: excentricidad de la órbita, inclinación del eje terrestre y el rango temporal de dichos cambios (precesiones, nutaciones)[8].
- Factores que afectan a la circulación general atmosférica y oceánica, como es la tectónica, que afecta a la distribución de continentes sobre el planeta, y a la continuidad de las cadenas montañosas, y su altura, o de los océanos y su profundidad [8].

En cambio, hay otro tipo de factores, que conllevan cambios de rango temporal más corto, de gran dinamismo, muy veloces respecto a los anteriores, cuya manifestación de cambio es prácticamente inmediata. Estos son debidos a fenómenos astronómicos (un impacto meteorítico); erupciones volcánicas (erupciones del Agung, Pinatubo, etc); pero también acciones de tipo antrópico como catástrofes industriales, bombas atómicas (como las explosionadas en la atmósfera), o la actividad industrial [1][3][8]. Estos agentes de actuación rápida, producen un desequilibrio en el balance de gases y aerosoles, generando un efecto invernadero, que favorecen la absorción de radiación electromagnética de larga longitud de onda y emisión en el infrarrojo dentro de la troposfera, incrementando la temperatura de esta [8]; o el efecto contrario, un enfriamiento del clima, en el que los gases y aerosoles dificultan la absorción de radiación electromagnética de onda larga y sus emisiones correspondientes, enfriando la troposfera y estratosfera [8]. Por tanto, los gases que favorecen el efecto invernadero, producen un efecto contrario al de gases y aerosoles que favorecen el enfriamiento [8]. Sin los gases de efecto invernadero, la temperatura promedio de la superficie terrestre sería de -18°C , en lugar de la media actual de 15°C [9].

Es por todo lo dicho que, el clima no es una constante en el tiempo, sino que éste es de naturaleza cambiante y dependiente de innumerables factores. Así que, es de esperar que varíe a lo largo de los años, y pase por épocas más frías o cálidas de forma natural. Sin embargo, debido al notable aumento de la actividad antrópica, sobre todo en las últimas décadas, la quema de combustibles fósiles está íntimamente relacionada con el incremento de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera. Es por ello, que se afirma que el clima se está transformando rápidamente como consecuencia del impulso humano [1].

A pesar de que la mayor aportación de gases y aerosoles al clima, tanto de efecto invernadero como de efecto contrario, es debido a actividades antrópicas (quema de combustibles fósiles, biomasa o diversos procesos industriales)[1]; existen también contribuciones naturales. Un ejemplo relevante son las erupciones volcánicas[3]. Es por tanto de gran interés conocer el impacto de procesos naturales, como las erupciones volcánicas, y analizar su contribución al balance de gases en la atmósfera. Las erupciones volcánicas, además del gran atractivo para el ser humano, y de ser uno de los mayores espectáculos de la naturaleza, aportan principalmente: vapor de agua, CO_2 y SO_2 , aunque también se emiten otro tipo de compuestos con azufre (en estado de oxidación bajo); compuestos de nitrógeno y aerosoles[3]. Estos gases contribuyen tanto al efecto invernadero, como a su contrario. Por lo que estudiarlos y clasificarlos es de alto interés científico y objetivo principal de este trabajo.

1.3. Los gases y aerosoles, y su efecto en la atmósfera

Cómo ya ha sido descrito, los gases y aerosoles pueden ser clasificados entre los que son de efecto invernadero, y los que provocan el efecto contrario en el clima. A su vez, los primeros pueden ser de efecto directo o indirecto [10]. Los que más contribuyen al efecto invernadero son: el vapor de agua (H_2O), metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (NO_2) y el ozono (O_3). Asimismo, en este grupo han de ser incluidos productos químicos fabricados por el ser humano, como los halocarburos (diversos compuestos de carbono e hidrógeno) o los hidrofluorcarburos (HFC) [8].

Todos estos gases son considerados de efecto directo, ya que favorecen la absorción de radiación electromagnética de larga longitud de onda que posteriormente emiten en el infrarrojo, calentando la atmósfera. Sin embargo, hay otros gases que contribuyen al calentamiento del planeta tras reaccionar en la atmósfera, es decir, de forma indirecta [10]. En este grupo se encuentran: los óxidos de nitrógeno (NO_x),

el monóxido de carbono (CO), y los compuestos orgánicos volátiles diferentes al metano (COVDM)[8]. Estos tres reaccionan en la atmósfera, produciendo ozono troposférico e influenciando al calentamiento del planeta. El CO, a su vez, también produce CO₂, y los COVDM forman metano y vapor de agua[10]. Sin embargo, los óxidos de nitrógeno también pueden contribuir al enfriamiento del planeta, ya que crean aerosoles que aumentan la formación de nubes[10]. Este es también el caso de los óxidos de azufre, que no son gases de efecto invernadero, pero su presencia en la atmósfera puede influenciar el enfriamiento clima al ser precursores de aerosoles[8].

Volviendo al foco del problema, los gases descritos se emiten en las erupciones volcánicas, por lo que su presencia provocaría cambios en el clima. A continuación, la descripción se centra en los gases objeto de estudio del presente trabajo.

El dióxido de azufre, no sólo es uno de los gases que más es liberado en las erupciones volcánicas[3], sino que, además, su presencia en la atmósfera es de vital importancia. Esto se debe a su potencial efecto no sólo sobre nuestra salud, sino sobre los ecosistemas y el clima. Según el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico de España, el origen de este gas es principalmente antropogénico, poniendo el foco en el sector industrial [11].

El dióxido de azufre es un gas irritante y tóxico y sus efectos en la salud son sobre todo enfocados al aparato respiratorio: mucosidades y pulmones. Se ha estudiado como la exposición de altas concentraciones durante cortos períodos de tiempo tiene graves consecuencias para la salud de los seres humanos[11].

Además, sus efectos en el medioambiente empeoran cuando se combina con partículas o con la humedad del aire, debido a que se forma ácido sulfúrico, H₂SO₄[3]. Esta conversión en la troposfera sucede en el plazo de unos días, y como consecuencia se produce la conocida lluvia ácida, con sus efectos adversos para la vida salvaje, y la acidificación de las aguas superficiales[12]. Si se estudian los efectos que tiene en el clima, ya se ha comentado cómo los óxidos de azufre no son de efecto invernadero, pero su presencia en la atmósfera puede influenciar el clima [8]. El SO₂ reacciona en la atmósfera, formando aerosoles de azufre, que a su vez favorecen la formación de nubes, contribuyendo al enfriamiento del clima[10].

Anteriormente, se había señalado al CO₂ como uno de los principales gases emitidos durante las erupciones volcánicas, sin embargo, también existen emisiones en menor medida de gases como el metano, CH₄ o el monóxido de carbono, CO.[13] El monóxido de carbono es un gas incoloro y sin olor, que penetra en los organismos a través de los pulmones, provocando diversas consecuencias adversas, desde disminución de la capacidad de transporte de oxígeno de la sangre, hasta disfunciones cardíacas o daños en el sistema nervioso, afectando tanto a seres humanos como a la fauna silvestre. Este gas también posee numerosos efectos en el clima, debido a su vida media en la atmósfera de unos dos meses, ya que se oxida lentamente formando CO₂ y generando a su vez O₃, todo gases de efecto invernadero [14]. Es por tanto que, este gas ha sido clasificado como de efecto invernadero indirecto, potenciando el calentamiento del clima[10]. En cuanto al estudio de las fuentes de emisión de CO, se atribuye a que las principales son los procesos de combustión en sectores no industriales, seguidos por las actividades del sector agropecuario y por los procesos industriales sin combustión [14].

En lo que respecta a los nitrogenados, se encuentra un debate aún algo abierto sobre su emisión en las erupciones. Estos compuestos son expulsados en muy baja proporción en las mismas, y numerosos previos estudios sugieren que el nitrógeno emanado en las erupciones se encuentra prácticamente en forma de nitrógeno molecular, N₂, con tan sólo emisiones menores de NH₃. Sin embargo, en algunas emisiones volcánicas si han sido detectadas otras forma de nitrógeno, los óxidos de nitrógeno, NO_x[13]. Todos estos óxidos de nitrógeno están considerados como contaminantes atmosféricos[15], y el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico [16], también atribuye su origen principalmente al factor antrópico. Dentro de los NO_x, el monóxido de nitrógeno, NO, y el dióxido de nitrógeno, NO₂, constituyen dos de los óxidos de nitrógeno más importantes toxicológicamente [15]. La presencia de uno influencia la del otro, ya que el NO con el tiempo se oxida fácilmente en la atmósfera, generando a su vez NO₂ secundario. Los efectos de estos gases abarcan desde complicaciones en la salud humana, afecciones de órganos, inflamación de las vías aéreas, etc., hasta en el medio ambiente: acidificación de los ecosistemas o hasta limitar el crecimiento vegetal[16]. Por otra parte, también influyen notablemente en el clima, y han sido clasificados previamente como gases de efecto invernadero indirectos. Los óxidos de nitrógeno reaccionan en la atmósfera, formando ozono troposférico, y estimulando el calentamiento del planeta[10]. Sin embargo, también ha sido descrito como contribuyen a la formación de partículas inorgánicas, al ser precursores del ácido nítrico, HNO₃, y por tanto, del nitrato, NO₃⁻ en partículas. Esto, al igual que en

el caso del SO_2 , favorece la creación de nubes, pudiendo influenciar un enfriamiento del clima[16]. Como puede observarse, estos gases contribuyen al efecto invernadero indirectamente por medio de la formación de ozono al reaccionar en la atmósfera, o aerosoles.

El O_3 tiene un efecto positivo en la estratosfera, al proteger de la radiación ultravioleta[17]. Sin embargo, a bajas alturas, contribuye al calentamiento de la troposfera al ser un gas de efecto invernadero que absorbe y emite radiación infrarroja. Además, en la baja atmósfera y sobre la superficie terrestre, el ozono se constituye en un contaminante nocivo para la salud[18]. Los problemas en la salud humana nacen tras la exposición a elevados niveles de este gas, abarcando desde problemas respiratorios hasta el incremento de la mortalidad prematura. También tiene numerosas consecuencias adversas para el medioambiente, reduciendo la absorción de CO_2 por las plantas o alterando la estructura de los ecosistemas y reduciendo la biodiversidad[17].

Los aerosoles son pequeñas partículas, como el polvo volcánico, polvo del suelo, arena suspendida por tormentas, productos de la combustión del carbono, etc[8]. Se encuentran suspendidas en el aire, y reflejan y absorben radiación infrarroja solar, además de la emitida por la superficie de la Tierra. Asimismo, también actúan como núcleos de condensación, alrededor de los cuales las gotas de agua crecen en tamaño, favoreciendo la formación de nubes[8]. Este incremento en el número de núcleos de condensación a escala global, tiene como consecuencia el aumento del albedo de las nubes, reflejándose mayor cantidad de radiación por parte de las mismas. No sólo esto, sino que, un incremento de las partículas en la estratosfera puede acentuar la reflexión de onda corta al espacio[8]. Todo esto influencia el enfriamiento del clima.

1.4. Los satélites de observación terrestre para estudio del clima

Los satélites de observación terrestre analizan el tiempo atmosférico y el clima de la Tierra; además permiten recoger datos de gases y aerosoles presentes en la atmósfera y monitorizar su evolución. Por lo tanto, son de gran utilidad a la hora de estudiar la contribución de procesos naturales, como las erupciones volcánicas, al balance atmosférico [19]. Se clasifican en función del tipo de órbita que trazan alrededor de la Tierra (geoestacionaria o polar). Los satélites de órbita polar rodean la Tierra a una altitud típica de 850 km, viajando de norte a sur, pasando sobre los polos en su vuelo. Los satélites polares están en órbitas heliosíncronas, lo que significa que pueden observar cualquier lugar de la Tierra y ver dos veces al día un lugar, con las mismas condiciones generales de luz, debido al tiempo solar casi constante [20]. Además, los satélites de órbita polar ofrecen mayor resolución que sus homólogos geoestacionarios, debido a su cercanía con la Tierra [21]. Los satélites de observación terrestre han sido utilizados desde 1972 hasta el presente. Un recorrido histórico sobre su utilización se presenta en [22].

En la actualidad, los Estados Unidos tienen dos en funcionamiento: el GOES-11 y el GOES-12. El GOES-12, también llamado como GOES-East, es de tipo geoestacionario y se sitúa en la vertical del río Amazonas, proporcionando la mayor parte de la información meteorológica estadounidense. En cambio, GOES-11, también denominado GOES-WEST, posee una órbita que lo sitúa al este del Océano Pacífico [23]. Japón también dispone de un satélite denominado MTSAT-1R y situado geoestacionariamente en medio del Pacífico a 140°E [24]. Con respecto a Europa, cabe señalar que dispone de tres plataformas: una geoestacionaria sobre el Océano Atlántico, Meteosat-6, 7 y 8, y otra sobre el Océano Índico, (Meteosat-5) [25]. Rusia también dispone de un satélite meteorológico (GOMS), que en una órbita geoestacionaria se sitúa sobre el ecuador, al sur de Moscú [26]. La India también dispone de satélites geoestacionarios meteorológicos; y asimismo China, que utiliza los satélites geoestacionarios Fengyun, el FY-2C (situado en una órbita geoestacionaria a 105°E) y el FY-2D (localizado en otra órbita geoestacionaria a $86,5^\circ \text{E}$) [27].

Respecto a estos satélites, es imprescindible hablar brevemente sobre el programa Copernicus. Este es el Programa de Observación de la Tierra de la Unión Europea, que se encarga de observar a la Tierra y estudiar su medio ambiente. La Comisión Europea coordina y gestiona el programa, en cuya ejecución colaboran los Estados miembros, la Agencia Espacial Europea (ESA), la Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos (Eumetsat), el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Medio Plazo, las agencias de la UE y la empresa Mercator Océan [28]. Su misión es la de proporcionar información que ayude a diferentes organizaciones a mejorar la calidad de vida de la ciudadanía europea. El sistema Copernicus no solo trabaja con sus datos satelitales, sino que se apoya en otros procedentes de otros satélites, sistemas de medición terrestre, aéreo y/o marítimos [28]. Así, el principal protagonista de su infraestructura son los satélites de observación terrestre, repartidos en dos

misiones. Sus plataformas están repartidas en dos misiones: las propias de Copernicus, y las dirigidas por organizaciones nacionales, europeas o internacionales. Las específicas del programa son las llamadas Sentinel. Dentro de ellas se encuentran siete diferentes satélites: Sentinel -1, -2, -3, -5P y -6, mientras que los Sentinel -4, y -5 (cuyo sucesor es el Sentinel-5P) son instrumentos a bordo de satélites meteorológicos del Eumetsat [28].

El satélite Sentinel-5P es la primera misión de Copernicus dedicada al monitoreo de la atmósfera de la Tierra, y su principal objetivo es el de realizar medidas atmosféricas con una alta resolución espacial y temporal, para así poder estudiar la calidad del aire y la concentración de gases y aerosoles [4]. Esta plataforma incorpora diferentes sensores específicamente diseñados a la medida de los componentes de la atmósfera, como el espectrómetro TROPOMI, que permite tomar medidas de las cantidades en la atmósfera de diversos gases: O_3 , SO_2 , NO_2 , CO , CH_4 , CH_2O , y de aerosoles[4]. El funcionamiento del satélite y sus sensores serán descritos en el apartado Metodología.

1.5. Hipótesis y objetivos del trabajo

El análisis de la contribución de los procesos volcánicos a la concentración de gases en la atmósfera, depende de la posibilidad de poder estudiar un evento eruptivo desde el inicio hasta el final, para así medir la aportación de este proceso al balance total de gases. Un ejemplo de gran interés, es la erupción del volcán Cumbre Vieja (19 septiembre - 13 diciembre, 2021)[5], en la isla de La Palma.

Esta erupción ha sido la primera en la isla desde la del Teneguía en 1971, y la primera en las Islas Canarias desde 2011, erupción submarina ocurrida en el El Hierro[29]. Ha sido de gran relevancia nacional al ser también la erupción más larga registrada en la isla, y la tercera en las Canarias[30]. Aunque no ha contado con víctimas mortales, los daños materiales han supuesto una evaluación de daños de 842,33 millones de euros[31]. Es por tanto que, durante tantos meses ha recibido la atención mediática, y su influencia ha sido innegable, tanto en el ámbito científico, como económico o político.

En cuanto al ámbito de interés para este trabajo, los datos aportados por Sentinel-5P permiten analizar las emisiones producidas en la erupción, su distribución espacial y evolución, y compararlas con las existentes un año antes de la erupción. De este modo, se puede conocer la importancia de la acción de este proceso en la atmósfera.

Es por todo lo expuesto que, la hipótesis con la que se va a trabajar en este TFG es la siguiente: gracias a las medidas recogidas por TROPOMI, se es capaz de medir la evolución del balance de gases en la atmósfera y estudiar la influencia de la erupción de 2021 en Cumbre Vieja al mismo. Como objetivo general se tiene el obtener, procesar y analizar las medidas de gases, tanto de efecto invernadero directo como indirecto, así como de aerosoles, registradas por TROPOMI en el volcán de Cumbre Vieja antes y durante la erupción. De esta forma, se pretende poder medir la contribución volcánica y modelizar su influencia en el balance total de gases, para así poder estimar correctamente la importancia de este proceso.

De forma específica se quiere medir: por un lado, el SO_2 , ya que al ser de los principales emitidos en las erupciones volcánicas, es importante estudiar las consecuencias de un aumento del mismo en la atmósfera. También se quiere medir la evolución de gases emitidos en menor cantidad, el CO y el NO_2 , para conocer si han sido expulsados en esta erupción, y en caso afirmativo, analizar si esta contribución es mayor o menor que la antrópica. A su vez, al todos estos gases producir O_3 en la atmósfera, ver si la presencia de este en la baja atmósfera sufre algún significativo cambio debido a la erupción. De igual modo, se estudiará la presencia de aerosoles.

Es así que la estructura de la memoria quedará de la siguiente forma; en un primer lugar se introducirá la metodología, que explica las características del satélite utilizado para recoger las medidas, el Sentinel-5P, así como las de su sensor, TROPOMI. También se detallan los procesos de recogida, análisis y procesamiento de las medidas. Seguidamente se exponen los resultados obtenidos, primero de los gases, clasificados por tipo, ordenados de mayor a menor cantidad emitida en las erupciones volcánicas; y por último los aerosoles. Finalmente, se detallan las conclusiones obtenidas.

2. Área de Estudio y Metodología

2.1. Área de Estudio

La zona en la que se ha realizado nuestro análisis corresponde a la isla de La Palma (Figura 1a, cuyas coordenadas se presentan en el pie de figura), que en 2021 sufrió la erupción del volcán de Cumbre Vieja.

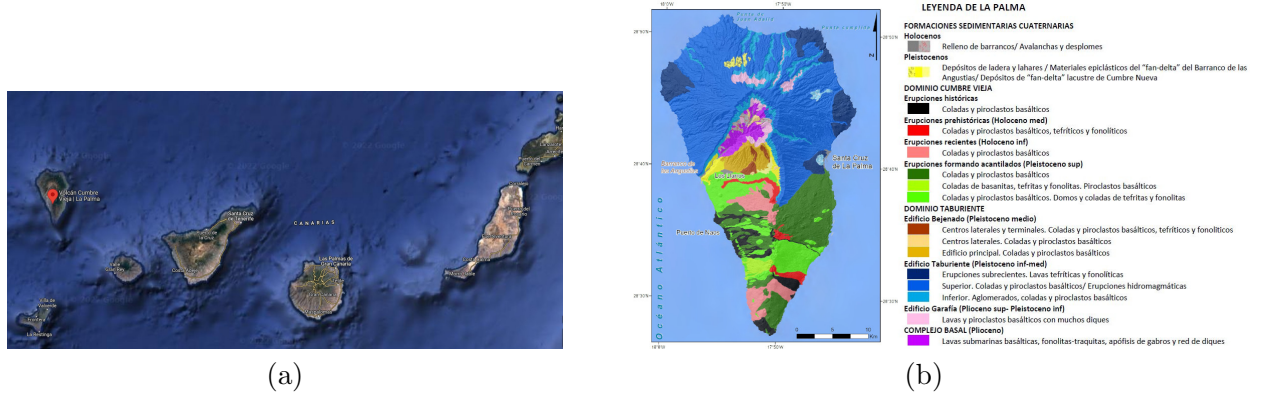


Figura 1: Esquema de situación y geológico de la Isla de La Palma, en la que se describen: a) localización del volcán de Cumbre Vieja en el contexto de las Islas Canarias (tomado de Google Maps [32]), coordenadas del cráter ($17^{\circ} 51'58''\text{W } 28^{\circ} 36' 47''\text{N}$ —GCS-WGS84, datúm DWGS 1984 [33]); b) mapa geológico de la Isla de la Palma (tomado del IGN [34]).

2.1.1. Geología de la isla

Como se puede apreciar en la Figura 1b, en la isla de La Palma se pueden diferenciar dos dominios volcánicos. El primero, situado el tercio norte de la isla, de forma redondeada, denominado dominio Taburiente. El segundo, en la zona sur de la isla, denominado dominio Dorsal, abarca desde el dominio de Taburiente hasta la punta sur de la isla [34].

El Dominio Taburiente es un relieve de gran tamaño y forma troncocónica, con planta semicircular, así como con una elevación media en metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m) de hasta los 2.426 m (Roque de los Muchachos). También, se encuentra una gran depresión central de origen erosivo denominada Caldera de Taburiente. Su origen se encuentra en la superposición de varios estratovolcanes de grandes dimensiones, cuyos cráteres se han ido sucediendo progresivamente en el tiempo, siempre en el mismo lugar. Desde que comenzó la emersión de la isla sobre el nivel del mar, se fueron apilando sucesivas etapas volcánicas subaéreas hasta que el edificio alcanzó alturas que sobrepasaron los 3.000 m. El resultado de este proceso constructivo es una forma hexagonal, que por erosión diferencial se asimila a otra de tipo casi circular, dejando una cúspide central correspondiente a un único volcán [34]. Algunos de los edificios más antiguos identificados son, el volcán Garafía, muy oculto por las fases volcánicas posteriores y compuesto por coladas mayoritariamente basálticas. Sobre él, se edificó el volcán Taburiente [34]. Desde un punto de vista de actividad volcánica, todo el Dominio Taburiente es actualmente inactivo, puesto que el vulcanismo ha migrado hacia el sur, a través de la fisura eruptiva que da lugar a la Dorsal o Cumbre Vieja[34].

El Dominio de la Dorsal está estructurado por un eje eruptivo de dirección norte-sur, en el que se distinguen dos sectores: Cumbre Nueva y Cumbre Vieja. Cumbre Nueva o sector norte, posee una altura muy regular en torno a 1.400 m y una longitud de unos 7 km, con una forma arqueada. Cumbre Vieja o sector sur, posee una altura progresivamente decreciente hasta alcanzar el océano y una longitud de unos 21,5 km, manteniendo la forma arqueada. Sobre la dorsal de Cumbre Vieja se han identificado seis erupciones históricas (últimos 500 años), previas a la de 2021. Las dos últimas (años 1949 y 1971), generaron coladas de lava que discurrieron por los flancos y alcanzaron la costa. Los materiales que se emitieron fueron fundamentalmente lavas básicas (basaltos alcalinos, basanitas, traquibasaltos y tefritas) y depósitos piroclásticos de carácter estromboliano[34]. Desde un punto de vista sísmico, la dorsal ha tenido una sismicidad histórica importante debida, en su mayor parte, a la actividad volcánica ligada a la dorsal de Cumbre Vieja[34].

2.1.2. Cronología de la erupción

Debido a que el objetivo principal del trabajo es estudiar la influencia de esta erupción en el balance de gases total de la atmósfera, es esencial describir brevemente la misma.

La erupción comenzó el 19 de septiembre de 2021[35], aunque fue precedida por la gran actividad sísmica que se había registrado en las semanas anteriores. Desde el 11 de septiembre hasta el 14, fueron detectados un total de 2.935 terremotos, la profundidad de estos era de entre los 8 y 13 km[36]. Esta actividad se fue incrementando, y el hipocentro de los terremotos se fue desplazando hacia el noroeste y progresivamente volviéndose menos profundo, hasta que el 19 al mediodía comenzó la erupción[35]. Dicha erupción ha sido la más larga registrada en la isla, con 85 días de duración, y la tercera en las Islas Canarias [30]. Durante este periodo, hubo continuos seísmos y formación de nuevas bocas, siendo la emanación de diferentes gases constante. La erupción tuvo una alternancia entre fase efusivas (de emisión fundamentalmente de lavas) y eruptivas (expulsiones o flujos de material a la atmósfera). Respecto a la columna de gases, se destaca la llegada de la lava al mar la noche del 28 de septiembre [30], que generó una gran nube de vapor y gases tóxicos. Cabe destacarse que, las emisiones de SO_2 fueron estudiadas por diversos organismos e instituciones. De hecho, en la Figura 2 se muestran las concentraciones de dióxido de azufre medidas por diferentes organismos empleando varios sensores, mostrándose como en función del sensor empleado las concentraciones arrojan un amplio rango de valores.

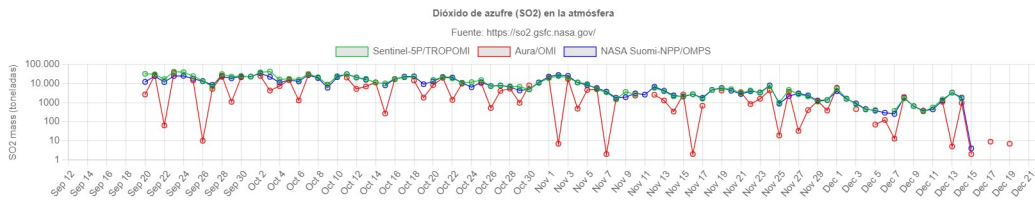


Figura 2: Gráfico de seguimiento de la actividad volcánica del volcán de Cumbre Vieja durante su erupción en 2021. Estas son las medidas de SO_2 en la atmósfera tomadas por los sensores: TROPOMI, OMI y OMPS. Tomado de [37].

Los valores registrados no llegaron a suponer un impacto en el clima a escala global de forma permanente, pero a nivel local ha afectado a la vegetación o incluso a la calidad del agua [38].

En el estudio de la evolución de las gases, es muy interesante cómo la meteorología a pequeña escala fue protagonista. Los valores más altos de SO_2 fue en Puntagorda (al noroeste de la isla y a 20 km del centro emisor), mientras que en estaciones más próximas al volcán (como El Paso), no se llegaron a registrar valores tan elevados. La causa de ello se debe a factores como: la dinámica, las condiciones de estabilidad atmosférica y la orografía de la isla, jugaron un papel fundamental en el transporte, acumulación y dispersión de contaminantes [39].

El Observatorio Atmosférico de Izaña (IZO, AEMET), situado en la isla de Tenerife (a 2,4 km s.n.m. y a 140 km de distancia del volcán), recibió numerosos impactos directos de la nube de dispersión volcánica durante todo el proceso eruptivo. La causa de ello fue la circulación en las capas bajas y medias de la atmósfera, que favoreció que las nubes de cenizas y gases volcánicos se dispersaran sobre el Atlántico subtropical [39]. Los episodios de mayor emisión de gases se produjeron en las fechas de octubre, con incrementos notables en las concentraciones superficiales de los siguientes gases: SO_2 (se llegó a superar el rango de detección del analizador de este gas, fijado en 3000 ppb), CO_2 (i.e., un incremento de 80 ppm respecto al valor estacional) y CO (i.e., un incremento de 1500 ppb respecto al valor estacional) [39]. En general, estos eventos de máximas emisiones tuvieron duraciones de varias horas y se produjeron principalmente por la noche, ya que en esas horas se favorece la circulación dominante en las zonas subtropicales, la que ocurre en el plano vertical, arrastrando esta la nube de dispersión volcánica hacia el observatorio. Finalizados estos episodios, las concentraciones de estos gases recuperaron sus condiciones de fondo (SO_2) o su tendencia estacional (CO_2 y CO) [39].

El 19 de noviembre se produjo el mayor seísmo de la erupción, de magnitud 5,1, produciéndose a 37 km de profundidad[40]. Poco a poco la actividad volcánica fue disminuyendo, por ejemplo, entre el 29 y 30 de noviembre, el cono principal dejó de expulsar lava y cenizas durante un total de 30 horas[41]. Finalmente, el 13 de diciembre el volcán se reactivó con fuerza emitiendo grandes cantidades de dióxido de azufre[42], sin embargo, a la noche la actividad volcánica se desplomó súbitamente, con tan sólo terremotos de muy baja magnitud[43]. El 25 de diciembre se declaró que la erupción tuvo su fin el 13 de

2.2. Satélites y sensores

Con el fin de obtener las medidas requeridas para llevar a cabo el presente trabajo, se ha hecho uso de datos recogidos por satélites de observación terrestre. En concreto, en este trabajo se han empleado datos registrados por el Sentinel-5P. A continuación, se hará una descripción sucinta de esta plataforma espacial, de los sensores que lleva instalados a bordo y de los datos capturados por los mismos, y que han sido empleados en este estudio.

2.2.1. Satélites de observación terrestre

Como se ha mencionado en la Introducción, este tipo de satélites artificiales están diseñados para la observación terrestre desde una determinada órbita. Sus aplicaciones principales suelen estar enfocadas a ámbitos como: la meteorología, cartografía o medioambiente. Dependiendo de la misión a la que vayan a estar destinados, sus características (diseño de plataforma, órbita e instrumentación a bordo) varían [19]. Por ejemplo, para satélites enfocados a la meteorología, es habitual emplear una órbita geoestacionaria, en la que el satélite tenga una visión constante de un hemisferio, y así obtener una elevada cobertura de la Tierra, aportando una resolución sobre el terreno reducida (gran escala) y una frecuencia temporal alta (alta frecuencia de imágenes). Sin embargo, si el objetivo es realizar un estudio íntegro de la superficie terrestre, u obtener imágenes de alta resolución de dicha superficie, el satélite usará una órbita baja (LEO, *Low Earth Orbit*), de entre unos 160 a 1000 km sobre la superficie terrestre[21], que permite el paso del sensor por puntos característicos de la Tierra en momentos del día, justo cuando el Sol se encuentra en la misma vertical, aportando la misma iluminación (sincrónico solar).

La identificación de gases y aerosoles en la atmósfera se lleva a cabo por medio de la teledetección, que permite la recogida de información sobre un objeto sin estar en contacto físico directo con el mismo. En síntesis, los fundamentos de la teledetección se basan en la espectrografía que estudia la interacción entre la radiación electromagnética y la materia, con absorción o emisión de energía radiante.[44]. Así, la radiación reflejada y/o emitida por el objeto al espacio está influenciada por los elementos que componen su superficie y/o su atmósfera (compuesta de nubes de vapor de agua, gases y aerosoles), véase a continuación la Figura 3:

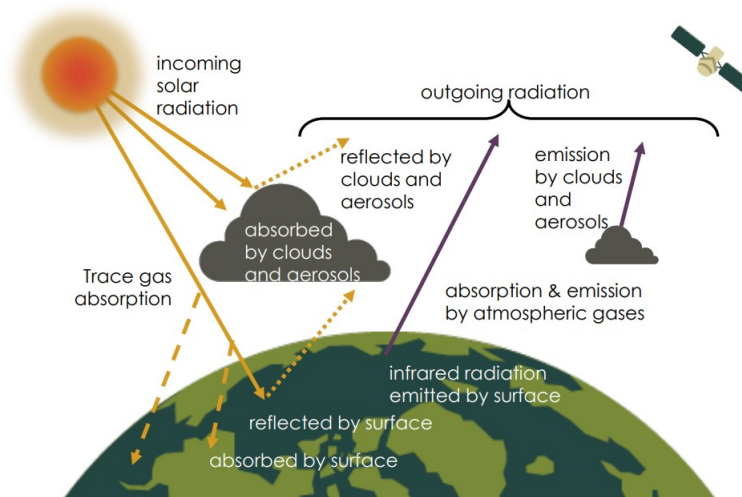


Figura 3: Esquema del camino que sigue la radiación solar incidente, así como de la saliente a la Tierra. Obtenido de [44].

La energía emitida por el Sol, atraviesa la atmósfera del planeta, llegando a su superficie y se refleja hacia el espacio. Los compuestos presentes en estos ámbitos (atmósfera y superficie), absorben parte de dicha energía o son capaces de emitir otra parte en forma de bandas específicas del espectro electromagnético; de manera que se puede conocer la composición de dichos elementos a través de la

bandas implicadas. En el caso particular de este estudio, la radiación proveniente del Sol (irradiancia), durante su camino a través de la atmósfera, será absorbida por los compuestos que forman parte de la misma (generando el efecto invernadero directo), causante de que la temperatura del planeta sea tan benigna para la vida, mientras que el resto puede ser absorbida por los elementos que forman parte de la superficie, o bien, es reflejada de vuelta al espacio (reflectancia). Nótese, que al viajar de vuelta por la atmósfera también puede ser absorbida de nuevo por los gases o aerosoles presentes en la atmósfera. Asimismo, en este camino se sumará la aportación de radiación en el infrarrojo, (> 700 nm) emitida por la superficie terrestre debido a mareas, actividad volcánica y geotérmica, etc., o por los gases atmosféricos, que generan el efecto invernadero indirecto, así como la absorbida por las nubes y aerosoles. Por tanto, se puede observar como, la intensidad de la radiación reflejada o emitida al espacio depende, no sólo de las condiciones de la superficie terrestre, sino también de su atmósfera. Esto hace que las medidas tomadas por los satélites contengan información de ambas partes [44].

Sin embargo, existe un problema en este anterior esquema, y es que la energía reflejada por la atmósfera y superficie terrestre, en una determinada dirección en la que se encuentra la plataforma, es leída por el sensor (radiancia) y debe ser transformada en la que verdaderamente refleja (reflectancia) el objeto a estudiar. Para evitar el problema, habitual en los estudios de teledetección, se realiza una corrección sencilla y directa de la radiancia a la reflectancia que teóricamente refleja la superficie y atmósfera terrestre, al techo de la atmósfera (TOA, top of atmosphere), para una superficie plana.

Por tanto, los satélites miden la retrodispersión de la radiación emitida en el UV, visible y térmico, conocida como espectro de absorción de cada gas, de manera que es posible reconocer la “huella” de cada uno de los materiales constituyentes de la atmósfera implicados. Posteriormente, se genera un modelo físico que pueda explicar las densidades, cantidades y concentraciones de dichos materiales en la atmósfera para cada gas traza. Estudiando estos picos, se identifica y se mide qué proporción de cada gas existe en la columna vertical medida de la atmósfera, como se detallará más adelante [44].

Seguidamente se detallan las características de la plataforma Sentinel-5P, que ha sido empleada en la media de las contribuciones de gases y aerosoles del presente trabajo.

2.2.2. Sentinel-5P

Como ya había sido mencionado en el apartado Introducción, la infraestructura principal del programa Copernicus, empleada para la media de los contaminantes atmosféricos, es la plataforma Sentinel-5P (Precursor) y su espectrómetro TROPOMI. La plataforma es un satélite de alta resolución temporal y espacial, con una órbita baja (824 km) [4]. Su misión es la de realizar medidas atmosféricas, con diversas aplicaciones, entre ellas estudiar la calidad del aire, el ozono, radiación ultravioleta o el monitoreo y la predicción del clima. Este sensor es el resultado de la colaboración entre la ESA, la Comisión Europea y un conjunto de empresas y organismos holandeses, entre los que se encuentran la Oficina Espacial Holandesa NSO (antes NIVR), el Real Instituto Meteorológico Holandés KNMI, el Instituto Holandés de Investigación Espacial SRON, TNO y Dutch Space [4]. Fue construido por Astrium (Reino Unido) y lanzado el 13 de Octubre de 2017, desde el cosmódromo de Plesetsk (Mirny, Rusia) por Eurokot Launch Services GmbH (un proveedor comercial de lanzamientos de naves espaciales con sede en la ciudad alemana de Bremen). Los primeros datos fueron publicados el 10 de Julio de 2018 [4].

Desde un punto de vista orbital, posee una órbita sincrónica con el Sol casi polar, con un cruce ecuatorial del nodo ascendente a las 13:30 h (hora solar local media); la distancia angular entre el plano de la órbita y el ecuador (inclinación de la órbita) es de $98,7^\circ$ (tipo alto) [4]. Empleando esta órbita sincrónica al Sol, la superficie de la Tierra analizada está siempre iluminada con el mismo ángulo solar. La resolución temporal del satélite, o tiempo que tarda el satélite en pasar por el mismo punto geográfico de la Tierra, es de 16 días. No obstante, el satélite realiza 14 órbitas a la Tierra por día, o lo que es, aproximadamente, 227 órbitas por ciclo [4].

Sentinel-5P constituye un ejemplo de apoyo sinérgico entre diferentes plataformas espaciales. Así, aprovecha datos del sensor Visible/Infra-red Imager and Radiometer Suite (VIIRS) montado en el satélite Suomi-NPP (National Polar-orbiting Partnership) de la NASA/NOAA. El satélite Suomi-NPP aporta datos de máscara de nubes co-localizados, que son de mayor resolución espacial que la máscara de nubes calculada a partir de los datos de Sentinel-5P. Para llevar a cabo dicho aprovechamiento de la órbita, Sentinel-5P se diseñó para que éste se sitúe detrás de Suomi-NP, en 3,5 minutos en el Nodo Ascendente de Tiempo Local (LTAN), lo que permite que la franja de observación de Sentinel-5P permanezca dentro

de la escena observada por Suomi-NPP [4].

2.2.3. TROPOMI

El espectrómetro de imágenes TROPOMI posee una visión vertical descendente (Nadir viewing); tiene una resolución espectral que va desde el ultravioleta (UV), pasando por el infrarrojo cercano (NIR) y alcanzando el infrarrojo de onda corta o SWIR [44]. El instrumento utiliza técnicas de teledetección pasiva para medir la radiación solar reflejada y radiada por la Tierra al techo de la atmósfera (TOA). Se trata de un dispositivo de barrido (sin escaneo) con un ancho de barrido de ~ 2600 km en la superficie de la Tierra. Los datos aportados comprenden un rango de latitudes que oscila entre los 7° N y 7° S [45]. El tamaño típico de los píxeles (cerca del nadir), será de $7 \times 3,5$ km² para todas las bandas espectrales, con la excepción de la banda UV1 (7×28 km²) y las bandas SWIR (7×7 km²) [46].

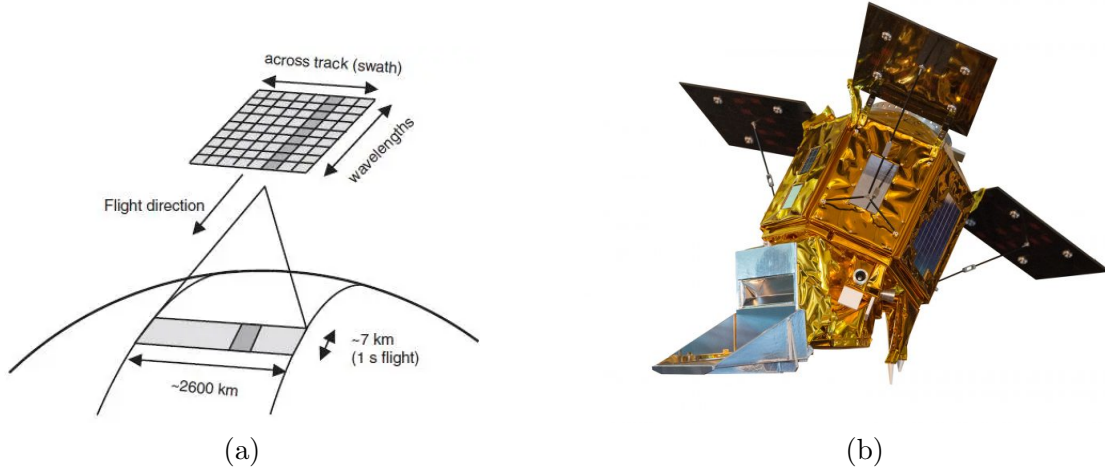


Figura 4: Imágenes de interés sobre la plataforma Sentinel-5P y TROPOMI: a) principio de medida de TROPOMI. El píxel de gris oscuro es transformado en un espectro en el detector bidimensional, todos los píxeles en el barrido de 2600 km de ancho, son medidos a la vez. (Veefkind et al., 2012); b) imagen de Sentinel-5P [47].

La resolución espectral de cada una de estas bandas, el número de canales dedicados a cada banda así como los gases que se pueden detectar, se presentan en la Tabla 1:

Tabla 1: Resoluciones radiométricas y espectrales de cada una de las banda del sensor TROPOMI. La tabla muestra la resolución con la que se trabaja en cada rango del espectro, así como el número de canales dedicados a cada banda. Además describe los gases de los cuáles se puede obtener información en función del rango espectral [44].

Rango Espectral	Número de canales	Resolución Espectral	Producto
270-495 nm (UV-VIS)	1200	0.55 nm	O ₃ , NO ₂ , SO ₂ , HCHO
710-775 nm (NIR)	600	0.55 nm	Aerosoles
2305-2385 nm (SWIR)	800	0.25 nm	CO, CH ₄

La resolución de TROPOMI es alta en comparación con OMI (Ozone Monitoring Instrument), otro sensor empleado en el estudio atmosférico. OMI trabaja en el rango de 350 a 500 nm, con una resolución espectral de entre 0.45 a 1 nm, y un resolución espacial de 13×24 km² [44], lo que le permite obtener información de la presencia de diversos gases y aerosoles, pero sin tanto detalle como TROPOMI.

Existen diferentes productos de datos asociados a los tres niveles de procesamiento de TROPOMI[48]:

- (a) Nivel 0: Este tipo de datos no son de acceso público. Son los datos directamente registrados por los cuatro receptores, ordenados cronológicamente, tanto de las medidas atmosféricas, como de las de calibración. También se incluye información sobre el estado de los componentes del satélite, su posición, etc [48].

- (b) Nivel 1B: Los datos de este producto son de carácter radiométrico y corresponde tanto a las radiancias de todas las bandas espectrales registradas a nivel del TOA, como de las irradiancias solares. Se encuentran geolocalizadas y radiométricamente corregidas, y son de uso público [48].
- (c) Nivel 2: Estos son, por un lado las columnas totales verticales geolocalizadas del ozono, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, monóxido de carbono, formaldehídos, metano. También las columnas verticales troposféricas geolocalizadas del dióxido de nitrógeno, así como el perfil vertical geolocalizado del ozono. Además se dispone de información geolocalizada sobre nubes y aerosoles; índice de absorción de aerosoles y altura de la capa de aerosoles. Todos estos productos son de uso público.[48]

A su vez, también existen tres diferentes tipos de procesamiento de los datos:

- (a) NRT (Near Real Time): Los datos tratados con este tipo de procesamiento están disponibles tres horas después de su medición. Ofrece las columnas totales de ozono, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, monóxido de carbono, formaldehídos, perfiles verticales de ozono e información sobre nubes y aerosoles [48].
- (b) OFFL (Offline): Los datos tratados con este tipo de procesamiento están disponibles con cierto retardo dependiendo del tipo de producto que se trate. Así, para los datos de nivel 1-B se pueden descargar a las 12 horas de la medida. Sin embargo, cuando se precisa de datos de metano, ozono o las columnas totales de NO₂, se necesitan de 5 días para poder ser descargados[48].
- (c) Reprocesamiento: No hay limitaciones de tiempo. El reprocesamiento de los productos de Sentinel-5P se llevará a cabo cuando se consideren necesarias actualizaciones importantes de los productos [48].

Debido al objetivo de este trabajo, se ha trabajado con productos de nivel 2, y con procesamiento OFFL. Específicamente, las columnas verticales totales de ozono, dióxido de azufre y monóxido de carbono, así como la columna vertical troposférica de dióxido de nitrógeno, y el índice de aerosoles.

2.3. Descarga de los datos

La descarga de los datos se realiza a través del Copernicus Open Access Hub (<https://s5phub.copernicus.eu/dhus/#/home>). Una vez seleccionada la fecha de las medidas, el tipo de datos y el nivel de procesamiento, el interface permite delimitar la zona de extracción geográficamente (Figura 5); para este trabajo, se recuerda que se han seleccionado exclusivamente datos de nivel 2, que son de acceso público.

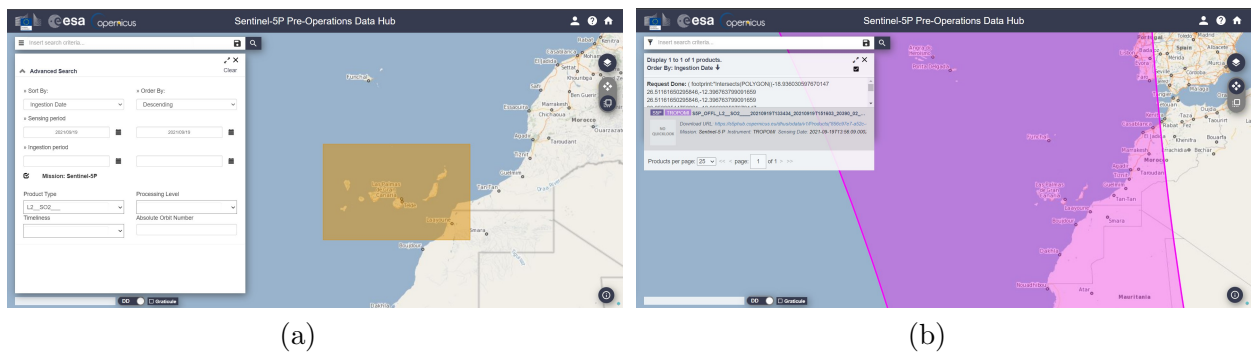


Figura 5: Ejemplo de descarga de datos de la columna vertical de SO₂, en la que se muestra: a), pantalla con las variables que deben ser introducidas, como el tipo de producto (SO₂), la misión (Sentinel-5P), día de medida (el 19 de Septiembre de 2021), así la zona geográfica de interés, que comprende las Islas Canarias (recuadro amarillo); b), archivos disponibles de descarga que se ajustan a las variables anteriores (el paquete de datos proporcionado se ajusta a la zona geográfica coloreada en rosa).

Una vez descargado el archivo de datos pertinente, es necesario conocer su formato y estructura para proceder a su correcto procesamiento. Seguidamente se detallan estos aspectos.

2.4. Nomenclatura de los ficheros, estructura de los datos, procesamiento y análisis

Los archivos de datos descargados poseen un nombre extenso que hace referencia a una serie de parámetros importantes para su tratamiento, separados por subguiones; como el ejemplo que se presenta a continuación, correspondiente al fichero descargado en la Figura 5 (b):

`S5P_OFFL_L2_SO2_20210919T133434_20210919T151603_20390_02_020201_20210921T150516.nc`

La nomenclatura empleada en el nombre del fichero hace referencia a los siguientes datos y parámetros: S5P_ (fichero de Sentinel-5P); OFFL_ (tipo de procesamiento de los datos, que en este caso es Offline); L2_ (datos correspondientes al nivel 2); SO2_ (los datos corresponden al tipo de producto SO₂). A continuación, aparece la fecha y hora a la que corresponde la primera medida, en este caso es el 19 de Septiembre de 2021 a las 13:34:34 UTC; seguido de la última medida que contiene este paquete de datos, en este caso es el 19 de Septiembre de 2021 a las 15:16:03 UTC. Los últimos códigos del fichero hacen referencia a la órbita y el momento cuando fueron procesados los datos.

Los datos incluidos en este fichero poseen una estructura matricial de 4172 x 450 elementos, con las medidas de las columnas verticales del gas objeto de estudio (en el caso del ejemplo SO₂). Asimismo, aparecen otras matrices del mismo tamaño con las precisiones de las columnas, seguido de otra con la calidad de los datos, *qa value*. Este último parámetro toma valores entre 0 y 1, que indican si la medida registrada se capturó sin nubosidad (1) o con cierta nubosidad (≤ 1) o si la superficie estaba recubierta de nieve o hielo ($\ll 1$), factores que lógicamente afectan a la reflectancia. Además, es un indicador de posibles errores que hayan podido registrarse durante la medida, de manera que un valor 0 indica que ha habido un error de procesamiento [44]. Obviamente, cada elemento de la matriz está asociado a sus coordenadas espaciales, expresadas en forma de longitud y latitud. Adicionalmente, aparece información sobre la órbita, posicionamiento satelital, calidad de sensores, etc., necesarios para que Copernicus, evalúe, catalogue y distribuya la información registrada por el sensor, pero que no son de gran importancia para la construcción de esta memoria.

Una vez descargados los datos, se pueden procesar construyendo códigos propios, o mediante otros escritos en programación en abierto (Python). Una de las fuentes de código en abierto más empleadas es la proporcionada por la NASA, dentro del programa ARSET (Applied Remote Sensing Training), en concreto, la correspondiente al programa de entrenamiento denominado: *High Resolution NO₂ Monitoring From Space with TROPOMI* [44]. En el presente trabajo, partiendo de dicho código como referencia, se ha elaborado otro para el tratamiento individualizado de los gases analizados en este trabajo (NO₂, SO₂, CO, O₃, y aerosoles), que vuelca los resultados en un archivo .txt para una manipulación más sencilla de lo mismos. Los códigos adaptados y aplicados en este trabajo se presentan en el Apéndice C. Dichos códigos han sido ejecutados en el entorno de desarrollo integrado SPYDER (v 3.7).

En el apartado C.1., se presenta el código empleado para obtener los datos en la localización del volcán de Cumbre Vieja, introduciendo sus coordenadas (28,61° N-17,87° E, Figura 1). Los resultados aportados por el código, muestran los valores de búsqueda en el punto, que pueden ser: la columna del gas en ese punto, la precisión de ese valor o su *qa value*. Asimismo, aporta resultados equivalentes correspondientes a un área de influencia, centrada en el punto, de tamaño 3x3 o 5x5 respecto a la posición central solicitada en él. Recordemos que, en virtud del tipo de gas y tratamiento de medida, el tamaño de píxel varía entre 7x3,5 km² y 7x28 km². La mayoría de los gases medidos en este trabajo corresponden con un tratamiento en el ultravioleta (UV1), que corresponde con un tamaño de píxel de 196 km² (7x28 km²), por lo que una superficie de 5x5 píxeles corresponden a 4.900 km², muy superior al tamaño de la isla de La Palma (708,32 km² [49]). Dado a que en este trabajo se quieren analizar los efectos superficiales de la erupción, los resultados analizados corresponden con los valores promedio dentro de la matriz 3x3.

En el apartado C.2. se muestra el código empleado para extraer los mapas de los valores de las columnas verticales de los gases y aerosoles analizados, por píxel, empleando el módulo *Basemap* dentro de Python. Lógicamente, y en apartado separado, aporta los valores medios, mediana, desviación estándar y *qa value* en todo el rango de longitudes y latitudes de la órbita observada por el satélite.

La ventana de observación empleada ha variado según el tipo de análisis efectuado. Con el fin de conocer los valores de las columnas verticales totales de los contaminantes en el año anterior a la erupción, se llevó a cabo un seguimiento mensual (3 medidas por mes) dentro de ese año. Las medidas comenzaron desde la fecha de inicio de la presente investigación (febrero de 2022), hacia atrás, abarcando un año. Por lo que los valores de las columnas verticales de los contaminantes se realizaron desde marzo 2021

hasta febrero 2022, incluyendo por tanto la duración de la erupción. La comparación de esas lecturas con valores naturales se efectuó mediante datos obtenidos del sensor, con la misma ventana de observación pero correspondientes al periodo que va desde marzo de 2020 hasta febrero de 2021 (medidas que aportan los valores habituales de los contaminantes).

Con el fin de conocer la evolución diaria de los valores de las columnas verticales totales de los contaminantes durante la erupción, se procedió a la lectura diaria del sensor desde septiembre 2021 a diciembre 2021. De igual modo que en el caso anterior, se procedió a realizar una lectura comparativa diaria para el mismo periodo del año precedente, desde septiembre de 2020 a diciembre de 2020.

Debe tenerse presente que, a pesar de las ventanas de observación descritas, las órbitas tratadas por el sensor no permiten medir todos los días. No obstante, aprovechando ciclos adyacentes al ámbito geográfico estudiado, es posible tener disponibilidad de datos prácticamente diarios.

El análisis de los datos ha permitido transformar los valores de las columnas verticales de los gases en estimaciones plausibles de sus concentraciones, a techo de la troposfera (aproximadamente 10 km) lo que es aplicable a la mayoría de las moléculas de NO₂, CO o SO₂. Partiendo de los valores extraídos mediante el código presentado en el Apéndice C.1, y asumiendo que los gases presentes dentro de la troposfera (hasta 10 km), poseen una concentración homogénea, se puede estimar esta concentración empleando la siguiente expresión Ec.1[50]:

$$C = \frac{C_{COL}}{H} \cdot M \cdot A \quad (1)$$

dónde C_{COL} es la columna total, medida en mol/m², M es la masa molar en g/mol, H es la altura a la que se quiere conocer el valor de la concentración, expresada en metros, en este caso se trabajará con $H = 10$ km (10^4 m), que es aproximadamente la región límite de la troposfera. Debe tenerse en cuenta que la constante $A = 1000$ se emplea para convertir los valores a mg y así obtener la concentración en mg/m³.

No obstante, existen otras propuestas en la literatura [44], para estimar la concentración, basadas en la combinación de la vida media del gas y altitud a la que se realiza la medida, que no han sido consideradas en el presente trabajo.

En cuanto al índice de aerosoles, AI, es importante poner de manifiesto que se trata de un índice cualitativo. Éste indica la presencia de capas de aerosoles, siempre y cuando estos absorban radiación de forma significativa [51]. Los principales tipos de aerosoles que permiten trabajar con este índice son: el polvo de desierto, quema de biomasa y cenizas volcánicas [51]. El cálculo de este índice se basa en los cambios de longitud de onda (dispersión Rayleigh), en el rango espectral del UV, dónde la absorción producida por el ozono es muy escasa[51]. El AI es calculado empleando la Ec.2, teniéndose en cuenta que el albedo de la superficie terrestre es constante para los pares de longitudes de onda con los que se trabaja, λ_1 y λ_2 . TROPOMI emplea dos diferentes pares de longitudes de onda: $\lambda_1 = 340$ nm y $\lambda_2 = 380$ nm ó $\lambda_1 = 354$ nm y $\lambda_2 = 388$ nm [51].

$$AI = 100 \cdot \log_{10} \left(\frac{R_{mes}(\lambda_2)}{R_{mes}(\lambda_1)} \right) - 100 \cdot \log_{10} \left(\frac{R_{calc}(\lambda_2, A_{ler}(\lambda_2))}{R_{calc}(\lambda_1, A_{ler}(\lambda_2))} \right) \quad (2)$$

siendo $R_{mes}(\lambda_2)$ y $R_{mes}(\lambda_1)$ la reflectancias medidas a dos longitudes de onda, cumpliéndose que $\lambda_2 > \lambda_1$. $R_{calc}(\lambda_2, A_{ler}(\lambda_2))$ y $R_{calc}(\lambda_1, A_{ler}(\lambda_2))$ son las reflectancias calculadas para una atmósfera dónde solo hay dispersión Rayleigh. Por último, $A_{ler}(\lambda_2)$, es la reflectancia efectiva para una superficie de Lambert ideal[51].

En el apartado siguiente se muestran los resultados obtenidos, así como el análisis de los mismos.

3. Resultados

A continuación se presentan los resultados obtenidos del análisis y procesamiento de las medidas recogidas por TROPOMI, con respecto a los gases y aerosoles. Dichos contaminantes, fueron expulsados durante la erupción del volcán de Cumbre Vieja, y es estudiada su contribución al balance total de gases en la atmósfera. Los resultados obtenidos de este trabajo, se presentan organizados por volumen de emisión; primero se detallan los gases, y posteriormente los aerosoles. Estos gases han sido clasificados en tres clases: por un lado, los que contribuyen al enfriamiento de la atmósfera: dióxido de azufre y aerosoles; por otro lado, los de efecto invernadero indirecto: el monóxido de carbono y el dióxido de nitrógeno. Por último, los de efecto invernadero directo, incluyendo el ozono.

3.1. Dióxido de azufre: SO₂

El gas que más se ha emitido durante la erupción es el dióxido de azufre, SO₂. El rango de valores de dióxido de azufre emitido en el año precedente a la erupción (2020), se encuentra en torno 0 a $5 \cdot 10^{-4}$ mol/m² (Figura 6a). Los valores de la concentración mensual de SO₂ un año antes de la erupción son muy bajos, prácticamente nulos en la zona próxima al volcán. En detalle (Figura 6a superior), la distribución de valores mensuales es muy oscilante como se aprecia en su media móvil, mostrando un incremento hacia finales de diciembre principios de enero de 2021. La precisión de los datos aportada por TROPOMI es muy elevada, aunque su horquilla de error también lo es.

El rango de valores de dióxido de azufre emitido en el año de la erupción (2021), se encuentra en torno 0 a 0,2 mol/m² (Figura 6b). En las primeras fechas de 2021, las concentraciones en la atmósfera muestran una tendencia constante. Los valores de la concentración mensual de SO₂ en el año 2021 son nuevamente bajos, con excepción de los registrados durante las fechas de la erupción, como se aprecia en su media móvil. Se aprecia claramente un pico de valores coincidente con las fechas de mayor actividad volcánica (octubre 2021), aunque esta continua hasta diciembre de 2021.

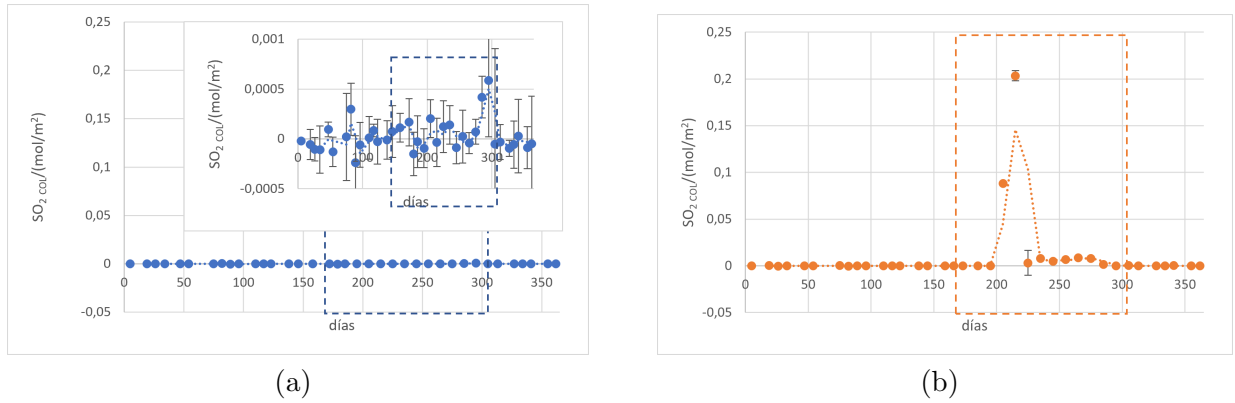
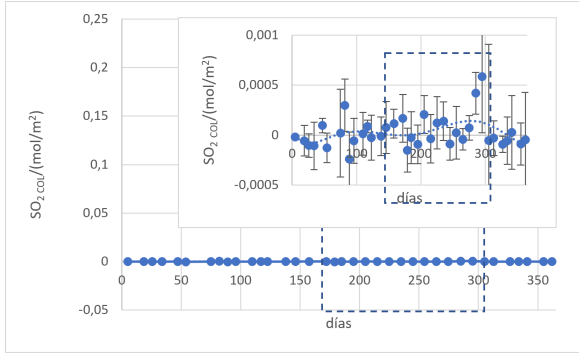


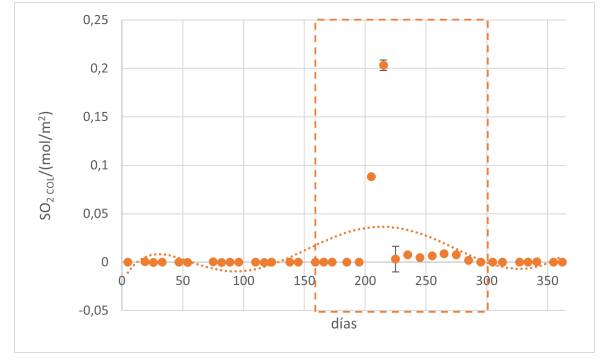
Figura 6: Medidas de la columna vertical total de SO₂ recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde marzo de 2020 hasta febrero de 2021; superior, detalle de dichas medidas ampliando su escala de representación; la línea de puntos azul muestra un ajuste por medio de su media móvil; b) desde marzo de 2021 hasta febrero de 2022; la línea de puntos naranja muestra un ajuste por medio de su media móvil. La zona recuadrada en ambas figuras coincide con las fechas próximas a la erupción.

Los datos recogidos por TROPOMI muestran como la media móvil de las columnas verticales de SO₂ del año 2021 llegan a ser de casi 0,15 mol/m², alcanzando su máximo en el torno a 0,2 mol/m², lo que supone un aumento del 200 %.

Con el fin de poder estudiar con mayor precisión la tendencia de los valores mensuales, se han realizado tres ajustes diferentes. El mejor índice de confianza es ofrecido por el ajuste polinómico, que se presenta en la memoria a continuación (Figura 7). El resto de los ajustes se presentan en el apéndice A.1. Estos son por orden: un ajuste lineal (Apéndice A.1., Figura 31) y un ajuste logarítmico (Apéndice A.1., Figura 32). En ambos casos, se aprecia que el ajuste es bastante bajo, por tanto, se descartan para la reflexión. El ajuste mediante a una función polinómica de grado sexto (Figura 7) presenta índices de confianza que oscilan entre $R^2 = 0,167$ (año 2020) y $0,1847$ (año 2021). Los resultados muestran que para el año 2020, la función es casi constante, mientras que para el año 2021 la función es más oscilante, teniendo un máximo muy apreciable en los meses de la erupción volcánica.



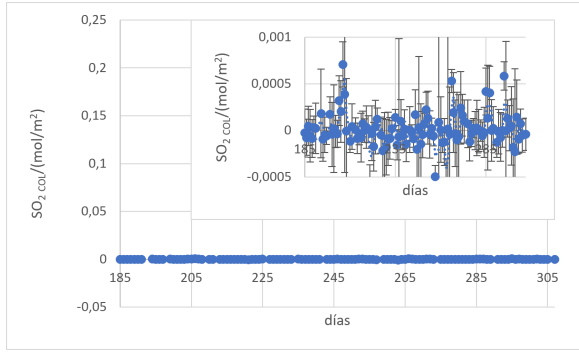
(a)



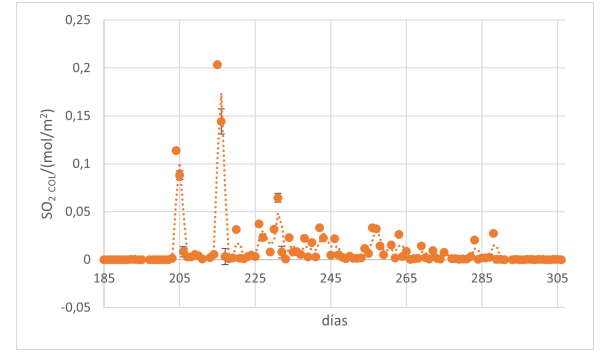
(b)

Figura 7: Medidas de la columna vertical total de SO_2 recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde marzo de 2020 hasta febrero de 2021; superior, detalle de dichas medidas ampliando su escala de representación; la línea de puntos azul muestra un ajuste polinómico, de ecuación: $y = 4 \cdot 10^{-17}x^6 - 4 \cdot 10^{-14}x^5 + 2 \cdot 10^{-11}x^4 - 4 \cdot 10^{-9}x^3 + 3 \cdot 10^{-7}x^2 - 1 \cdot 10^{-5}x + 4 \cdot 10^{-5}$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,167$; b) desde marzo de 2021 hasta febrero de 2022; la línea de puntos naranja muestra un ajuste polinómico, de ecuación: $y = -5 \cdot 10^{-15}x^6 + 6 \cdot 10^{-12}x^5 - 3 \cdot 10^{-9}x^4 + 7 \cdot 10^{-7}x^3 - 6 \cdot 10^{-5}x^2 + 0,0024x - 0,0212$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,1847$. La zona recuadrada en ambas figuras coincide con las fechas próximas a la erupción.

A pesar de que este breve análisis ofrece resultados sensibles para extraer una serie de conclusiones valiosas, se ha querido añadir aún más precisión en el mismo. Como ya ha sido descrito en la sección de Metodología, durante las fechas próximas a la erupción se ha intensificado la ventana de observación de la señal a medidas diarias, obteniéndose los resultados mostrados en la Figura 8. La ventana de observación elegida muestra como, en el año 2020 aparecen otros máximos del mismo orden al identificado en el análisis anterior, y dentro del periodo de tiempo equivalente a la erupción, con valores entre $5 \cdot 10^{-4}$ y $1 \cdot 10^{-3}$ mol/m² (Figura 8a). En el año 2021 se observa una tendencia oscilante muy marcada, con valores equivalentes a los presentados en el análisis anterior (Figura 8b).



(a)



(b)

Figura 8: Medidas de la columna vertical total de SO_2 recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde septiembre de 2020 hasta diciembre de 2020; superior, detalle de dichas medidas ampliando su escala de representación; la línea de puntos azul muestra un ajuste por medio de su media móvil; la línea de puntos azul muestra un ajuste por medio de su media móvil; b) desde septiembre de 2021 hasta diciembre de 2021; la línea de puntos naranja muestra un ajuste por medio de su media móvil.

Durante el periodo de la erupción, son evidentes las fluctuaciones en el valor de la columna vertical total de dióxido de azufre. Se puede apreciar un primer máximo correspondiente al día 204 (19 de septiembre de 2021), día de comienzo de la erupción. Un segundo máximo, entre el día 212 y 218 (28 de septiembre, 2 de octubre de 2021) correspondiente con el mayor momento de emisión y con la fecha en que las lavas alcanzaron el océano, desprendiéndose en estos días una gran cantidad de gases potencialmente tóxicos. A partir de ese momento, la tendencia es descendente hasta registrar el último pico, el día 288 (13 de diciembre de 2021). Esta fecha, coincide con el fin declarado de la erupción. A

partir de este momento, la cantidad de SO_2 vuelve a la tendencia que mostró en 2020. Por tanto, resulta indiscutible la importancia e influencia de la erupción al balance de SO_2 en la atmósfera.

Aplicando un mismo enfoque que con los resultados anteriores, el mejor ajuste se obtiene con un polinomio de sexto grado (Figura 9), aunque el índice de confianza ofrece un valor inferior al anterior. Los ajustes lineales (Apéndice A.1., Figura 33) y logarítmicos (Apéndice A.1., Figura 34), presentan índices de confianza reducidos equivalentes a los ya descritos para valores mensuales. Se distingue como en el año 2020, la función que mejor describe los resultados es prácticamente constante con muy leves fluctuaciones, Figura 9a. Sin embargo, para el 2021, aunque la función es también fluctuante, dichas fluctuaciones son mucho más amplias, coincidiendo lógicamente el máximo con el comienzo de la erupción, y reduciéndose a medida que va concluyendo esta, Figura 9b.

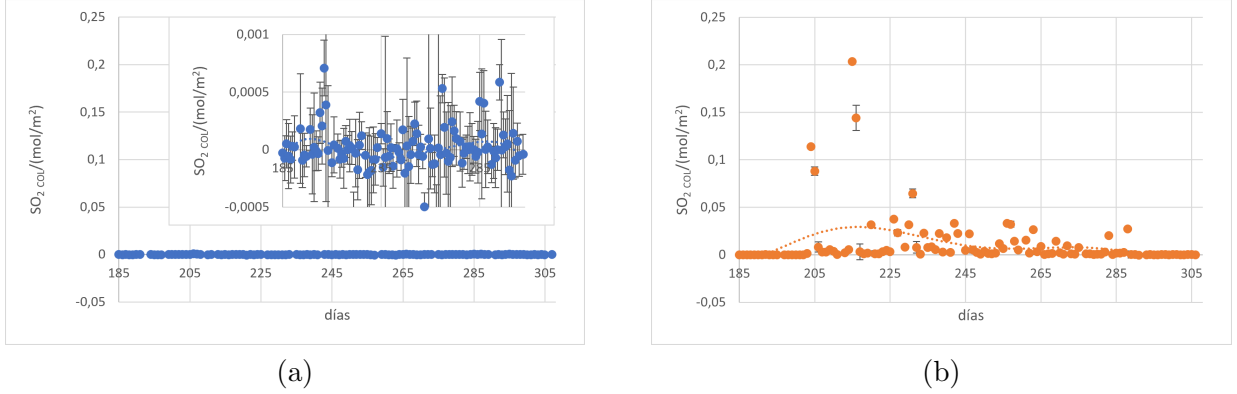


Figura 9: Medidas de la columna vertical total de SO_2 recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde septiembre de 2020 hasta diciembre de 2020; superior, detalle de dichas medidas ampliando su escala de representación; la línea de puntos azul muestra un ajuste por medio de su media móvil; la línea de puntos azul muestra un ajuste polinómico, de ecuación: $y = -1 \cdot 10^{-14}x^6 + 1 \cdot 10^{-11}x^5 - 9 \cdot 10^{-9}x^4 + 3 \cdot 10^{-6}x^3 - 0,0006x^2 + 0,0587x - 2,4325$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,0832$; b) desde septiembre de 2021 hasta diciembre de 2021; la línea de puntos naranja muestra un ajuste polinómico, de ecuación: $y = 3 \cdot 10^{-12}x^6 - 4 \cdot 10^{-9}x^5 + 3 \cdot 10^{-6}x^4 - 0,0009x^3 + 0,1612x^2 - 15,461x + 612,87$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,1272$.

Finalmente, combinando los datos de la ventana de observación mensual con la diaria, se obtiene una visión amplia de la evolución del SO_2 , el año anterior a la erupción (Figura 10a), y el año durante el cual se desencadenó la misma (Figura 10b), en el que se aprecia con claridad el incremento en los valores de la columna vertical de SO_2 .

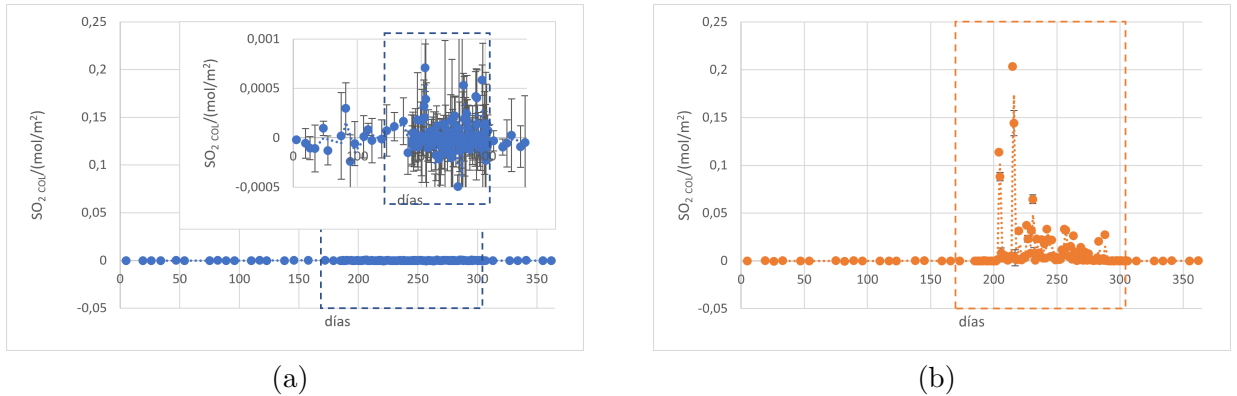


Figura 10: Medidas de la columna vertical total de SO_2 recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde marzo de 2020 hasta febrero de 2021; superior, detalle de dichas medidas ampliando su escala de representación; la línea de puntos azul muestra un ajuste por medio de su media móvil; b) desde marzo de 2021 hasta febrero de 2022; la línea de puntos naranja muestra un ajuste por medio de su media móvil. La zona recuadrada en ambas figuras coincide con las fechas próximas a la erupción, dónde la concentración de medidas es mayor.

La distribución espacial de los valores de la columna vertical de SO_2 durante la erupción se presenta en el Apéndice B.1. Se han escogido tres momentos claves de la erupción para mostrar su evolución espacial, comparando los valores con la distribución obtenida el año precedente. Estos son: el comienzo de la erupción (Figura 64), el momento de mayor emisión (Figura 65) y el fin de la erupción (Figura 66). Los mapas obtenidos muestran con claridad el incremento de SO_2 identificado en los análisis anteriores. Desde el inicio, con un incremento de los valores de SO_2 , pasando por el máximo obtenido en el momento de mayor emisión, como el descenso el día del cese de la misma.

La influencia de la erupción del volcán de Cumbre Vieja en 2021 al balance de SO_2 en la atmósfera es innegable, ya que se distinguen fluctuaciones muy claras respecto a los valores base obtenidos el año 2020. Asimismo, los registros ilustran perfectamente los cambios acaecidos en la emisión. Las medidas proporcionadas por TROPOMI validan la hipótesis del trabajo presentada en la Introducción. Se destaca además, como, a pesar de la presencia de este gas en el año previo a la erupción (2020), su incremento debido a la actividad volcánica es mucho mayor.

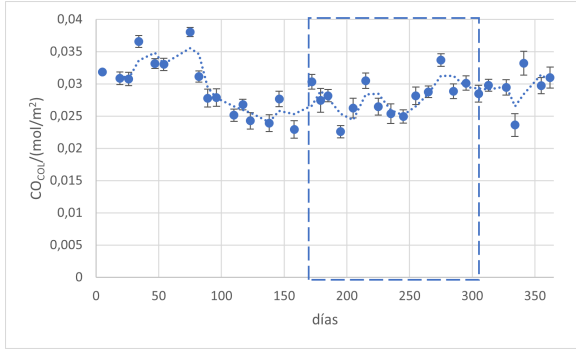
Una vez analizada la evolución de la emisión del SO_2 , queda por analizarse su posible influencia en el medioambiente o en la salud de los habitantes de la zona. El valor de la columna de gases alcanzado, el día 1 de octubre de 2021, $(0,203 \pm 0,013) \text{ mol/m}^2$, se ha transformado en concentración de dicho gas aplicando la Ec.1 presentada en la Metodología. El máximo del 1 de octubre supone una concentración de SO_2 igual a $(1,28 \pm 0,08) \text{ mg/m}^3$. Según el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico de España, el valor límite diario de SO_2 o VLD [11] para la protección de salud humana, es de $0,125 \text{ mg/m}^3$, por lo que se superaron los límites legales establecidos para la salud. Sin embargo, esto no significa que las consecuencias fuesen extremadamente graves, ya que comienzan a ser significativas cuando se superan concentraciones de entre 1 a 5 mg/m^3 de forma prolongada [52]. Respecto a los valores medios, durante los cuatro meses de la erupción, y considerando un valor promedio de la columna vertical $(0,0109 \pm 0,0010) \text{ mol/m}^2$, la concentración alcanzada fue de $(7,0 \pm 0,6) \cdot 10^{-5} \text{ mg/m}^3$, muy lejos de 1 ppm, que se considera como valor límite. Comparando este valor con el límite para la protección de ecosistemas ($[\text{SO}_2] = 0,02 \text{ mg/m}^3$ medido del 1 de octubre del año anterior al 31 de marzo del año en curso [11]), sigue siendo un valor muy bajo, a pesar de que el periodo no coincide exactamente con el estudiado. De esta forma se resume que, aunque la erupción volcánica aumentó los valores de SO_2 en la baja atmósfera en la zona geográfica de la misma, este cambio no ha supuesto un verdadero y perdurable peligro a la salud humana o los ecosistemas de la zona.

En resumen, y como es de esperar, se ha identificado, gracias a los datos de TROPOMI, con claridad la influencia de la erupción volcánica en las concentraciones de SO_2 , como se muestra en otros ejemplos descritos en la literatura [3].

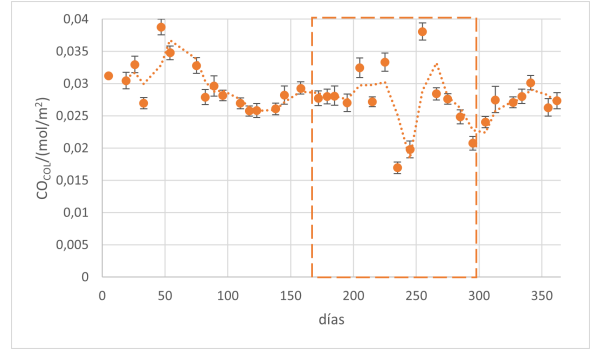
3.2. Monóxido de carbono: CO

Respecto al monóxido de carbono, las medidas de la columna vertical total de CO en los años 2020 y 2021, se muestran a continuación (Figura 11), utilizando la misma estructura de presentación de los resultados que en el caso del SO_2 . El rango de valores del monóxido de carbono emitido en el año 2020 (año anterior al evento eruptivo) se sitúa entre 0,025 y $0,04 \text{ mol/m}^2$ (Figura 11a). Presenta valores muy oscilantes (cómo se aprecia en su media móvil), con un incremento general de los mismos desde el inicio de los registros (marzo y abril), seguido de un descenso cercano al 30% (de junio y julio), y una recuperación progresiva de las tasas hasta el final de la ventana de observación (Figura 11a).

El rango de valores del monóxido de carbono emitido en el año 2021 (año de la erupción) es más amplio que en el caso anterior, se encuentra entre $0,015 \text{ mol/m}^2$ a $0,04 \text{ mol/m}^2$ (Figura 11b). La tendencia es nuevamente oscilante, al igual que en el caso anterior, con aumentos y descensos que prácticamente coinciden con la fechas. Sin embargo, una vez comienza la erupción volcánica, se aprecia claramente como las oscilaciones de los valores son mucho más bruscas.



(a)

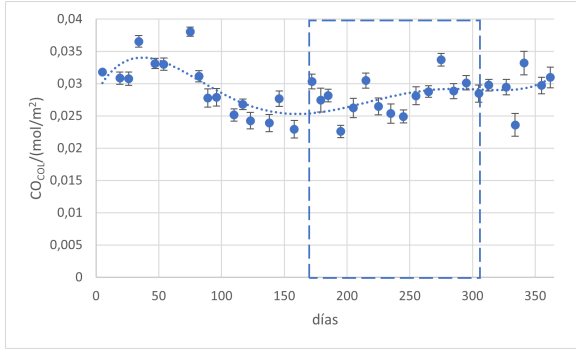


(b)

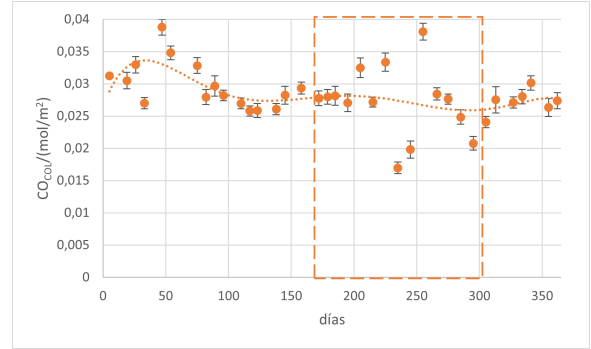
Figura 11: Medidas de la columna vertical total de CO recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde marzo de 2020 hasta febrero de 2021; la línea de puntos azul muestra un ajuste por medio de su media móvil; b) desde marzo de 2021 hasta febrero de 2022; la línea de puntos naranja muestra un ajuste por medio de su media móvil. La zona recuadrada en ambas figuras coincide con las fechas próximas a la erupción.

Del mismo modo que en el SO_2 , se ha buscado el mejor ajuste a estos puntos con el fin de poder estudiar de forma más precisa la tendencia de los datos. Se ha realizado un ajuste polinómico de grado quinto-sexto, Figura 12, que ofrece los mejores resultados del valor R^2 , este oscila entre $R^2 = 0,4757$ (año 2020) y $R^2 = 0,2431$ (año 2021). Los resultados generales se presentan en el apéndice A.2. Tanto el ajuste lineal (Figura 35); como el logarítmico (Figura 36), exponencial (Figura 37) o potencial (Figura 38), presentan un índice de confianza bajo.

Los resultados del ajuste del año 2020 (Figura 12a) muestran como los valores están menos dispersos respecto al ajuste polinómico de grado cinco (línea de puntos azul), ofreciendo una tendencia oscilante similar a la descrita anteriormente. Se aprecia un aumento de valores en las primeras fechas estudiadas, un suave descenso, seguido de progresivo aumento. Para el año de la erupción (Figura 12b), los valores están mas dispersos respecto al ajuste polinómico de grado sexto (línea de puntos naranja), manteniendo el patrón oscilante (aumento de valores, suave descenso, y progresivo aumento suave); con una tendencia similar al anterior, pero en el comienzo de la erupción, las oscilaciones son considerablemente más bruscas, no ajustándose tan bien a una función polinómica.



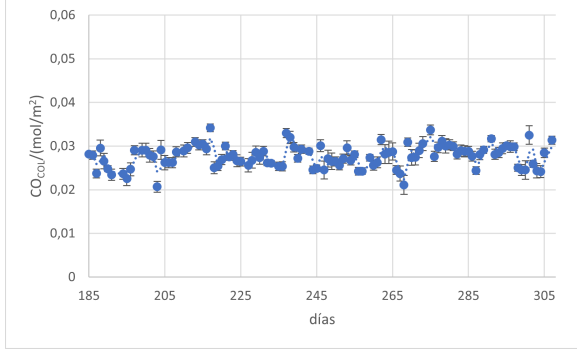
(a)



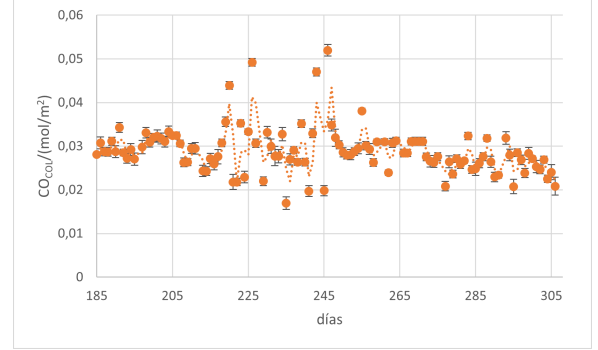
(b)

Figura 12: Medidas de la columna vertical total de CO recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde marzo de 2020 hasta febrero de 2021; la línea de puntos azul muestra un ajuste polinómico, de ecuación: $y = 1 \cdot 10^{-13}x^5 - 1 \cdot 10^{-10}x^4 + 5 \cdot 10^{-8}x^3 - 7 \cdot 10^{-6}x^2 - 0,0004x + 0,0285$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,4757$; b) desde marzo de 2021 hasta febrero de 2022; la línea de puntos naranja muestra un ajuste polinómico, de ecuación: $y = -1 \cdot 10^{-15}x^6 + 1 \cdot 10^{-12}x^5 - 5 \cdot 10^{-10}x^4 + 1 \cdot 10^{-7}x^3 - 1 \cdot 10^{-5}x^2 + 0,0005x + 0,0265$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,2431$. La zona recuadrada en ambas figuras coincide con las fechas próximas a la erupción.

Con el fin de poder estudiar en mayor detalle estas oscilaciones, se muestran a continuación las medidas tomadas en las fechas de septiembre a diciembre para ambos años, con la ventana de observación de mayor detalle, una medida por día. Para el año 2020 (Figura 13a), el rango de valores de las medidas queda reducido a tan sólo valores entre 0,02 y 0,03 mol/m², observándose perfectamente la tendencia oscilante de las mismas. En cambio, en el año 2021 (Figura 13b), el rango de valores es más amplio que en el caso anterior, situándose entre 0,02 y 0,05 mol/m².



(a)

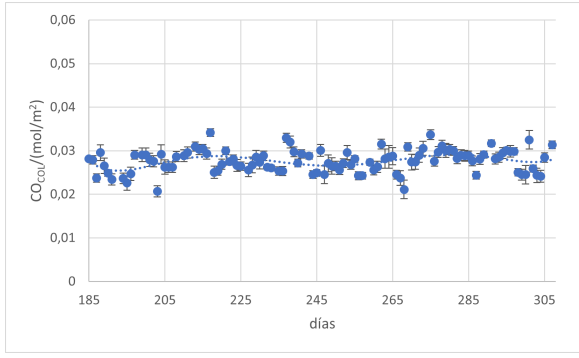


(b)

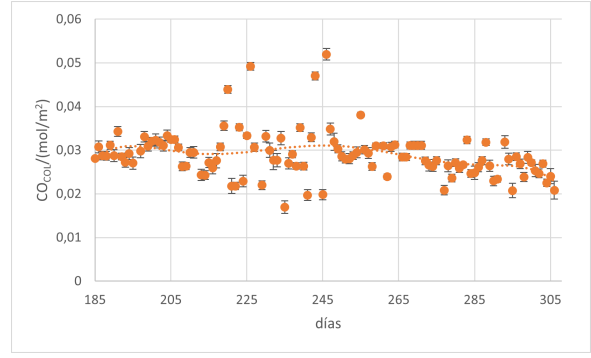
Figura 13: Medidas de la columna vertical total de CO recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde septiembre de 2020 hasta diciembre de 2020; la línea de puntos azul muestra un ajuste por medio de su media móvil; b) desde septiembre de 2021 hasta diciembre de 2021; la línea de puntos naranja muestra un ajuste por medio de su media móvil.

En el año 2021 (Figura 13b), se observan una serie de oscilaciones mucho más bruscas en torno al mes de octubre 2021 (días 215-246). Estas fechas coinciden con la mitad de la erupción, en la que mostró su mayor actividad, y donde mayor cantidad de gases fueron liberados. Además, se alcanzan valores máximos de unas 67 veces respecto a los valores máximos del año anterior. Una vez superada esta fase, la tendencia es descendente, disminuyendo progresivamente hasta las últimas fechas de la erupción.

Aplicando un mismo enfoque que con los resultados anteriores, el mejor ajuste se obtiene con un polinomio de sexto grado (Figura 14), aunque el índice de confianza ofrece un valor inferior al anterior. Los ajustes lineales (Apéndice A.2., Figura 39), logarítmicos (Apéndice A.2., Figura 40), exponenciales (Apéndice A.2., Figura 41) y potenciales (Apéndice A.2., Figura 42) presentan índices de confianza reducidos equivalentes a los ya descritos para valores mensuales. Se distingue como en el año 2020, la función que mejor describe los resultados es más o menos constante, las oscilaciones son muy suaves y no se aprecia un aumento o descenso general, Figura 14a. Sin embargo, para el 2021, aunque la función es también fluctuante, dichas fluctuaciones son mucho más amplias, coincidiendo el máximo con la mayor dispersión de las medidas, y con una tendencia descendente a medida que concluye la erupción, Figura 14b.



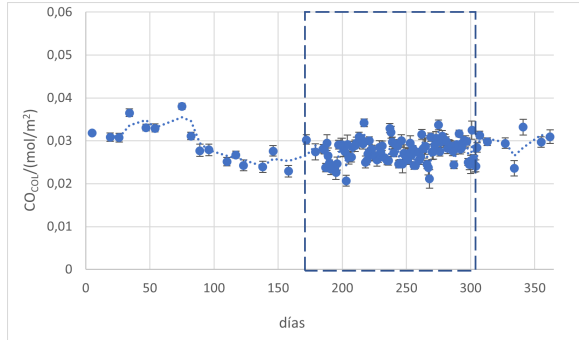
(a)



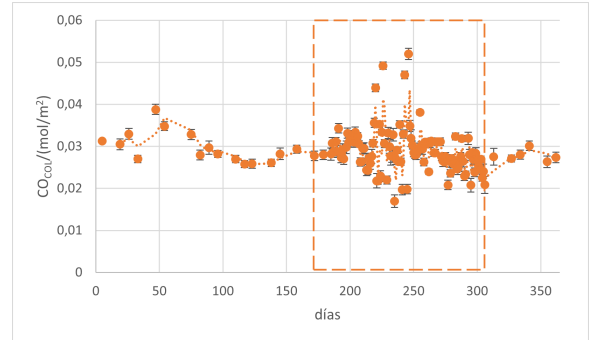
(b)

Figura 14: Medidas de la columna vertical total de CO recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde septiembre de 2020 hasta diciembre de 2020; la línea de puntos azul muestra un ajuste polinómico, de ecuación: $y = 6 \cdot 10^{-13}x^6 - 9 \cdot 10^{-10}x^5 + 6 \cdot 10^{-7}x^4 - 0,0002x^3 + 0,0332x^2 - 3,2204x + 129,1$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,1397$; b) desde septiembre de 2021 hasta diciembre de 2021; la línea de puntos naranja muestra un ajuste polinómico, de ecuación: $y = -7 \cdot 10^{-13}x^6 + 1 \cdot 10^{-9}x^5 - 6 \cdot 10^{-7}x^4 + 0,0002x^3 - 0,036x^2 + 3,4697x - 138,45$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,1304$.

Finalmente, combinando los datos de la ventana de observación mensual con la diaria, se obtiene una visión amplia de la evolución del CO; el año anterior a la erupción (Figura 15a) y el año durante el cual se produjo la misma (Figura 15b). Se observa así que, efectivamente, la erupción del volcán ha contribuido a la variación de la cantidad de CO en la atmósfera. Aunque esta influencia no es tan clara como en el caso del SO_2 , esto es esperable, debido a que como ya se ha comentado, esta especie molécula del carbono no es la principal emitida en las erupciones volcánicas[3].



(a)



(b)

Figura 15: Medidas de la columna vertical total de CO recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde marzo de 2020 hasta febrero de 2021; la línea de puntos azul muestra un ajuste por medio de su media móvil; b) desde marzo de 2021 hasta febrero de 2022; la línea de puntos naranja muestra un ajuste por medio de su media móvil. La zona recuadrada en ambas figuras coincide con las fechas próximas a la erupción, dónde la concentración de medidas es mayor.

Nuevamente, en los apéndices se presenta la distribución espacial de los valores de la columna vertical de CO durante la erupción (Apéndice B.2). Al igual que en el caso anterior, se han escogido tres momentos claves de la erupción para mostrar su evolución espacial, comparando los valores con la distribución obtenida el año anterior. Estos son: el comienzo de la erupción (Figura 67), el momento de mayor emisión (Figura 68) y el fin de la erupción (Figura 69). Estos mapas no llegan a mostrar con claridad el incremento y las variaciones identificadas en los análisis anteriores. Esto se debe a que son variaciones muy pequeñas, y no llegan a arrojar resultados claros con la resolución espacial trabajada. Es por tanto, que el monóxido de carbono, a pesar de que se emite en la erupción volcánica, no es un buen gas como indicador espacial de cambio. La alta precisión de las medidas de TROPOMI, muestra como un análisis detallado de las mismas permite identificar estas leves fluctuaciones en los valores.

Una vez analizada la evolución de la emisión del CO, queda por analizarse su posible influencia en el medioambiente o en la salud de los habitantes de la zona. Por una parte, durante las fechas de

Septiembre 2020 a Diciembre 2020, se tiene que la media de la columna vertical total de CO ha sido de $(0,0277 \pm 0,0013)$ mol/m², aplicando la Ec.1, se estima que la concentración es de $(0,078 \pm 0,004)$ mg/m³. Si se compara con un valor bibliográfico de la concentración normal de CO en la atmósfera, esta es igual a 0,1 mg/m³ [53], por tanto, el valor obtenido es coherente con el valor de concentración de CO que aporta la literatura.

Durante la erupción, el valor medio de la columna vertical de CO es de $(0,0289 \pm 0,0011)$ mol/m²; lo que supone un aumento del 4% respecto del año anterior. Su concentración estimada es de $(0,081 \pm 0,003)$ mg/m³, indicando que los valores de CO siguen siendo los normales en la atmósfera. Respecto al máximo de emisión del 1 de noviembre de 2021 (día 246), con valor $(0,0520 \pm 0,0014)$ mol/m², y una concentración estimada igual a $(0,146 \pm 0,004)$ mg/m³; se puede indicar que este valor es algo más alto del habitual, pero aún muy lejos del valor límite legislado para la protección de la salud humana, 10 mg/m³ [14].

En resumen, se ha identificado, gracias a TROPOMI, como la erupción volcánica del volcán de Cumbre Vieja, sí ha influenciado la presencia de CO en la atmósfera. Sin embargo, no ha sucedido en la forma de un notable aumento, sino que su acción ha provocado que las oscilaciones en su valor sean mucho más bruscas y rápidas.

3.3. Dióxido de nitrógeno: NO₂

Sabiendo que la erupción ha influenciado la presencia del CO en la atmósfera, cabe conocer si otras especies, de otros componentes también menos comunes en las erupciones volcánicas, han sido emitidos. Es por ello que, a continuación, se muestran las medidas obtenidas para el dióxido de nitrógeno.

El rango de valores de dióxido de nitrógeno emitido en el año precedente a la erupción (2020), se encuentra en torno 0 a $2,7 \cdot 10^{-5}$ mol/m² (Figura 16a). Los valores de la concentración mensual de NO₂ un año antes de la erupción son muy bajos, prácticamente nulos en la zona próxima al volcán. La distribución de valores mensuales es nuevamente muy oscilante, como se observa en su media móvil (Figura 16a), apreciándose un aumento en las fechas de julio y agosto, con un descenso general en las fechas de septiembre. La precisión de los datos aportada por TROPOMI es muy elevada, aunque su horquilla de error también lo es, lo que incrementa la incertidumbre de las interpretaciones de los resultados.

El rango de valores de dióxido de nitrógeno emitido en el año de la erupción (2021), se encuentra en torno 0 a $2 \cdot 10^{-5}$ mol/m² (Figura 16b). Comparando los registros de ambos años, no se muestra una diferencia clara; no se detecta ningún aumento o descenso que advierta de la influencia de la erupción. Si que es verdad que, en el año 2020 la tendencia de los valores es descendente, en torno al comienzo de la erupción, día 200 del año, pero en el año 2021, los valores de NO₂ se mantienen más o menos constantes (Figura 16b). Sin embargo, la precisión de los datos, y el claro carácter oscilante de los mismos hace difícil establecer un comportamiento propio durante la erupción.

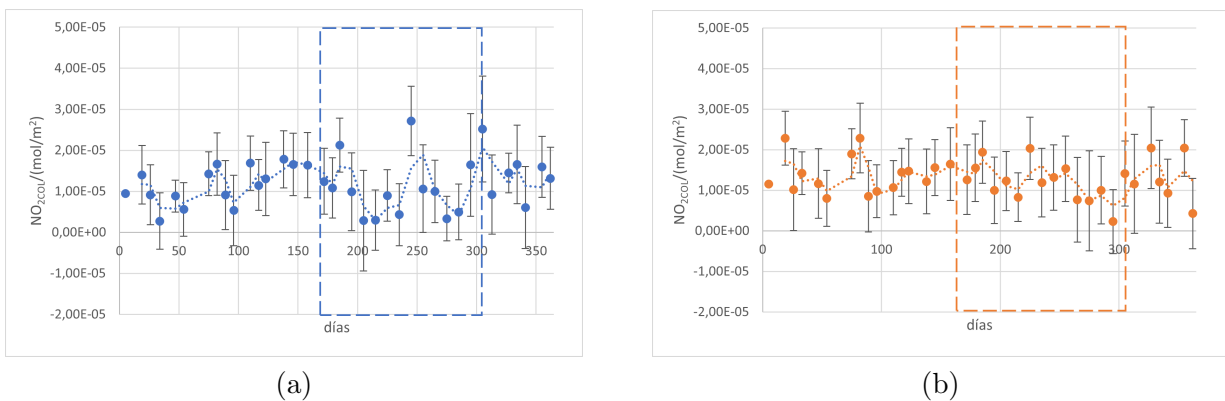
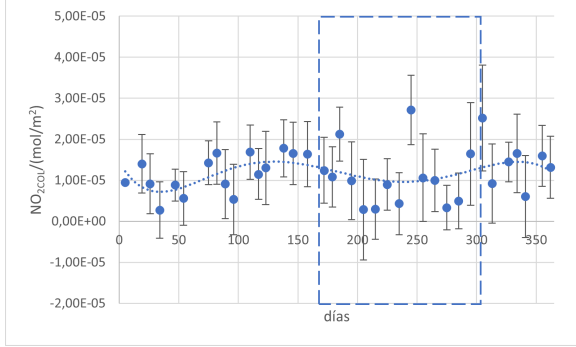


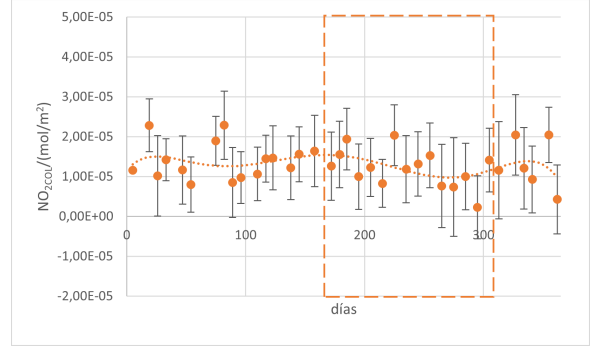
Figura 16: Medidas de la columna troposférica total de NO₂ recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde marzo de 2020 hasta febrero de 2021; la línea de puntos azul muestra un ajuste por medio de su media móvil; b) desde marzo de 2021 hasta febrero de 2022; la línea de puntos naranja muestra un ajuste por medio de su media móvil. La zona recuadrada en ambas figuras coincide con las fechas próximas a la erupción..

Con el fin de poder estudiar mejor la tendencia general, se han realizado, al igual que en el

monóxido de carbono, cinco ajustes, cuyos resultados se presentan en el apéndice A.3 (lineal, Figura 43; logarítmico, Figura 44; exponencial, Figura 45; y potencial, Figura 46), destacándose nuevamente en la redacción el que mejor valor aporta, que es el polinómico (Figura 17). El ajuste mediante una función polinómica de grado sexto arroja índices de confianza que oscilan entre $R^2 = 0,1339$ (año 2020) y $0,1301$ (año 2021). Los resultados muestran el claro carácter oscilante, en ambos años, de la presencia del NO_2 en la atmósfera. En el año 2020 (Figura 17a) comienza con un suave descenso en las fechas de marzo, aumentando progresivamente en julio, para posteriormente repetirse el ciclo de forma suave. Este comportamiento se da también en el año de la erupción (Figura 17b), aunque la tendencia parece estar levemente amortiguada en las fechas de la erupción.



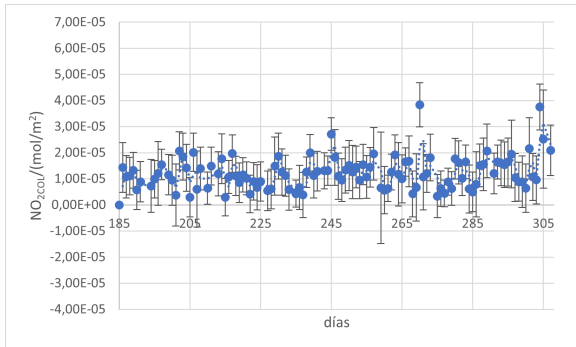
(a)



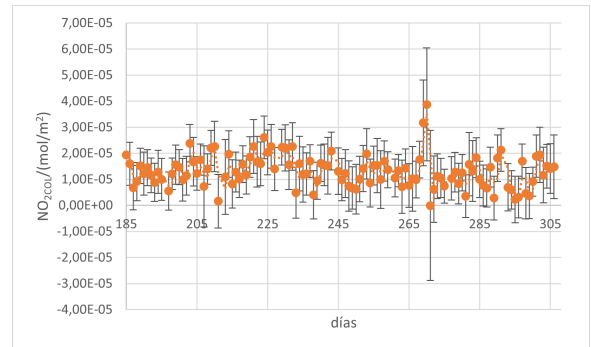
(b)

Figura 17: Medidas de la columna vertical troposférica de NO_2 recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde marzo de 2020 hasta febrero de 2021; la línea de puntos azul muestra un ajuste polinómico, de ecuación: $y = 3 \cdot 10^{-19}x^6 - 6 \cdot 10^{-16}x^5 + 3 \cdot 10^{-13}x^4 - 9 \cdot 10^{-11}x^3 + 1 \cdot 10^{-8}x^2 - 5 \cdot 10^{-7}x + 1 \cdot 10^{-5}$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,1339$; b) desde marzo de 2021 hasta febrero de 2022; la línea de puntos naranja muestra un ajuste polinómico, de ecuación: $y = -2 \cdot 10^{-18}x^6 + 2 \cdot 10^{-15}x^5 - 7 \cdot 10^{-13}x^4 + 1 \cdot 10^{-10}x^3 - 1 \cdot 10^{-8}x^2 + 3 \cdot 10^{-7}x + 1 \cdot 10^{-5}$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,1301$. La zona recuadrada en ambas figuras coincide con las fechas próximas a la erupción.

La ventana de observación diaria entre los meses de septiembre a diciembre permite analizar en detalle esta tendencia (Figura 18). Los valores del año 2020 presentan un rango de valores más amplio al identificado en el análisis anterior (Figura 18a), con registros entre 0 y $4 \cdot 10^{-5} \text{ mol/m}^2$. El máximo se alcanza por primera vez el día 270 (25 de noviembre). Llama la atención que, en el año 2021 (Figura 18b), el rango es similar y que el máximo también se alcanza el mismo día. Nuestros análisis no permiten extraer una posible causa de esta coincidencia, máxime cuando hay un foco de emisión de este gas que no lo había el año anterior.



(a)



(b)

Figura 18: Medidas de la columna vertical troposférica de NO_2 recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde septiembre de 2020 hasta diciembre de 2020; la línea de puntos azul muestra un ajuste por medio de su media móvil; b) desde septiembre de 2021 hasta diciembre de 2021; la línea de puntos naranja muestra un ajuste por medio de su media móvil.

Como en casos anteriores, se ha procedido a la realización de diferentes ajustes con el fin de cono-

cer la tendencia general de los valores. Nuevamente, aquellos con un menor índice de ajuste se presentan en el apéndice A.3. (ajuste lineal, Figura 47 y logarítmico en la Figura 48). Al igual que anteriormente, el mejor ajuste es el polinómico de grado sexto (Figura 19). La fuerte oscilación de los resultados hace que los índices de ajuste descendan significativamente respecto a los análisis precedentes, siendo muy coincidentes tanto en 2020 como en 2021 (R^2 entre 0,1147 y 0,1157, respectivamente). Se aprecia como en el año 2020, la tendencia es prácticamente constante, con muy leves fluctuaciones (Figura 19a). Este comportamiento se repite para el año siguiente (Figura 19b), y el análisis de detalle muestra como el cambio registrado en el día 200 es mas patente. No obstante, al finalizar ambos años el comportamiento difiere, con una tendencia positiva en el año 2020 y negativa en el 2021.

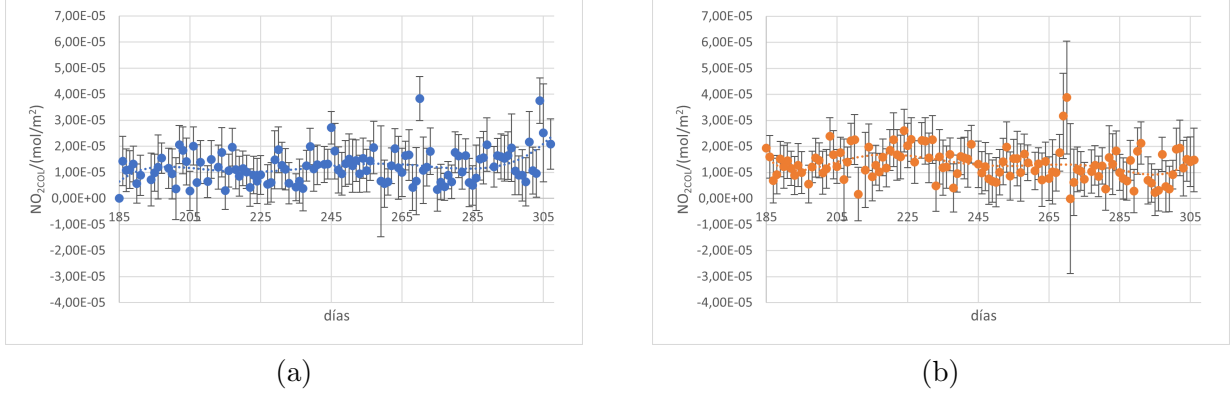


Figura 19: Medidas de la columna vertical troposférica de NO_2 recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde septiembre de 2020 hasta diciembre de 2020; la línea de puntos azul muestra un ajuste polinómico, de ecuación: $y = 3 \cdot 10^{-16}x^6 - 4 \cdot 10^{-13}x^5 + 2 \cdot 10^{-10}x^4 - 7 \cdot 10^{-8}x^3 + 1 \cdot 10^{-5}x^2 - 0,0011x + 0,0417$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,1147$; b) desde septiembre de 2021 hasta diciembre de 2021; la línea de puntos naranja muestra un ajuste polinómico, de ecuación: $y = 1 \cdot 10^{-15}x^6 - 2 \cdot 10^{-12}x^5 + 1 \cdot 10^{-9}x^4 - 4 \cdot 10^{-7}x^3 + 7 \cdot 10^{-5}x^2 - 0,0071x + 0,2839$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,1157$.

Al igual que en los casos anteriores, la observación combinada de los registros capturados mediante las dos ventanas de observación aporta una visión amplia de la evolución del NO_2 . En el año 2020 (año anterior de la erupción) se aprecia un patrón (Figura 20a) en la media móvil, muy similar al registrado en el año 2021 (Figura 20b). Las barras de error obtenidas en los resultados hace difícil extraer un comportamiento característico del NO_2 durante la erupción.

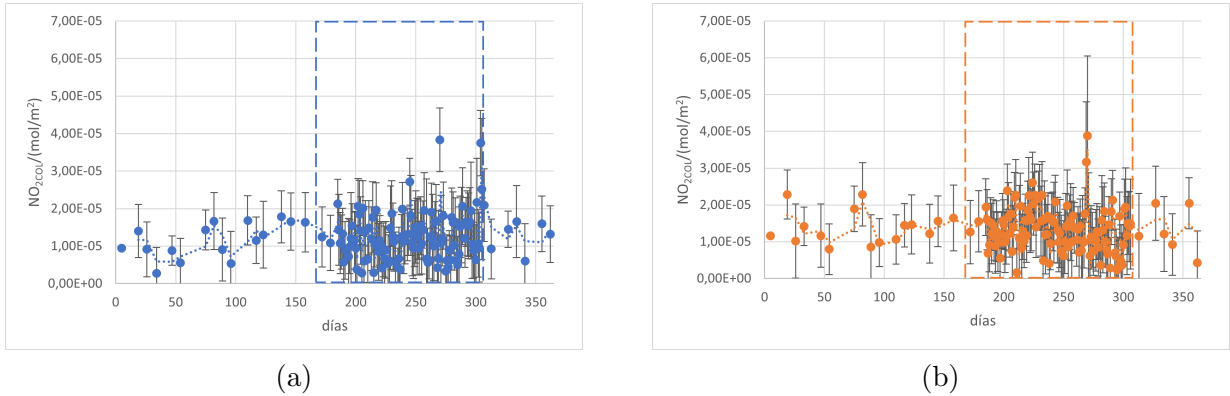


Figura 20: Medidas de la columna vertical troposférica de NO_2 recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde marzo de 2020 hasta febrero de 2021; la línea de puntos azul muestra un ajuste por medio de su media móvil; b) desde marzo de 2021 hasta febrero de 2022; la línea de puntos naranja muestra un ajuste por medio de su media móvil. La zona recuadrada en ambas figuras coincide con las fechas próximas a la erupción, dónde la concentración de medidas es mayor

Al igual que en los otros casos, se presenta también la distribución espacial de los valores de la columna vertical troposférica de NO_2 durante la erupción en el Apéndice B.3. De manera similar, se han

escogido tres momentos claves de la erupción para mostrar su evolución espacial, comparando los valores con la distribución obtenida el año anterior. Estos son: comienzo de la erupción (Figura 70), momento de máxima detección de NO_2 (Figura 71) y fin de la erupción (Figura 72). El estudio de las imágenes muestra como el dióxido de nitrógeno no es un buen gas para monitorizar la erupción, debido a que no se observa ninguna evolución ni cambio característico.

Si se estudian los valores medios, se obtiene que, para 2020, durante los meses de septiembre a diciembre, se obtuvo una media $(1,2 \pm 0,9) \cdot 10^{-5} \text{ mol/m}^2$, que haciendo uso de la Ec.1, se estima una concentración en la troposfera igual a $(6 \pm 4) \cdot 10^{-5} \text{ mg/m}^3$. Para el año 2021, durante los meses de la erupción se ha obtenido una media de $(1,2 \pm 0,9) \cdot 10^{-5} \text{ mol/m}^2$, y estimado una distribución espacial igual a $(6 \pm 4) \cdot 10^{-5} \text{ mg/m}^3$. Como puede observarse, aunque existe un ligero aumento en los valores medios de la columna vertical troposférica, esta pierde sensibilidad debido a los grandes márgenes de error. Además, se destaca como estos valores están muy lejos de los legislados anualmente para la protección de la salud humana: $\text{VLA} = 0,04 \text{ mg/m}^3$ y la protección de los ecosistemas: $\text{VL} = 0,03 \text{ mg/m}^3$ [16].

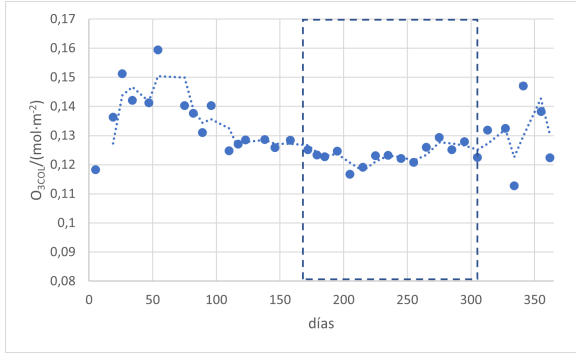
En resumen, los datos extraídos, no permiten establecer la influencia de la erupción de 2021 del volcán de Cumbre Vieja al balance de NO_2 .

3.4. Ozono: O_3

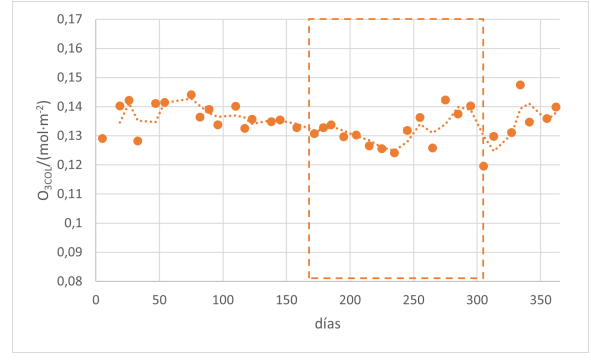
Recordemos que el ozono, no es emitido como tal en las erupciones, sino que es un producto de la alteración del monóxido de carbono y del dióxido de nitrógeno en la atmósfera [10], que sí son emitidos. Por tanto, el estudio de la evolución de la columna vertical total de O_3 medida en la zona geográfica del volcán de Cumbre Vieja, antes y durante de su erupción, aportará información sobre la evolución de dichas moléculas de CO y NO_2 .

El rango de valores del ozono emitido en el año precedente a la erupción (2020), se encuentra en torno 0.11 a 0.16 mol/m^2 (Figura 21a). Los valores de la concentración mensual de ozono un año antes de la erupción son de naturaleza claramente oscilante, como se observa en la trayectoria de la media móvil (Figura 21a). Se observa además, como hay un ligero aumento durante marzo (días 1 al 31 del registro), que va disminuyendo suavemente hasta mediados de noviembre (días 245 a 275), momento en donde vuelve a incrementarse la concentración.

En el año 2021 (Figura 21b), el rango de valores se encuentra en torno 0,12 a 0,15 mol/m^2 . El patrón de la línea de tendencia es similar al registrado en 2020, aunque muestra un descenso en noviembre un poco más amortiguado, finalizando con un incremento, como en el caso anterior. Llama la atención que la erupción no ha producido un incremento significativo de las concentraciones de ozono. Asimismo, es también remarcable que a comienzos del ciclo de observación de 2020, los valores de ozono sean más elevados que los registrados durante la erupción, fenómeno que puede atribuirse a un sesgo en la selección de los datos. No obstante, los datos sí parecen poner de manifiesto que, durante los meses correspondientes a la erupción, los valores de O_3 se elevan mucho más rápidamente que los registrados durante el año anterior (Figuras 21). Una posible explicación es el incremento de los gases CO y NO_2 durante la erupción que, como se ha comentado, permiten la génesis de ozono.



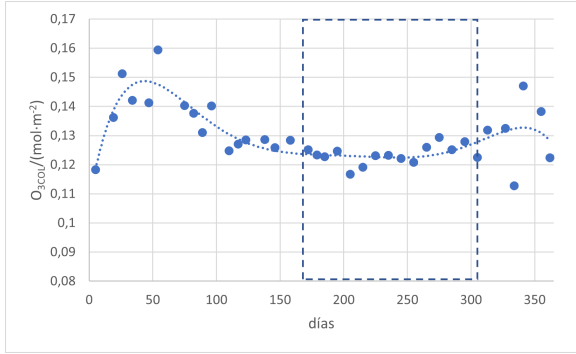
(a)



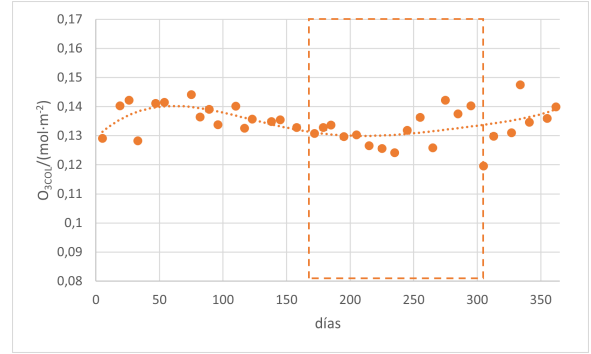
(b)

Figura 21: Medidas de la columna vertical total de O_3 recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde marzo de 2020 hasta febrero de 2021; la línea de puntos azul muestra un ajuste por medio de su media móvil; b) desde marzo de 2021 hasta febrero de 2022; la línea de puntos naranja muestra un ajuste por medio de su media móvil. La zona recuadrada en ambas figuras coincide con las fechas próximas a la erupción.

Con el fin de poder estudiar correctamente la tendencia de estas medidas, se han realizado diferentes ajustes. Según los índices de confianza empleados (valor R^2), el mejor ajuste de todos, corresponde a una función polinómica de grado sexto. Este índice aporta valores de R^2 de entre 0,6578 (año 2020) y 0,3097 (año 2021) mol/m^2 (Figura 22). Las líneas de tendencia obtenidas del ajuste polinómico muestran un claro ciclo sinusoidal, comienza en marzo y finaliza en febrero, y que es de mayor amplitud en 2020 (Figura 22a). En el apéndice A.4. se muestran otros ajustes obtenidos pero con menor índice de confianza (lineal, Figura 49; logarítmica, Figura 50; exponencial, Figura 51; y potencial, Figura 52). Sin embargo, para el año 2021 (Figura 22b), la tendencia descendente que se observa en el año 2020 parece aplanarse en torno a septiembre, justo al comienzo de la erupción, mostrando un aumento progresivo. Los valores diarios individuales registrados en 2021 muestran un cambio abrupto hacia el día 246 (26 de octubre). Las oscilaciones diarias presentan una tendencia temporal semanal con modificaciones abruptas ocurridas en un día, probablemente ligadas a oscilaciones del régimen atmosférico. Este comportamiento que presentan los datos hacen sospechar que, efectivamente, la erupción volcánica influye en las cantidades de ozono en la baja atmósfera.



(a)



(b)

Figura 22: Medidas de la columna vertical total de O_3 recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde marzo de 2020 hasta febrero de 2021; superior, detalle de dichas medidas ampliando su escala de representación; la línea de puntos azul muestra un ajuste polinómico, de ecuación: $y = -3 \cdot 10^{-15}x^6 + 4 \cdot 10^{-12}x^5 - 2 \cdot 10^{-9}x^4 + 4 \cdot 10^{-7}x^3 - 5 \cdot 10^{-5}x^2 - 0,0024x + 0,1075$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,6578$; b) desde marzo de 2021 hasta febrero de 2022; la línea de puntos naranja muestra un ajuste polinómico, de ecuación: $y = 2 \cdot 10^{-16}x^6 - 2 \cdot 10^{-13}x^5 + 4 \cdot 10^{-11}x^4 + 1 \cdot 10^{-8}x^3 - 4 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,0004x + 0,1294$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,3097$. La zona recuadrada en ambas figuras coincide con las fechas próximas a la erupción.

La Figura 23 muestra el comportamiento del ozono con una ventana de observación diaria. En el año 2020 (Figura 23a), el comportamiento del ozono sigue una tendencia oscilante, de carácter rítmico,

con pulsos de cuatro días de duración y una amplitud progresivamente mayor, a medida que se avanza en el calendario; efecto que se relaciona con la tendencia anual ya descrita. Con respecto al año de la erupción (2021), estos pulsos dejan de ser rítmicos (Figura 23b). El día 230 (16 de octubre) comienza una tendencia creciente muy marcada, que finaliza abruptamente el día 265 (20 de noviembre). El día 268 (23 de noviembre) se desarrolla un nuevo ciclo de crecimiento que finaliza en día 284 (9 de diciembre). A partir de ese momento se inicia un nuevo ciclo que alcanza el máximo registrado de $0,15 \text{ mol/m}^2$ el día 288, cuando cesa la erupción en su fase eruptiva. Desde ese momento, la tendencia es completamente descendente, para igualarse con los valores de $0,12 \text{ mol/m}^2$, registrados en la misma fecha, pero en el año 2020.

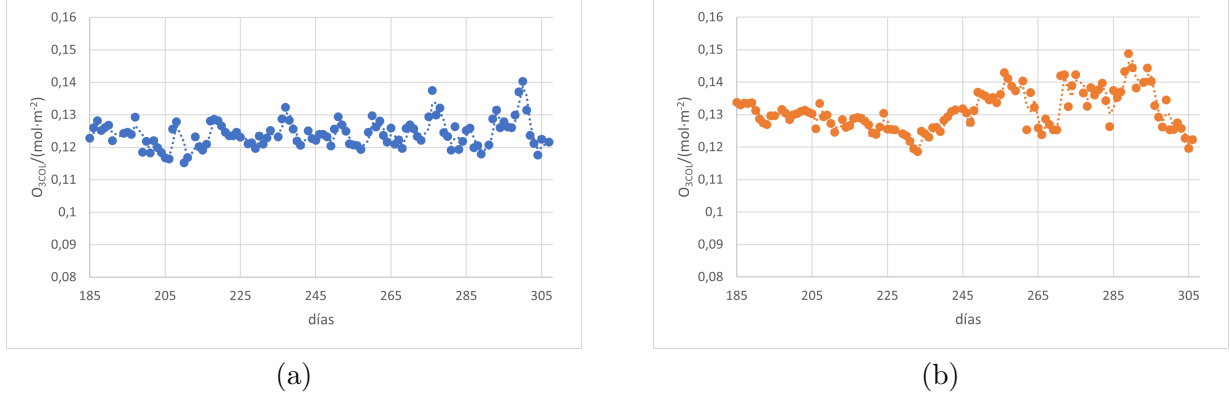
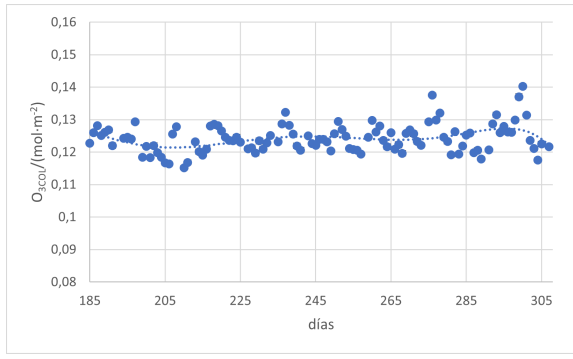
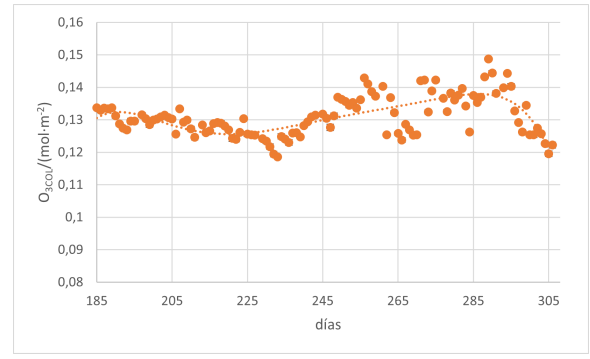


Figura 23: Medidas de la columna vertical total de O_3 recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde septiembre de 2020 hasta diciembre de 2020; la línea de puntos azul muestra un ajuste por medio de su media móvil; b) desde septiembre de 2021 hasta diciembre de 2021; la línea de puntos naranja muestra un ajuste por medio de su media móvil.

Aplicando un mismo enfoque que con los resultados anteriores, el mejor ajuste se obtiene con un polinomio de sexto grado (Figura 24). Los ajustes lineales (Apéndice A.4., Figura 53), logarítmicos (Apéndice A.4., Figura 54), exponenciales (Apéndice A.4., Figura 55) y potenciales (Apéndice A.4., Figura 56) presentan índices de confianza reducidos equivalentes a los ya descritos para valores mensuales. Se distingue como en el año 2020, la función que mejor describe es polinómica (Figura 24a) pero con muy leves fluctuaciones. Se distinguen dos ciclos de duración bimestral. El primero va desde el 1 de septiembre (día 185) a 26 de octubre (día 240); y el siguiente desde esa fecha hasta el final de la erupción. Sin embargo, para el 2021 (Figura 24b), aunque la función es también polinómica, solo se aprecia un ciclo que posee una duración equivalente a la de la erupción, con pulsos menores de amplitud en el entorno al 7 % de la concentración y duración fluctuante. Los datos muestran una elevada sensibilidad para detectar los pulsos eruptivos de la actividad volcánica.



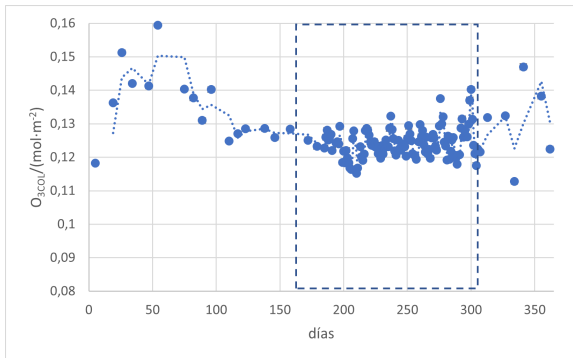
(a)



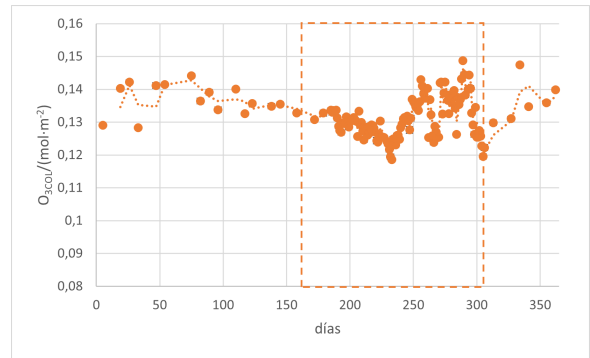
(b)

Figura 24: Medidas de la columna vertical total de O_3 recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde septiembre de 2020 hasta diciembre de 2020; la línea de puntos azul muestra un ajuste polinómico, de ecuación: $y = -5 \cdot 10^{-13}x^6 + 7 \cdot 10^{-10}x^5 - 4 \cdot 10^{-7}x^4 - 0,0001x^3 - 0,0218x^2 + 1,9947x - 75,218$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,1319$; b) desde septiembre de 2021 hasta diciembre de 2021; la línea de puntos naranja muestra un ajuste polinómico, de ecuación: $y = -9 \cdot 10^{-13}x^6 + 1 \cdot 10^{-9}x^5 - 8 \cdot 10^{-7}x^4 + 0,0003x^3 - 0,0488x^2 + 4,6684x - 184,92$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,4812$.

Con el fin de poder visualizar de forma más amplia el comportamiento del ozono en la atmósfera durante los años 2020 y 2021, se presentan las observaciones combinando ambas ventanas de observación (Figura 25). Para el año 2020 (Figura 25a), se observa la tendencia claramente oscilante del ozono en la atmósfera, con un comportamiento cíclico de aumento y descenso. Sin embargo, se aprecia como en el año 2021 (Figura 25b), el comienzo de la erupción del volcán ha desestabilizado esta tendencia.



(a)



(b)

Figura 25: Medidas de la columna vertical total de O_3 recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde marzo de 2020 hasta febrero de 2021; superior, detalle de dichas medidas ampliando su escala de representación; la línea de puntos azul muestra un ajuste por medio de su media móvil; b) desde marzo de 2021 hasta febrero de 2022; la línea de puntos naranja muestra un ajuste por medio de su media móvil. La zona recuadrada en ambas figuras coincide con las fechas próximas a la erupción, dónde la concentración de medidas es mayor.

La distribución espacial de los valores de la columna vertical total de O_3 durante la erupción se muestran en el Apéndice B.4. Al igual que en los casos anteriores, se han escogido tres momentos claves de la erupción para mostrar su evolución espacial, comparando los valores con la distribución espacial obtenida el año anterior. Estos son: comienzo de la erupción (Figura 73), mitad de la erupción (Figura 74) y fin de la erupción (Figura 75). Como cabe de esperar, al no ser un gas emitido en la propia erupción, sino que su presencia depende de la emisión de otros, su cartografía no arroja valores muy representativos para ilustrar la evolución.

Si se estudian los valores medios, $(0,1242 \pm 0,0007)$ mol/m², para el 2020 (durante los meses de septiembre a diciembre), haciendo uso de la Ec.1, se ha estimado una concentración en la troposfera igual a $(0,596 \pm 0,003)$ mg/m³. Para el año 2021, durante los mismos meses se ha obtenido una media de $(0,1310 \pm$

0,0007) mol/m², que aporta una concentración ($0,629 \pm 0,003$) mg/m³. Como puede observarse, existe un aumento del 5,5% en las concentraciones de ozono por causa de la erupción. Se destaca un aspecto muy interesante a la par que preocupante, y es que en ambos años (2020 y 2021), las concentraciones de ozono registradas por TROPOMI superan con creces el valor objetivo para la protección de la salud humana, igual a 0.120 mg/m³ [17]. Asimismo, se recuerda que el ozono genera efecto invernadero directo, y por tanto, posee influencia significativa en el calentamiento del planeta. Por lo que los valores registrados aportan una señal preocupante respecto al cambio climático.

3.5. Aerosoles

Una vez estudiados estos cuatro gases, tan sólo queda por analizar la presencia de aerosoles en la atmósfera para completar el trabajo. Antes de exponer los resultados, es esencial realizar dos apuntes sobre los resultados presentados. El primero de ellos es que todos los resultados aparecen sin margen de error. La razón de esta carencia se debe a Copernicus. Hasta la versión 02.03.01, Copernicus no incluye la precisión debido a un error a la hora de estimar la misma en las medidas de aerosoles, señalando que hay una sobreestimación de este valor. Este fallo afectaba a todos los datos recogidos por Copernicus hasta enero 2022, y lógicamente afectan a los resultados de este estudio, por lo que se ha decidido no incluirlos en el presente trabajo [54]. El segundo apunte afecta a la medida del índice de aerosoles (AI) realizado a partir de los datos de TROPOMI. Como se indica en la Metodología la determinación de AI se realiza aplicando la Ec.2 y empleando los valores de longitud de onda medidos por el sensor. Dichos valores pueden determinarse empleando bien los pares $\lambda_1 = 340$ nm y $\lambda_2 = 380$ nm, o los pares $\lambda_1 = 354$ nm y $\lambda_2 = 388$ nm. Los resultados obtenidos por el primer par de longitudes de onda (340 y 380 nm) se presentan en el apéndice A.5 y son sobre los que se construye la memoria; mientras que los del segundo par (354 y 388 nm) se incluyen en el apéndice A.6 y se incluyen exclusivamente a efectos de validación, ya que los valores obtenidos son prácticamente los mismos.

Se ha trabajado siguiendo exactamente la misma estructura que en las secciones anteriores empleando dos ventanas de observación. En la Figura 26 se muestran los resultados mensuales obtenidos para los años 2020 y 2021. El rango de valores del AI en el año precedente a la erupción (2020), se encuentra en torno de -4 a 0.5 (Figura 26a). Recordemos, como se indica en la Metodología, que el AI es un índice cualitativo que indica la presencia de aerosoles que absorben en estas longitudes de onda en la banda del ultravioleta. Por tanto, los valores negativos (< 0) equivalen a no detección. Aplicando dicha condición se observa como el índice, a pesar de que posee una tendencia oscilante, solo es capaz de detectar aerosoles en dos momentos concretos: el 9 de febrero (día 40) y el 20 de septiembre (día 186). El rango de valores del AI para el año de la erupción (2021), se encuentra en torno -3 a 1 (Figura 26b). El primer día que se detectaron aerosoles en 2021 fue el 25 de julio (día 148), coincidiendo con un momento de calima en la atmósfera, y los días de la erupción. A pesar de que el índice detecta cinco valores superiores a cero se observa como la media móvil se desplaza hacia arriba, influida por la erupción, situándose entorno a cero.

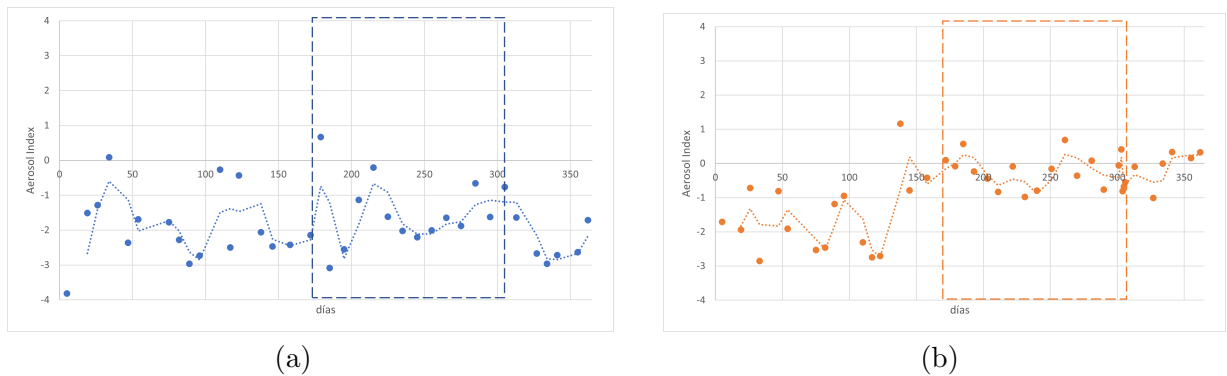


Figura 26: Medidas del índice de aerosoles recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde marzo de 2020 hasta febrero de 2021; superior, detalle de dichas medidas ampliando su escala de representación; la línea de puntos azul muestra un ajuste por medio de su media móvil; b) desde marzo de 2021 hasta febrero de 2022; la línea de puntos naranja muestra un ajuste por medio de su media móvil. La zona recuadrada en ambas figuras coincide con las fechas próximas a la erupción.

Con el fin de poder estudiar con mayor precisión la tendencia de los valores mensuales, se han realizado tres ajustes pertinentes. Nuevamente, el ajuste polinómico sigue ofreciendo los mejores resultados de confianza (Figura 27). El resto de los ajustes se presentan en el apéndice A.5. (lineal, Figura 59 y logarítmico, Figura 58), mostrando, en ambos casos, valores de R^2 bastante más bajos. El ajuste polinómico aporta un índice de confianza que oscila entre 0,1439 (año 2020) y 0,5182 (año 2021). Los resultados de AI para el año 2020 (Figura 27a) muestran una tendencia oscilante, aunque los valores no permiten la detección de aerosoles. En cambio, para el año 2021 (Figura 27b), aunque la tendencia sigue siendo oscilante, se detecta claramente un incremento hacia el cero de los valores y numerosos eventos de producción de aerosoles. Un aspecto de interés es que, a diferencia de los gases, una vez terminada la erupción, la tendencia de los valores sigue siendo alta.

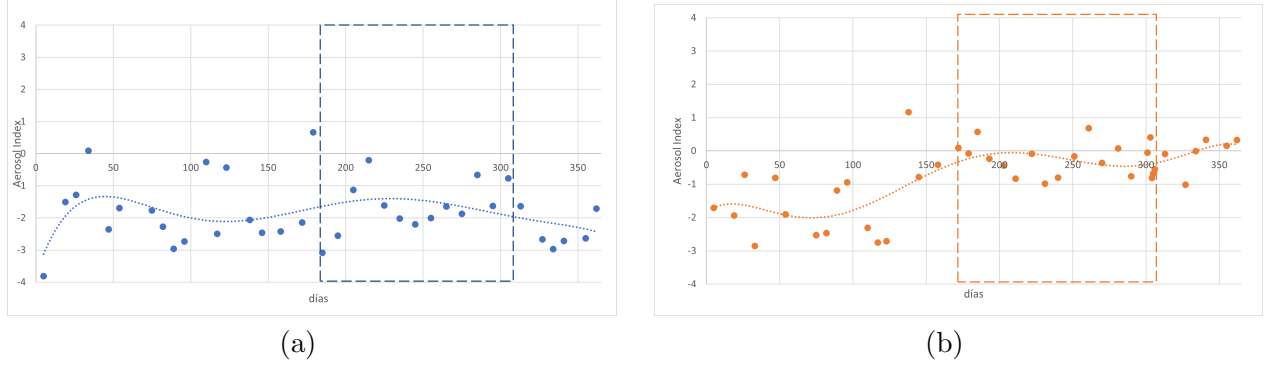


Figura 27: Medidas del índice de aerosoles recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde marzo de 2020 hasta febrero de 2021; superior, detalle de dichas medidas ampliando su escala de representación; la línea de puntos azul muestra un ajuste polinómico, de ecuación: $y = -2 \cdot 10^{-13}x^6 + 2 \cdot 10^{-10}x^5 - 1 \cdot 10^{-7}x^4 + 2 \cdot 10^{-5}x^3 - 0,0029x^2 + 0,143x - 3,7729$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,1439$; b) desde marzo de 2021 hasta febrero de 2022; la línea de puntos naranja muestra un ajuste polinómico, de ecuación: $y = -2 \cdot 10^{-13}x^6 + 2 \cdot 10^{-10}x^5 - 1 \cdot 10^{-7}x^4 + 2 \cdot 10^{-5}x^3 - 0,0014x^2 + 0,0338x - 1,847$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,5182$. La zona recuadrada en ambas figuras coincide con las fechas próximas a la erupción.

Al igual que en los gases, se ha querido añadir aún más precisión en el análisis con una ventana de observación diaria, durante los meses de la erupción (Figura 28). En el año 2020 (Figura 28a), los datos se distribuyen de manera oscilante, con una frecuencia de oscilación mayor, apareciendo otro máximo del mismo orden al identificado en el análisis anterior, con valores entre -3 y 0.2. Además la media móvil del AI se encuentra claramente en el rango de valores -2.5 y -1, con alguna excepción que alcanza el valor 0, lo que indica que efectivamente durante este periodo, la presencia de este tipo de aerosoles fue nula o extremadamente escasa. En cambio, en el año 2021 (Figura 28b), se observa que la frecuencia es mucho mas marcada, con máximos que superan el índice 3 (el día 1 de noviembre). El rango de valores de la media móvil se sitúa entre -1 y 1, lo que indica que efectivamente se han detectado aerosoles (en su mayoría cenizas volcánicas emitidas durante el evento eruptivo).

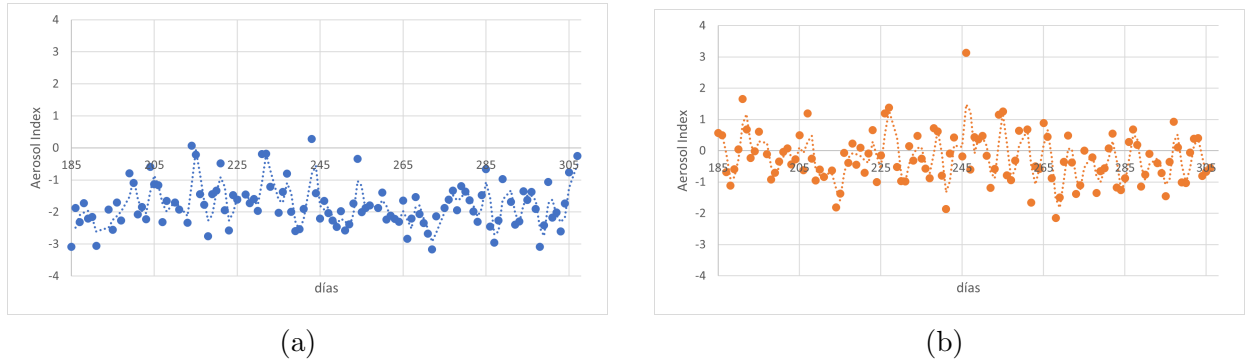


Figura 28: Medidas del índice de aerosoles recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde septiembre de 2020 hasta diciembre de 2020; la línea de puntos azul muestra un ajuste por medio de su media móvil; b) desde septiembre de 2021 hasta diciembre de 2021; la línea de puntos naranja muestra un ajuste por medio de su media móvil.

Aplicando el mismo enfoque que con los resultados anteriores, el mejor ajuste se obtiene con un polinomio de sexto grado (Figura 29), aunque el índice de confianza ofrece un notable valor inferior al anterior. Los ajustes lineales (Apéndice A.5., Figura 59) y logarítmicos (Apéndice A.5., Figura 60), presentan índices de confianza reducidos equivalentes a los ya descritos para valores mensuales. Se distingue como en el año 2020, la función de ajuste presenta un patrón cíclico de amplio periodo (Figura 29a). Sin embargo, para el 2021 (Figura 29b), aunque la función es también cíclica, dichas fluctuaciones poseen un periodo mas corto, con máximos localizados a finales de octubre y comienzos de noviembre, justo en la etapa media de la erupción.

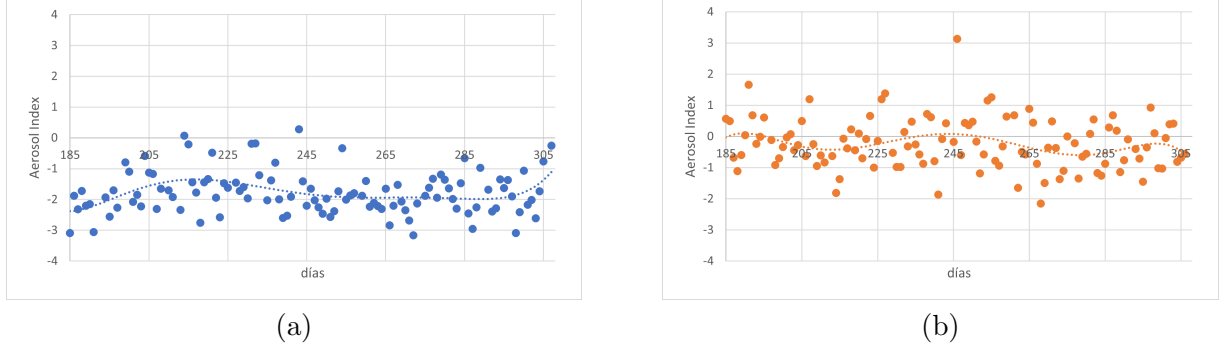


Figura 29: Medidas del índice de aerosoles recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde septiembre de 2020 hasta diciembre de 2020; la línea de puntos azul muestra un ajuste polinómico, de ecuación: $y = 8 \cdot 10^{-11}x^6 - 1 \cdot 10^{-7}x^5 + 7 \cdot 10^{-5}x^4 - 0,0216x^3 + 3,8943x^2 - 370,83x + 14596$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,1392$; b) desde septiembre de 2021 hasta diciembre de 2021; la línea de puntos naranja muestra un ajuste polinómico, de ecuación: $y = -1 \cdot 10^{-10}x^6 + 2 \cdot 10^{-7}x^5 + -0,0001x^4 + 0,0376x^3 - 6,7648x^2 + 643,87x + -25354$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,0709$

Finalmente, combinando los datos de la ventana de observación mensual con la diaria, se obtiene una visión amplia de la evolución de la presencia de aerosoles. El año anterior a la erupción (Figura 30a) muestra como los valores de la tendencia de aerosoles presentan una importante oscilación diaria; que es mucho más marcada en 2021 (Figura 30b), mostrando con claridad incrementos en los valores del AI durante la erupción.

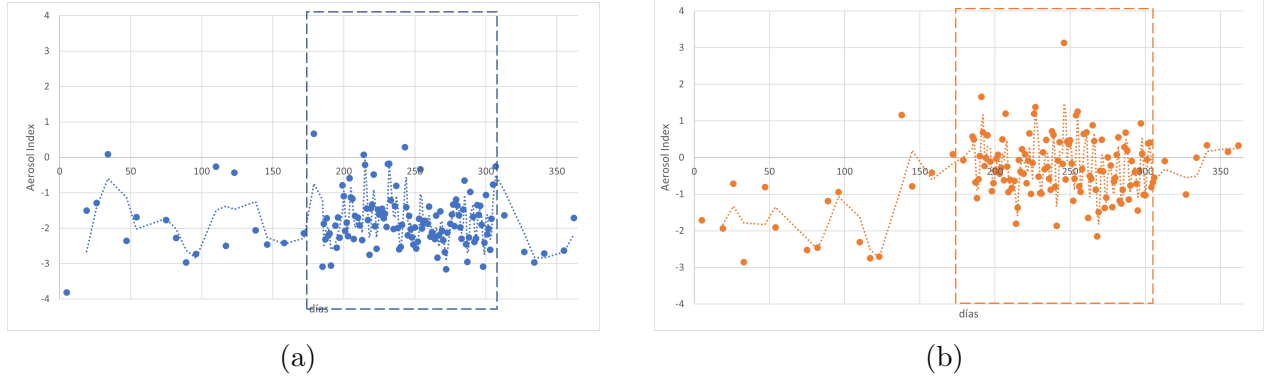


Figura 30: Medidas del índice de aerosoles recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde marzo de 2020 hasta febrero de 2021; superior, detalle de dichas medidas ampliando su escala de representación; la línea de puntos azul muestra un ajuste por medio de su media móvil; b) desde marzo de 2021 hasta febrero de 2022; la línea de puntos naranja muestra un ajuste por medio de su media móvil. La zona recuadrada en ambas figuras coincide con las fechas próximas a la erupción, dónde la concentración de medidas es mayor.

Se ha estudiado también la distribución espacial de los valores del AI durante la erupción (Apéndice B.5). Se han escogido a su vez tres momentos claves de la erupción para mostrar su evolución espacial, comparando los valores con la distribución obtenida el año precedente. Estos son: el comienzo de la erupción (Figura 76), el momento de mayor emisión (Figura 77) y el fin de la erupción (Figura 78). Los mapas obtenidos muestran un pequeño incremento de la presencia de los aerosoles al inicio, que va aumentando

con el desarrollo de la erupción, mostrando con claridad el momento de mayor emisión, así como el descenso el día del cese de la misma.

En este caso, al trabajar con un índice cualitativo, no ha sido posible realizar un estudio sobre las concentraciones de aerosoles. Es evidente que el origen de los aerosoles detectados por TROPOMI y estudiados en este trabajo es de carácter primario (partículas de cenizas volcánicas emitidas directamente a la atmósfera, con tamaños superiores a 10 micras, también conocidos como PM10) [55]. Sin embargo, no se puede obviar la existencia de aerosoles de origen secundario (partículas generadas como resultado de reacciones químicas (normalmente oxidación), a partir de gases precursores (cómo el SO_2 o NO_2)[55]. Estas son partículas de normalmente diámetro inferior a 2,5 micras, y que se denominan PM2,5 [55]. Recordemos que estas últimas no pueden ser detectadas haciendo uso del índice de aerosoles, ya que no absorben en el UV [51] y son invisibles a TROPOMI. Obviando esta circunstancia, se debe señalar que gracias a los registros del índice de aerosoles proporcionado por TROPOMI, se ha sido capaz de detectar la presencia de ceniza volcánica durante la erupción.

3.6. Reflexiones finales

A partir de los datos que nos proporciona TROPOMI, hemos sido capaces de determinar la contribución de los gases y aerosoles principalmente emitidos por la actividad volcánica. La contribución en términos porcentuales sigue el criterio empleado en la presentación de los resultados, es decir: el gas que más se ha emitido es SO_2 con incrementos promedio respecto al año precedente del 109 % y máximos de un 200 %; seguido del CO con contribuciones promedio, respecto al año precedente del 4 % (máximos del 80 %); a continuación el NO_2 que, a pesar de que el sensor TROPOMI puede detectar variaciones, la incertidumbre asociada a los datos registrados no permite determinar objetivamente cambios en los valores; la lista prosigue con el O_3 que aporta valores medios de cambio respecto al año precedente del 5,5 % (y un máximo del 21 %); por último, los aerosoles, que aunque no es posible determinar cuantitativamente porcentajes, sí podemos establecer variaciones cualitativas de los mismos, alcanzando valores de cambio promedio del 87 % y máximos de 167 %.

Con la ayuda de TROPOMI, hemos sido capaces también de identificar qué gases contribuyen al efecto invernadero de manera directa e indirecta, o a un efecto contrario que podríamos denominar “de invierno nuclear”. La contribución en términos de calentamiento o enfriamiento de la atmósfera es la siguiente: el SO_2 es el gas que más se ha emitido y favorece el enfriamiento atmosférico; tanto el CO como NO_2 producen un efecto invernadero indirecto, sin embargo, los tiempos de vida de dichos gases en la atmósfera son muy cortos, alrededor de dos meses para el CO y un día para el NO_2 , por lo que su contribución al calentamiento global es muy reducida, como ocurre en el planeta Marte cuya atmósfera es en un 95 % de CO_2 y menos de 5 % de N_2 , mostrando una temperatura de -50°C [56]. En cambio, el O_3 produce un efecto invernadero directo, máxime si es troposférico (como el generado en las erupciones volcánicas por oxidación del CO y NO_2). Debe recordarse que las contribuciones de O_3 detectadas por TROPOMI son muy elevadas. Por último, los aerosoles, contribuyen al enfriamiento de la atmósfera, por lo que su papel en el cambio climático es negativo respecto al de los gases efecto invernadero.

4. Conclusiones

- Los datos registrados por el sensor TROPOMI permiten analizar el balance de gases emitidos en una erupción volcánica como la ocasionada por la actividad del Volcán Cumbre Vieja de 2021.
- La metodología aplicada en este trabajo ha permitido obtener, procesar y analizar las medidas de gases y aerosoles emitidos a la atmósfera, gracias a los registros efectuados por el sensor TROPOMI, correspondientes al volcán de cumbre Vieja, antes y durante la erupción de 2021.
- El gas de los estudiados que más se ha emitido es el SO_2 ; los aportes suponen contribuciones promedio de 109 % respecto al año precedente; el volumen importante SO_2 emitido favorece el enfriamiento de la atmósfera actuando de manera inversa al calentamiento global.
- El siguiente gas de los estudiados más emitido es el CO; las contribuciones promedio de dicho gas durante la erupción son de un 4 % superiores a las registradas el año anterior por procesos no volcánicos; este reducido porcentaje de CO contribuye temporalmente al calentamiento global, pero no genera cambios a largo plazo.

- Los datos registrados por TROPOMI respecto al NO_2 muestran una variación respecto a los correspondientes del año precedente; no obstante, la incertidumbre registrada en los mismos no permite estimar con claridad su contribución. En cualquier caso, esta contribución es temporal, no transfiriendo su efecto a largo plazo.
- El sensor TROPOMI es capaz de detectar el ozono originado en la erupción, a pesar que no es un gas emitido directamente, sino que se genera por oxidación del CO y NO_2 emitidos. Su contribución es reducida y juega un papel de efecto invernadero directo que favorece el calentamiento global.
- El sensor TROPOMI ha registrado la emisión de aerosoles a la atmósfera como consecuencia de la erupción volcánica, el porcentaje cualitativo emitido es superior al 87%. Los aerosoles no contribuyen al calentamiento global.
- Los datos registrados y analizados en este estudio permiten estimar la contribución volcánica al balance total de gases, y la importancia de los procesos volcánicos al calentamiento global.

Referencias

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). *AR5 Synthesis Report: Climate Change 2014*. Disponible en: https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_FINAL_All_Topics.pdf
- [2] Cuevas, E., Milford, C., Bustos, J. J., R., García, O. E., García, R. D., Gómez-Peláez, A. J., Guirado-Fuentes, C., Marrero, C., Prats, N., Ramos, R., Redondas, A., Reyes, E., Rivas-Soriano, P. P., Rodríguez, S., Romero-Campos, P. M., Torres, C. J., Schneider, M., Yela, M., Belmonte, J...Sosa, E. (2019). *Izaña Atmospheric Research Center Activity Report 2017-2018*. (Eds. Cuevas, E., Milford, C. and Tarasova, O.), State Meteorological Agency (AEMET), Madrid, Spain and World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, WMO/GAW Report No. 247. Disponible en: https://izana.aemet.es/wp-content/docs/Izana_Report_2017_2018.pdf
- [3] Cole-Dai, Jihong. (2010). *Volcanoes and climate*. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change. 1. 824 - 839. 10.1002/wcc.76.
- [4] The European Space Agency (ESA). (s.f.). *Sentinel Online: Sentinel-5P*. Recuperado el 25 de mayo de 2022 de: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-5p>
- [5] Instituto Geográfico Nacional (IGN). *Noticias e informe mensual de vigilancia volcánica*. Recuperado el 28 de mayo de 2022 de: https://www.ign.es/web/resources/volcanologia/html/CA_noticias_2021.html#20210918
- [6] Britannica, The Editors of Encyclopaedia. (28 de marzo de 2020). *weather*. Encyclopedia Britannica. Recuperado el 07 de junio de 2022 de : <https://www.britannica.com/science/weather>
- [7] AEMET, Meteo Navarra. (s.f.). *Clasificación climática de Köppen* . Recuperado el 07 de junio de 2022 de: <http://meteo.navarra.es/definiciones/koppen.cfm>
- [8] Benavides, H. O., León, G. E. (2017). *Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático*. IDEAM-METEO/008-2007. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gases+de+Efecto+Invernadero+y+el+Cambio+Climatico.pdf>
- [9] Federación de Enseñanza de CC.OO. de Andalucía. (2010). *El efecto invernadero*. Nº 7. Disponible en: <https://www.feandalucia.ccoo.es/docu/p5sd6985.pdf>
- [10] Silvonen, V. (20 de octubre de 2019). *Gases de efecto invernadero y sus efectos nocivos*. GENANO. Recuperado el 22 de mayo de 2022 de [https://www.genano.com/es/infobase/gases-de-efecto-invernadero-y-sus-efectos-nocivos#:~:text=el%20di%C3%B3xido%20de%20sulfuro%20\(SO2,el%20clima%20m%C3%A1s%20que%20calentarlo](https://www.genano.com/es/infobase/gases-de-efecto-invernadero-y-sus-efectos-nocivos#:~:text=el%20di%C3%B3xido%20de%20sulfuro%20(SO2,el%20clima%20m%C3%A1s%20que%20calentarlo).
- [11] Gobierno de España. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (s.f.). *Dióxido de azufre*. Recuperado el 21 de mayo de 2022 de: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/salud/dioxido-azufre.aspx>
- [12] Gobierno de España. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (s.f.). *SO_x (Óxidos de azufre)*. Recuperado el 21 de mayo de 2022 de: <https://prtr-es.es/S0x-oxidos-de-azufre,15598,11,2007.html>
- [13] Mather, T.A. Allen, A.G. Davison, B. Pyle, David Oppenheimer, Clive McGonigle, A.J.S.. (2004). *Nitric acid from volcanoes*. Earth and Planetary Science Letters. 218. 17-30. 10.1016/S0012-821X(03)00640-X.
- [14] Gobierno de España. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (s.f.). *Monóxido de carbono*. Recuperado el 23 de mayo de 2022 de: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/salud/monoxido-carbono.aspx>
- [15] Agencia para sustancias tóxicas y el registro de enfermedades. (6 de mayo de 2016). *Óxidos de nitrógeno (monóxido de nitrógeno, dióxido de nitrógeno, etc.) (Nitrogen Oxides)*. Recuperado el 24 de mayo de 2022 de: https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts175.html
- [16] Gobierno de España. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (s.f.). *Dióxido de nitrógeno*. Recuperado el 24 de mayo de 2022 de: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/salud/oxidos-nitrogeno.aspx>

- [17] Gobierno de España. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (s.f.). *Ozono*. Recuperado el 25 de mayo de 2022 de: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/salud/ozono.aspx>
- [18] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (s.f.). *Generalidades del ozono*. Recuperado el 27 de mayo de 2022 de: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/generalidades-del-ozono#:~:text=Por%20otro%20lado%2C%20el%20ozono,contaminante%20nocivo%20para%20la%20salud>.
- [19] The European Space Agency (ESA). (s.f.). *Satélites de observación terrestre: introducción*. Recuperado el 18 de mayo de 2022 de: https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_ES/SEMJC07SXIG_0.html
- [20] Lanzamientos espaciales. (s.f.). *Tipos de órbitas de satélites espaciales*. Recuperado el 10 de junio de 2022 de: <https://lanzamientosespaciales.com/tipos-orbitas/#:~:text=Tipos%20de%20C3%B3rbitas%20de%20sat%20C3%A9lites%20espaciales,%20excentricidad%20direcci%C3%B3n%20o%20sincronicidad>.
- [21] The European Space Agency (ESA). (02 de marzo de 2020). *Low Earth Orbit*. Recuperado el 18 de mayo de 2022 de: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2020/03/Low_Earth_orbit
- [22] Ferreyra, A. (2016). *La observación de la tierra desde el espacio. Imágenes satelitales: un recurso disponible*. Disponible en: https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_pergamino_la_observacion_de_la_tierra_desde_el_espacio._imagenes_satelitales_un_recurso_disponible.pdf
- [23] National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (s.f.). *Geostationary Satellite Server*. Recuperado el 10 de junio de 2022 de: <https://www.goes.noaa.gov/>
- [24] Kramer, H., J. (s.f.). *MTSAT (Multifunction Transport Satellite)*. eoPortal Directory. Recuperado el 10 de junio de 2022 de: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/m/mtsatsat>
- [25] EUMETSAT. (s.f.). *Meteosat series*. Recuperado el 10 de junio de 2022 de: <https://www.eumetsat.int/our-satellites/meteosat-series>
- [26] Kramer, H., J. (s.f.). *Electro-1 / GOMS-1 (Geostationary Operational Meteorological Satellite-1)*. eoPortal Directory. Recuperado el 10 de junio de 2022 de: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/content/-/article/electro-1>
- [27] National Satellite Meteorological Center (NSMC). *FENGYUN Satellite Data Center*. Recuperado el 10 de junio de 2022 de: <https://satellite.nsmc.org.cn/portalsite/default.aspx>
- [28] Copernicus. (s.f.). *Copernicus en pocas palabras*. Recuperado el 25 de mayo de 2022 de: <https://www.copernicus.eu/es/sobre-copernicus/copernicus-en-pocas-palabras>
- [29] Fernandez, S. (19 de septiembre de 2021). *El volcán de la Palma erupciona y obliga a evacuar a más de 5000 personas*. La Vanguardia. Disponible en: <https://www.lavanguardia.com/vida/20210919/7731770/volcan-la-palma-erupcion-evacuar-terremotos-seismos.html>
- [30] Gobierno de Canarias. (25 de diciembre de 2021). *La erupción de La Palma se declara finalizada tras 85 días y 8 horas de duración y 1.219 hectáreas de coladas*. Portal de Noticias del Gobierno de Canarias. Disponible en: <https://www3.gobiernodecanarias.org/noticias/la-erupcion-de-la-palma-se-declara-finalizada-tras-85-dias-y-8-horas-de-duracion-y-1-219-hectareas-de-coladas/>
- [31] EuropaPress. (4 de diciembre de 2021). *Canarias remite al Gobierno una evaluación de daños del volcán de La Palma por 842,33 millones*. Disponible en: <https://www.europapress.es/islas-canarias/noticia-canarias-remite-gobierno-evaluacion-danos-volcan-palma-84233-millones-20211204160648.html>
- [32] Google. (s.f.). *Volcán de Cumbre Vieja- La Palma*. Recuperado el 07 de junio de 2022 de: <https://www.google.com/maps/place/Volc%C3%A1n+Cumbre+Vieja+%7C+La+Palma/@28.4797417,-15.9612587,250916m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0xc6b932d2bc0f91b:0xb3e8b8fbaae6dec6!8m2!3d28.612728!4d-17.866693!5m1!1e4>
- [33] Instituto Geográfico Nacional (IGN). Recuperado el 07 de junio de 2022 de: <https://www.ign.es/web/ign/portal>

- [34] Instituto Geográfico Nacional (IGN). (s.f.). *Descripción geológica de la Palma*. Recuperado el 07 de junio de 2022 de: https://www.ign.es/web/resources/sismologia/tproximos/sismotectonica/pag_sismotectonicas/can_la_palma.html
- [35] Global Volcanism Program, 2021. Report on La Palma (Spain). In: Sennert, S K (ed.), Weekly Volcanic Activity Report, 15 September-21 September 2021. Smithsonian Institution and US Geological Survey.
- [36] Global Volcanism Program, 2021. Report on La Palma (Spain). In: Sennert, S K (ed.), Weekly Volcanic Activity Report, 8 September-14 September 2021. Smithsonian Institution and US Geological Survey.
- [37] Instituto Geológico y Minero de España (IGME).(07 de enero de 2022). *Erupción de la Palma: Seguimiento de la erupción*. Recuperado el 10 de junio de 2022 de: <https://info.igme.es/eventos/Erupcion-volcanica-la-palma/seguimiento-erupcion>
- [38] Voiland, A. (18 de octubre de 2021). *Sulfur Skies over La Palma*. NASA. Earth Observatory. Recuperado el 10 de junio de 2022 de: <https://earthobservatory.nasa.gov/images/148978/sulfur-skies-over-la-palma>
- [39] Suárez, D., García, O. E. (14 de mayo de 2022). *La erupción volcánica de La Palma: aspectos meteorológicos y contaminantes*. AEMETBLOG. Disponible en: <https://aemetblog.es/2022/05/14/la-erupcion-volcanica-de-la-palma-aspectos-meteorologicos-y-contaminantes/>
- [40] COPE. (19 de noviembre de 2021). *Revisan a 5,1 el sismo de Mazo, el del mayor magnitud desde la erupción*. Disponible en: https://www.cope.es/actualidad/sociedad/noticias/revisan-sismo-mazo-del-mayor-magnitud-desde-erupcion-20211119_1628352
- [41] Quílez, S., Álvarez, D. (29 de noviembre de 2022). *Así te hemos contado el cese de actividad en el cono principal del volcán de La Palma*. RTVE. Disponible en: <https://www.rtve.es/noticias/20211129/erupcion-volcan-palma-ultima-hora/2234602.shtml>
- [42] Artiles, A., (25 de diciembre de 2021). *Fin del volcán de Cumbre Vieja*. Canarias7. Disponible en: <https://www.canarias7.es/canarias/la-palma/anuncio-directo-volcan-20211225130300-nt.html>
- [43] Instituto Geográfico Nacional (IGN). (17 de noviembre de 2021) *Histograma confeccionado por el IGN* (gráfico). Disponible en: https://www.ign.es/web/resources/volcanologia/SIS/jpg/PA_SIS_histograma_serie.jpg
- [44] 2019). ARSET - High Resolution NO2 Monitoring From Space with TROPOMI. NASA Applied Remote Sensing Training Program (ARSET): <http://appliedsciences.nasa.gov/join-mission/training/english/arset-high-resolution-no2-monitoring-space-tropomi>
- [45] The European Space Agency (ESA). (s.f.). *Sentinel Online: Sentinel-5P: Geographical Coverage*. Recuperado el 28 de mayo de 2022 de: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-5p/geographical-coverage>
- [46] The European Space Agency (ESA). (s.f.). *Sentinel-5P, TROPOMI: Instrument-Description*. Recuperado el 25 de mayo de 2022 de: <https://web.archive.org/web/20180205184643/https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-5p/instrument/description>
- [47] PuraData. (13 de octubre de 2017). *Sentinel-5P ya está en el espacio*. Recuperado el 10 de junio de 2022 de: <https://puradata.com.ar/sentinel-5p-ya-esta-espacio/>
- [48] The European Space Agency (ESA). (s.f.). *Sentinel Online: Sentinel-5P: Data Products*. Recuperado el 28 de mayo de 2022 de: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-5p/data-products>
- [49] Mapas Topográficos (s. f.). *Mapa Topográfico La Palma*. Recuperado el 15 de junio de 2022 de: <https://es-ar.topographic-map.com/maps/2h3v/La-Palma/>
- [50] Bozó, L. (2021). *Időjárás: Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service*, 125(2). 167-336. 10.28974/idojaras.2021.2.1
- [51] The European Space Agency (ESA). (s.f.). *Sentinel Online: Level-2 Algorithms - Aerosol Index*. Recuperado el 1 de junio de 2022 de: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/technical-guides/sentinel-5p/level-2/aerosol-index>

- [52] International Volcanic Health Hazard Network (IVHHN). (s. f.). *Dióxido de azufre (SO₂)*. Recuperado el 21 de mayo de 2022 de: <https://www.ivhnn.org/index.php/es/guidelines/guia-sobre-gases-volcanicos/dioxido-de-azufre#:~:text=El%20di%C3%B3xido%20de%20azufre%20es,potencial%20influencia%20en%20el%20clima>.
- [53] UCAR Center for Science and Investigation. (s. f.). *Carbon Monoxide*. Recuperado el 24 de mayo de: <https://scied.ucar.edu/learning-zone/air-quality/carbon-monoxide#:~:text=Carbon%20monoxide%20is%20present%20in,as%20low%20as%2050%20ppb>.
- [54] Stein, D., Wagner, T. (17 de noviembre de 2021). *S5P Mission Performance Centre UV Aerosol Index [L2_AER_AI] Readme* 2.1. Página 7. Disponible en: <https://sentinel.esa.int/documents/247904/3541451/Sentinel-5P-Aerosol-Level-2-Product-Readme-File>
- [55] Gobierno de España. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (s.f.). *Partículas*. Recuperado el 30 de mayo de 2022 de: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/salud/particulas.aspx>
- [56] Rover Environmental Monitoring Station Mars Science Laboratory (NASA), Centro de Astrobiología (CSIC-INTA). (s. f.). *Atmósfera de Marte*. Recuperado el 20 de junio de 2022 de: <http://cab.inta-csic.es/remes/es/atmosfera-de-marte/#:~:text=Sin%20embargo%2C%20tanto%20en%20el,los%20de%20el%205%25%20restante>.

A. Gráficas

A.1. Dióxido de azufre

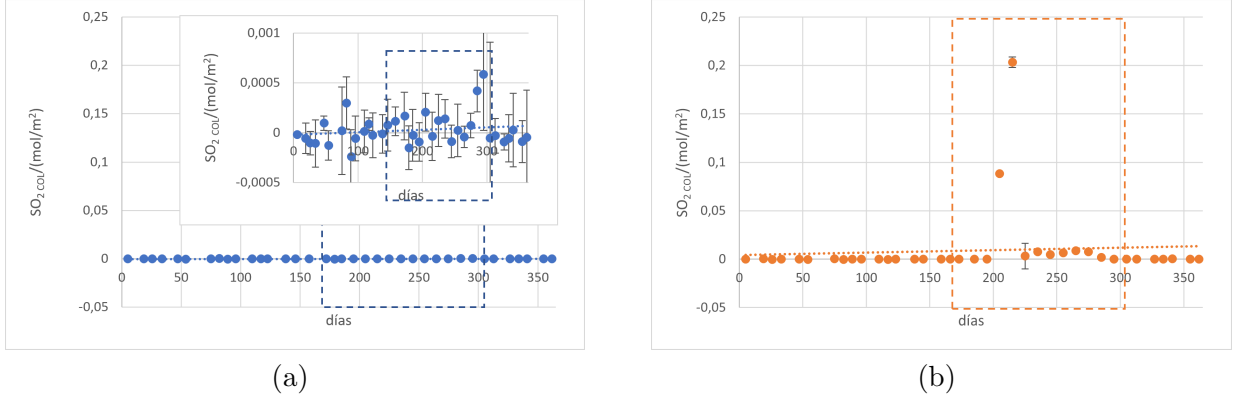


Figura 31: Medidas de la columna vertical total de SO_2 recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde marzo de 2020 hasta febrero de 2021; superior, detalle de dichas medidas ampliando su escala de representación; la línea de puntos azul muestra un ajuste lineal, de ecuación: $y = 2 \cdot 10^{-7}x - 2 \cdot 10^{-5}$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,0271$; b) desde marzo de 2021 hasta febrero de 2022; la línea de puntos naranja muestra un ajuste lineal, de ecuación: $y = 3 \cdot 10^{-5}x + 0,0043$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,0058$. La zona recuadrada en ambas figuras coincide con las fechas próximas a la erupción.

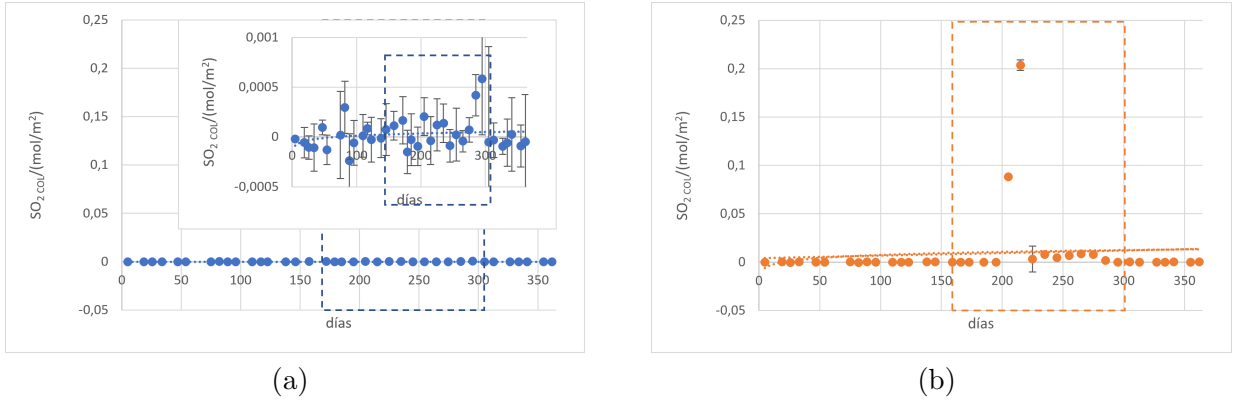
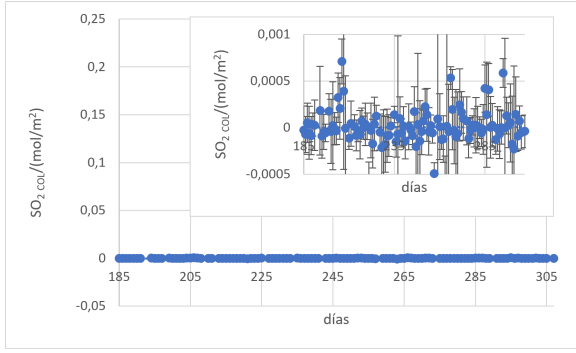
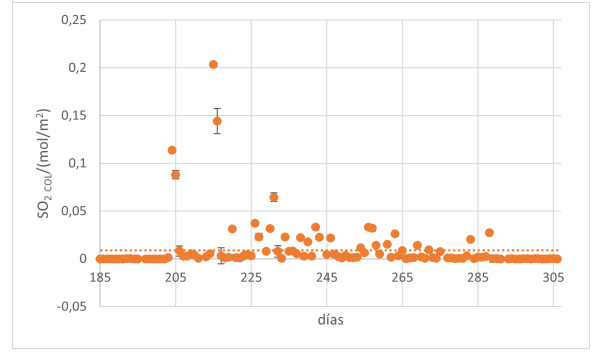


Figura 32: Medidas de la columna vertical total de SO_2 recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde marzo de 2020 hasta febrero de 2021; superior, detalle de dichas medidas ampliando su escala de representación; la línea de puntos azul muestra un ajuste logarítmico, de ecuación: $y = 3 \cdot 10^{-5}\ln(x) - 0,0001$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,0387$; b) desde marzo de 2021 hasta febrero de 2022; la línea de puntos naranja muestra un ajuste logarítmico, de ecuación: $y = 0,0045\ln(x) - 0,0134$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,0143$. La zona recuadrada en ambas figuras coincide con las fechas próximas a la erupción.

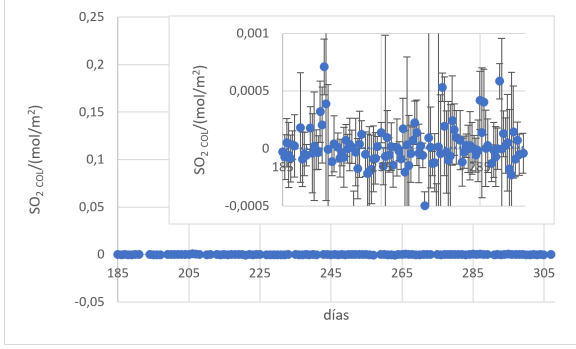


(a)

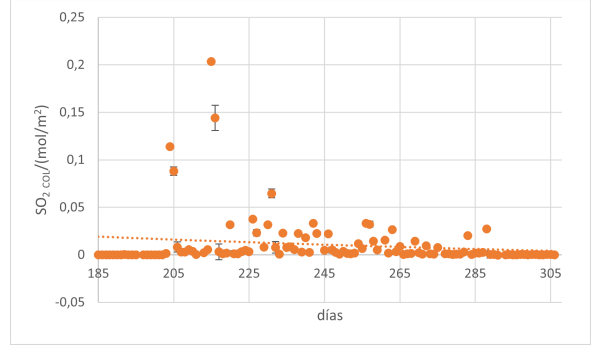


(b)

Figura 33: Medidas de la columna vertical total de SO_2 recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde septiembre de 2020 hasta diciembre de 2020; superior, detalle de dichas medidas ampliando su escala de representación; la línea de puntos azul muestra un ajuste por medio de su media móvil; la línea de puntos azul muestra un ajuste lineal, de ecuación: $y = 1 \cdot 10^{-7}x - 3 \cdot 10^{-5}$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,0007$; b) desde septiembre de 2021 hasta diciembre de 2021; la línea de puntos naranja muestra un ajuste lineal, de ecuación: $y = -0,0001x + 3 \cdot 0,044$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,0303$.



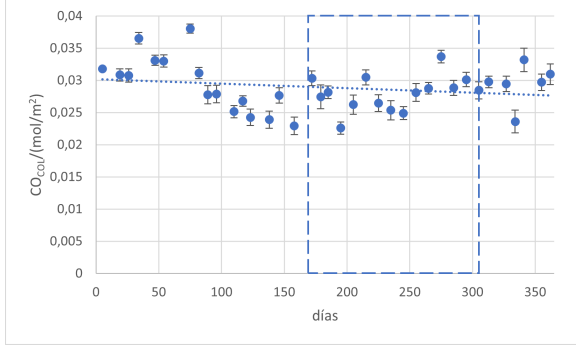
(a)



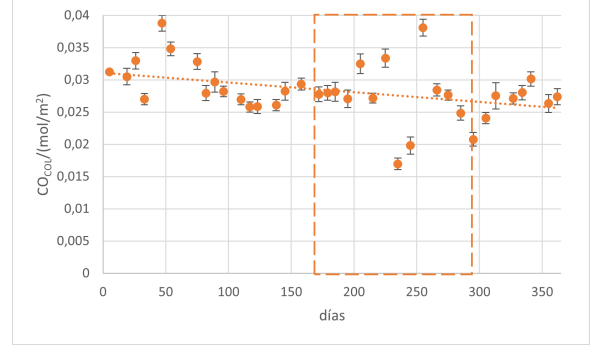
(b)

Figura 34: Medidas de la columna vertical total de SO_2 recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde septiembre de 2020 hasta diciembre de 2020; superior, detalle de dichas medidas ampliando su escala de representación; la línea de puntos azul muestra un ajuste por medio de su media móvil; la línea de puntos azul muestra un ajuste logarítmico, de ecuación: $y = 2 \cdot 10^{-5}\ln(x) - 0,0001$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,0004$; b) desde septiembre de 2021 hasta diciembre de 2021; la línea de puntos naranja muestra un ajuste logarítmico, de ecuación: $y = -0,03\ln(x) - 0,1765$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,0259$.

A.2. Monóxido de carbono

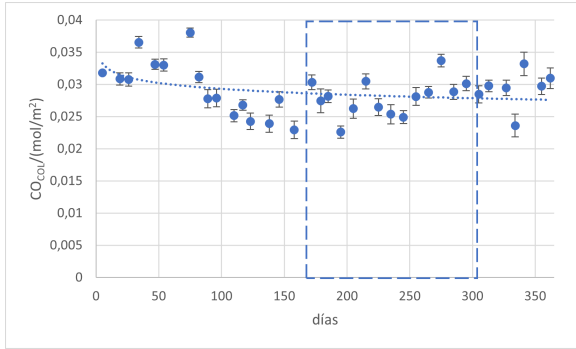


(a)

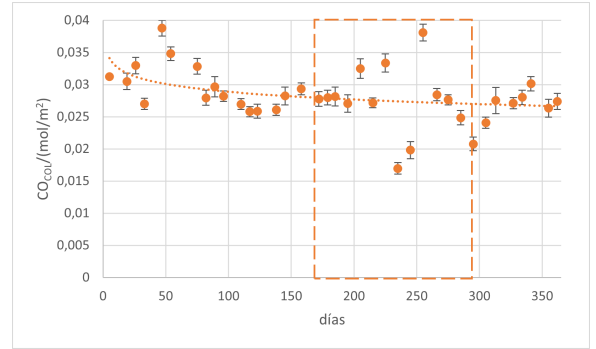


(b)

Figura 35: Medidas de la columna vertical total de CO recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde marzo de 2020 hasta febrero de 2021; la línea de puntos azul muestra un ajuste lineal, de ecuación: $y = -7 \cdot 10^{-6}x + 0,0302$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,0431$; b) desde marzo de 2021 hasta febrero de 2022; la línea de puntos naranja muestra un ajuste lineal, de ecuación: $y = -2 \cdot 10^{-5}x + 0,0311$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,1394$. La zona recuadrada en ambas figuras coincide con las fechas próximas a la erupción.

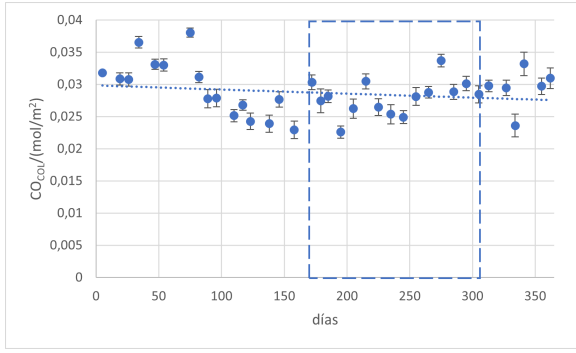


(a)

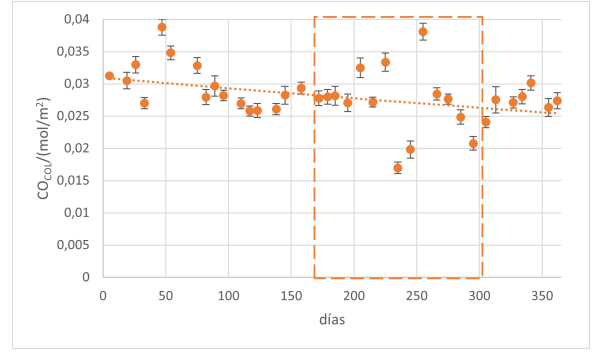


(b)

Figura 36: Medidas de la columna vertical total de CO recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde marzo de 2020 hasta febrero de 2021; la línea de puntos azul muestra un ajuste logarítmico, de ecuación: $y = -0,001\ln(x) + 0,0354$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,1203$; b) desde marzo de 2021 hasta febrero de 2022; la línea de puntos naranja muestra un ajuste logarítmico, de ecuación: $y = -0,002\ln(x) + 0,0369$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,1464$. La zona recuadrada en ambas figuras coincide con las fechas próximas a la erupción.

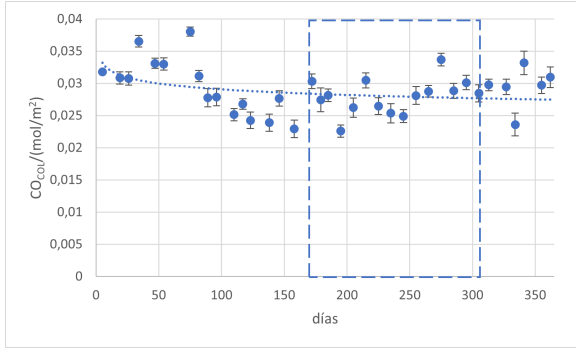


(a)

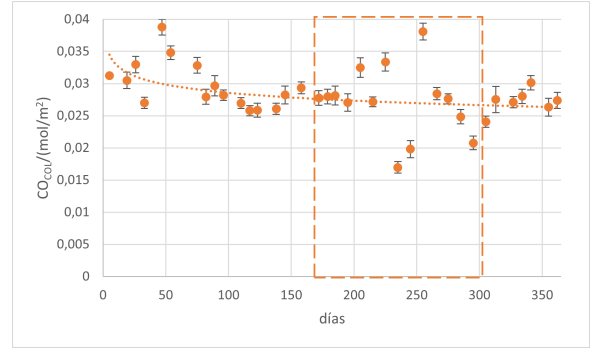


(b)

Figura 37: Medidas de la columna vertical total de CO recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde marzo de 2020 hasta febrero de 2021; la línea de puntos azul muestra un ajuste exponencial, de ecuación: $y = 0,0298e^{-2 \cdot 10^{-4}x}$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,0454$; b) desde marzo de 2021 hasta febrero de 2022; la línea de puntos naranja muestra un ajuste exponencial, de ecuación: $y = 0,0309e^{-5 \cdot 10^{-4}x}$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,1431$. La zona recuadrada en ambas figuras coincide con las fechas próximas a la erupción.

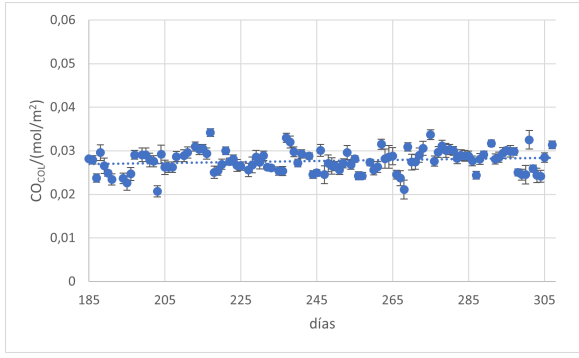


(a)

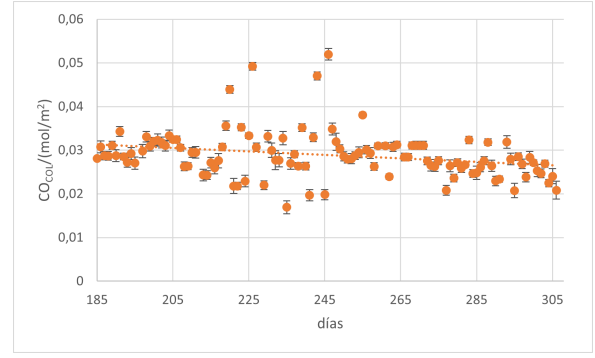


(b)

Figura 38: Medidas de la columna vertical total de CO recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde marzo de 2020 hasta febrero de 2021; la línea de puntos azul muestra un ajuste potencial, de ecuación: $y = 0,0356x^{-0,044}$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,1215$; b) desde marzo de 2021 hasta febrero de 2022; la línea de puntos naranja muestra un ajuste potencial, de ecuación: $y = 0,0382x^{-0,063}$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,1419$. La zona recuadrada en ambas figuras coincide con las fechas próximas a la erupción.

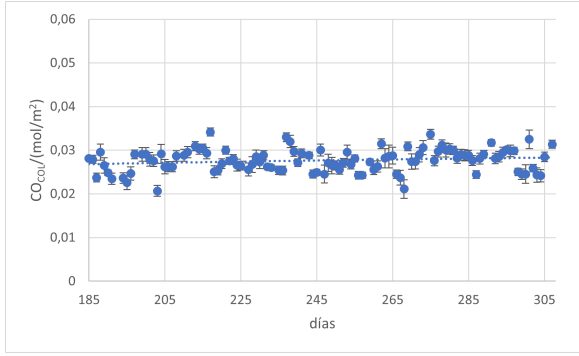


(a)

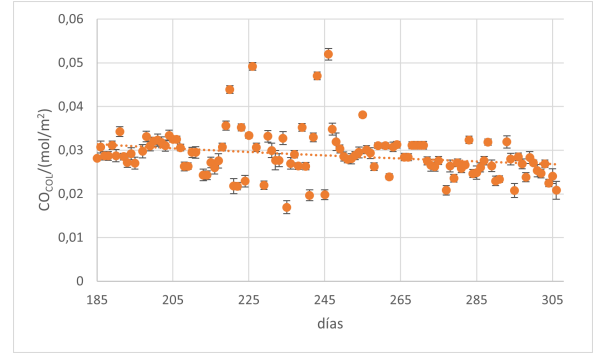


(b)

Figura 39: Medidas de la columna vertical total de CO recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde septiembre de 2020 hasta diciembre de 2020; la línea de puntos azul muestra un ajuste lineal, de ecuación: $y = 1 \cdot 10^{-5}x + 0,0247$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,0269$; b) desde septiembre de 2021 hasta diciembre de 2021; la línea de puntos naranja muestra un ajuste lineal, de ecuación: $y = -4 \cdot 10^{-5}x + 0,0387$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,0715$.

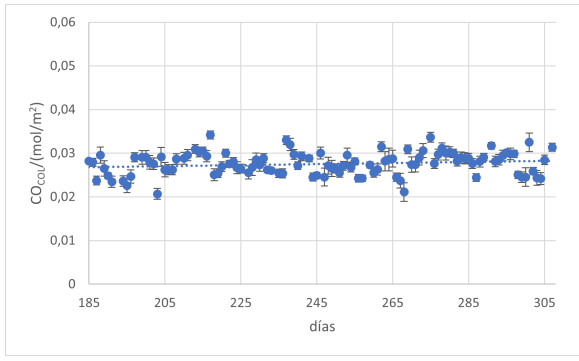


(a)

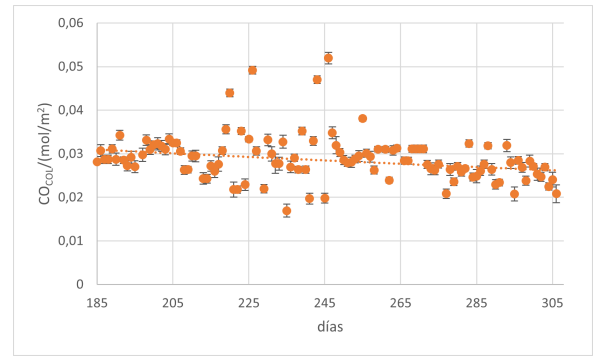


(b)

Figura 40: Medidas de la columna vertical total de CO recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde septiembre de 2020 hasta diciembre de 2020; la línea de puntos azul muestra un ajuste logarítmico, de ecuación: $y = 0,003\ln(x) + 0,0113$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,0283$; b) desde septiembre de 2021 hasta diciembre de 2021; la línea de puntos naranja muestra un ajuste logarítmico, de ecuación: $y = -0,009\ln(x) + 0,0792$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,0646$.

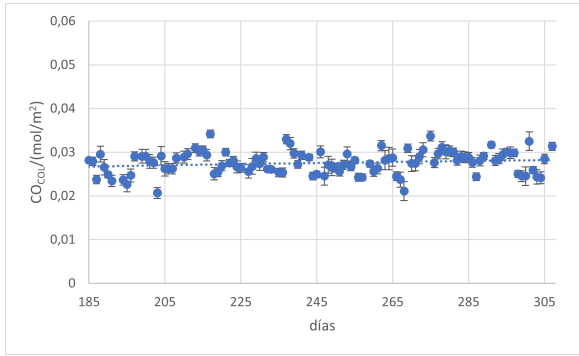


(a)

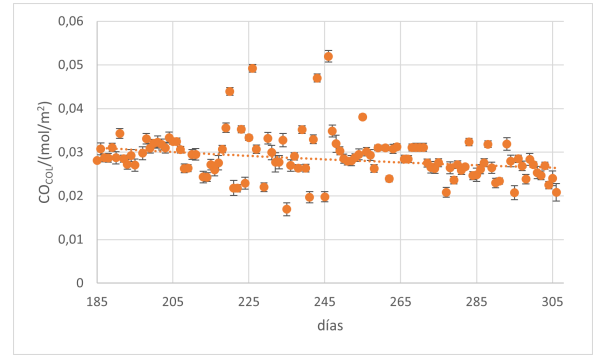


(b)

Figura 41: Medidas de la columna vertical total de CO recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde septiembre de 2020 hasta diciembre de 2020; la línea de puntos azul muestra un ajuste exponencial, de ecuación: $y = 0,0247e^{0,0004x}$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,0267$; b) desde septiembre de 2021 hasta diciembre de 2021; la línea de puntos naranja muestra un ajuste exponencial, de ecuación: $y = 0,04e^{-0,0001x}$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,0692$.



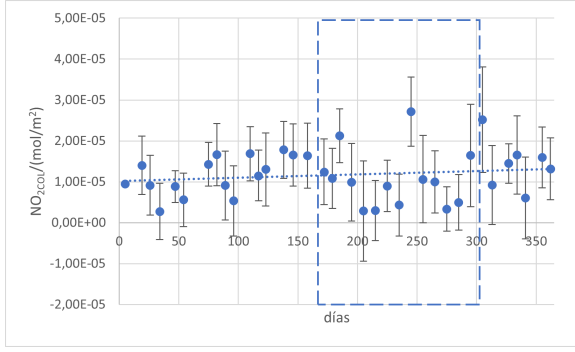
(a)



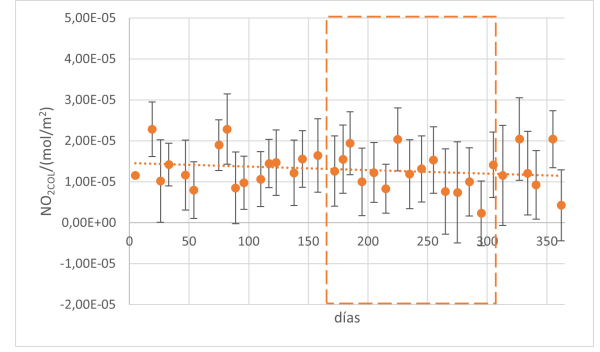
(b)

Figura 42: Medidas de la columna vertical total de CO recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde septiembre de 2020 hasta diciembre de 2020; la línea de puntos azul muestra un ajuste potencial, de ecuación: $y = 0,0159x^{0,1089}$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,0281$; b) desde septiembre de 2021 hasta diciembre de 2021; la línea de puntos naranja muestra un ajuste potencial, de ecuación: $y = 0,1664x^{-0,321}$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,0624$.

A.3. Dióxido de nitrógeno

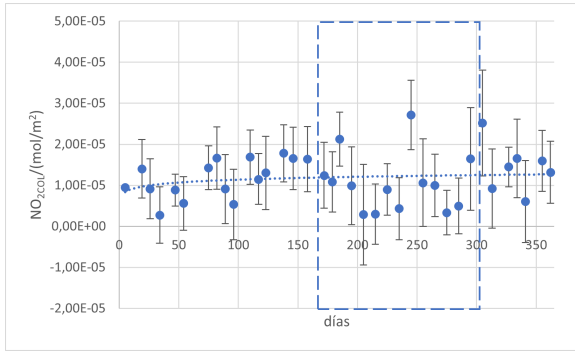


(a)

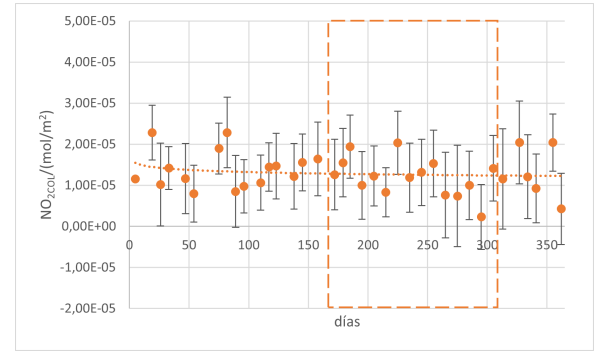


(b)

Figura 43: Medidas de la columna vertical troposférica de NO_2 recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde marzo de 2020 hasta febrero de 2021; la línea de puntos azul muestra un ajuste lineal, de ecuación: $y = 8 \cdot 10^{-9}x + 1 \cdot 10^{-5}$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,0208$; b) desde marzo de 2021 hasta febrero de 2022; la línea de puntos naranja muestra un ajuste lineal, de ecuación: $y = -9 \cdot 10^{-9}x + 1 \cdot 10^{-5}$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,0366$. La zona recuadrada en ambas figuras coincide con las fechas próximas a la erupción.

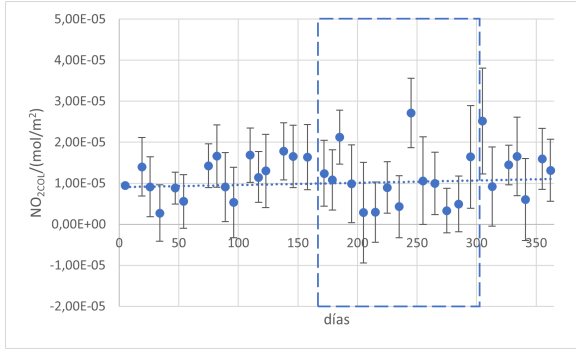


(a)

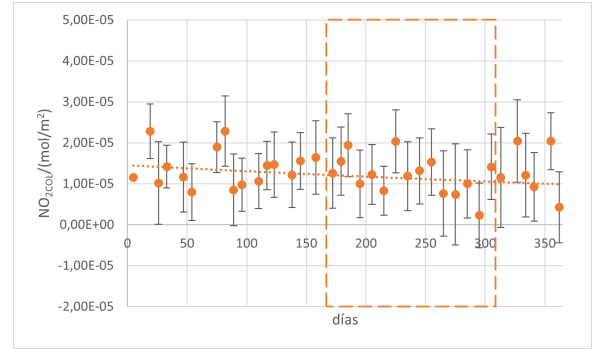


(b)

Figura 44: Medidas de la columna vertical troposférica de NO_2 recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde marzo de 2020 hasta febrero de 2021; la línea de puntos azul muestra un ajuste logarítmico, de ecuación: $y = 1 \cdot 10^{-6}\ln(x) + 7 \cdot 10^{-6}$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,0256$; b) desde marzo de 2021 hasta febrero de 2022; la línea de puntos naranja muestra un ajuste logarítmico, de ecuación: $y = -7 \cdot 10^{-7}\ln(x) + 2 \cdot 10^{-5}$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,021$. La zona recuadrada en ambas figuras coincide con las fechas próximas a la erupción.

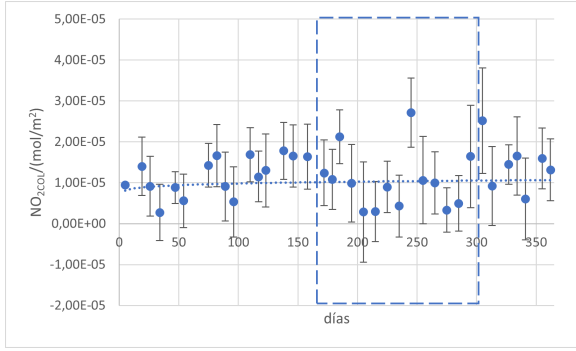


(a)

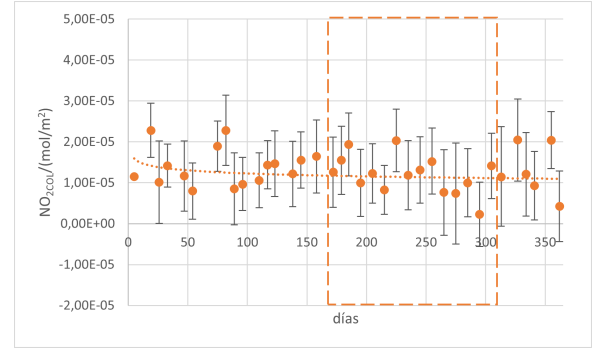


(b)

Figura 45: Medidas de la columna vertical troposférica de NO_2 recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde marzo de 2020 hasta febrero de 2021; la línea de puntos azul muestra un ajuste exponencial, de ecuación: $y = 9 \cdot 10^{-6} e^{0,0005x}$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,0205$; b) desde marzo de 2021 hasta febrero de 2022; la línea de puntos naranja muestra un ajuste exponencial, de ecuación: $y = 1 \cdot 10^{-5} e^{-0,001x}$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,0358$. La zona recuadrada en ambas figuras coincide con las fechas próximas a la erupción.

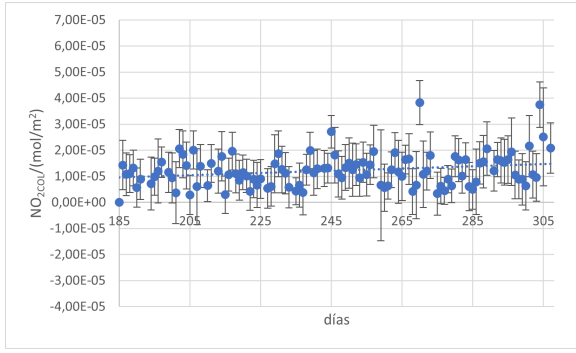


(a)

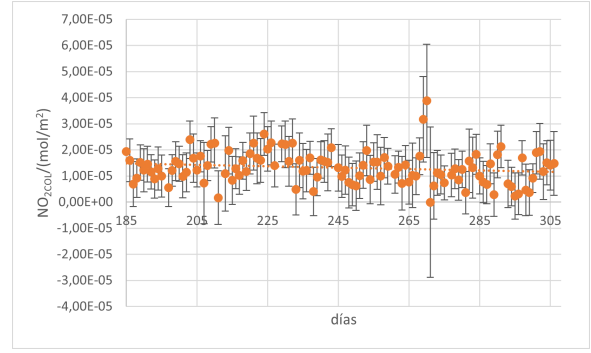


(b)

Figura 46: Medidas de la columna vertical troposférica de NO_2 recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde marzo de 2020 hasta febrero de 2021; la línea de puntos azul muestra un ajuste potencial, de ecuación: $y = 7 \cdot 10^{-6} x^{0,0634}$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,0258$; b) desde marzo de 2021 hasta febrero de 2022; la línea de puntos naranja muestra un ajuste potencial, de ecuación: $y = 2 \cdot 10^{-5} x^{-0,086}$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,0186$. La zona recuadrada en ambas figuras coincide con las fechas próximas a la erupción.

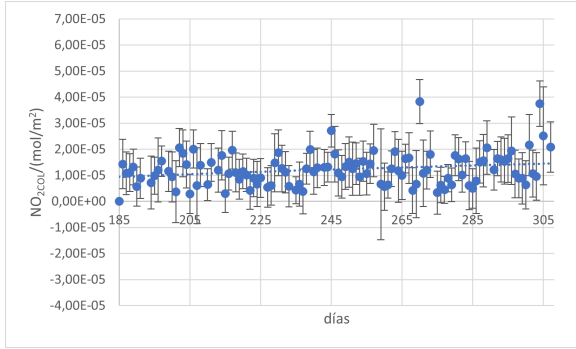


(a)

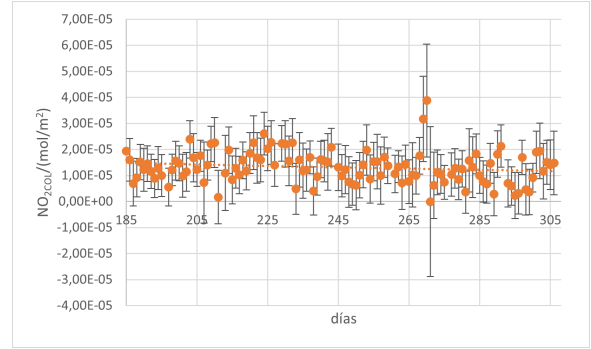


(b)

Figura 47: Medidas de la columna vertical troposférica de NO_2 recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde septiembre de 2020 hasta diciembre de 2020; la línea de puntos azul muestra un ajuste lineal, de ecuación: $y = 3 \cdot 10^{-8}x + 4 \cdot 10^{-6}$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,0353$; b) desde septiembre de 2021 hasta diciembre de 2021; la línea de puntos naranja muestra un ajuste lineal, de ecuación: $y = -3 \cdot 10^{-8}x + 2 \cdot 10^{-5}$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,0243$.



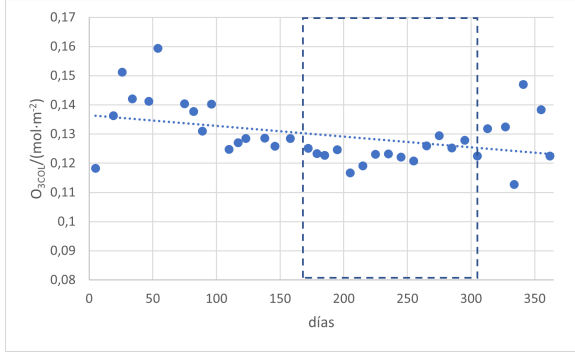
(a)



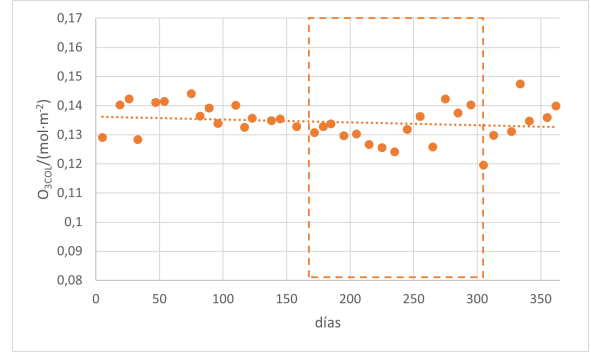
(b)

Figura 48: Medidas de la columna vertical troposférica de NO_2 recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde septiembre de 2020 hasta diciembre de 2020; la línea de puntos azul muestra un ajuste logarítmico, de ecuación: $y = 8 \cdot 10^{-6}\ln(x) - 3 \cdot 10^{-5}$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,0314$; b) desde septiembre de 2021 hasta diciembre de 2021; la línea de puntos naranja muestra un ajuste logarítmico, de ecuación: $y = -6 \cdot 10^{-6}\ln(x) + 5 \cdot 10^{-5}$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,0216$.

A.4. Ozono

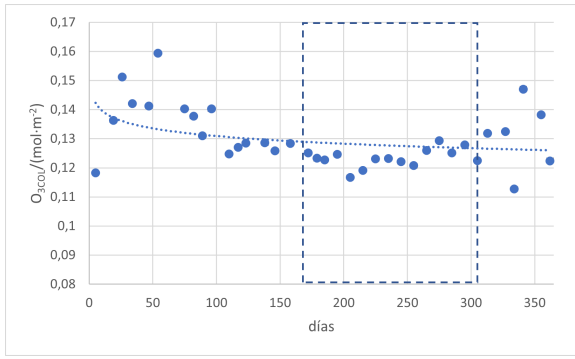


(a)

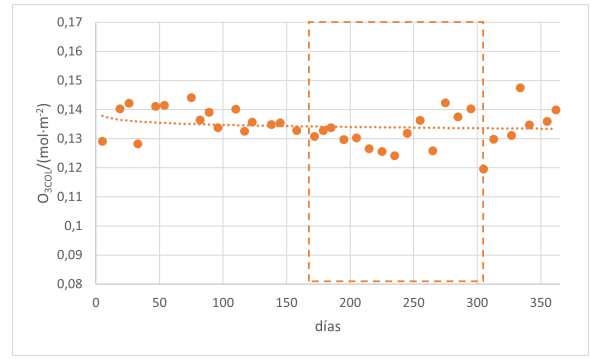


(b)

Figura 49: Medidas de la columna vertical total de O_3 recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde marzo de 2020 hasta febrero de 2021; la línea de puntos azul muestra un ajuste lineal, de ecuación: $y = -4 \cdot 10^{-5}x + 0,1365$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,1526$; b) desde marzo de 2021 hasta febrero de 2022; la línea de puntos naranja muestra un ajuste lineal, de ecuación: $y = -1 \cdot 10^{-5}x + 0,1363$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,0298$. La zona recuadrada en ambas figuras coincide con las fechas próximas a la erupción.

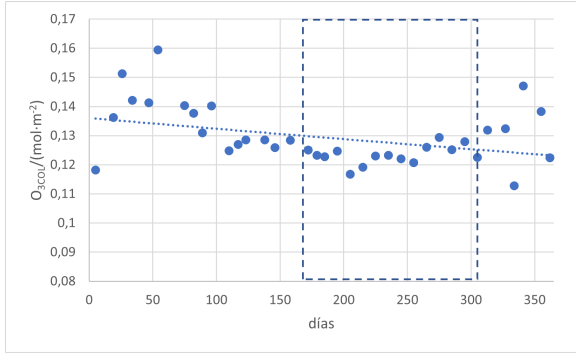


(a)

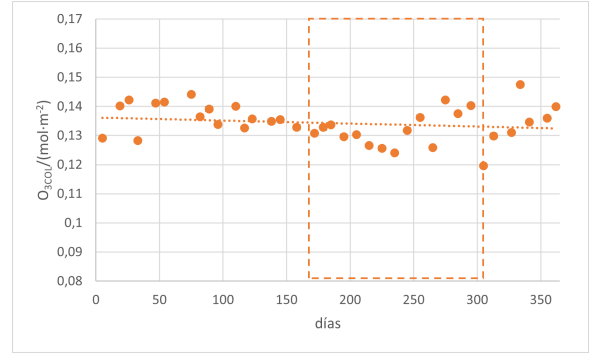


(b)

Figura 50: Medidas de la columna vertical total de O_3 recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde marzo de 2020 hasta febrero de 2021; la línea de puntos azul muestra un ajuste logarítmico, de ecuación: $y = -0,004\ln(x) + 0,1485$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,129$; b) desde marzo de 2021 hasta febrero de 2022; la línea de puntos naranja muestra un ajuste logarítmico, de ecuación: $y = -0,001\ln(x) + 0,1396$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,0259$. La zona recuadrada en ambas figuras coincide con las fechas próximas a la erupción.

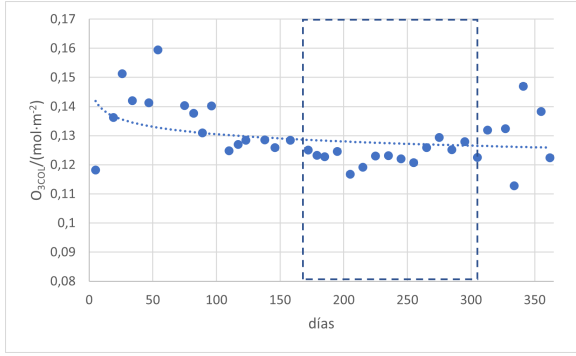


(a)

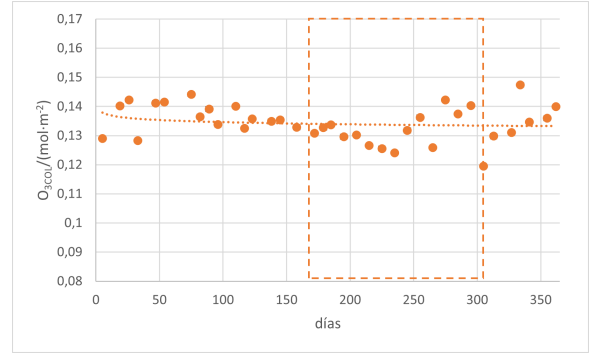


(b)

Figura 51: (a): Medidas de la columna vertical total de O_3 para las fechas de Marzo 2020 hasta Febrero 2021 en la localización del volcán de Cumbre Vieja. La zona recuadrada coincide con las fechas próximas a la erupción del año siguiente. Los puntos han sido ajustados a una función exponencial, de ecuación: $y = 0,136e^{-3 \cdot 10^{-4}x}$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,1567$. (b): Medidas de la columna vertical total de O_3 para las fechas de Marzo 2021 hasta Febrero 2022 en la localización del volcán de Cumbre Vieja. La zona recuadrada coincide con las fechas próximas a la erupción. Los puntos han sido ajustados a una función exponencial, de ecuación: $y = 0,1362e^{-8 \cdot 10^{-5}x}$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,0302$.

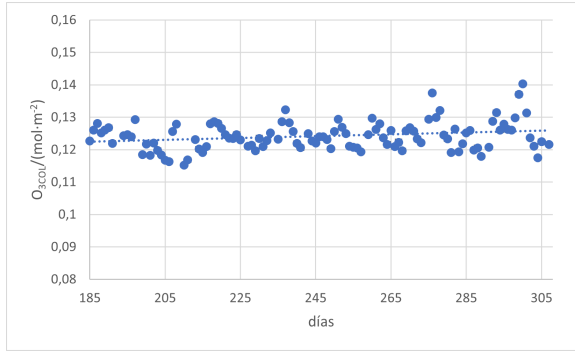


(a)

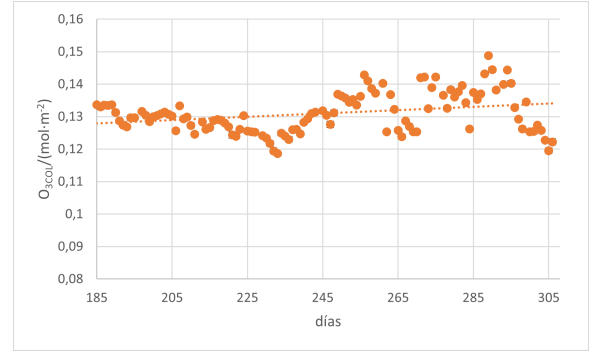


(b)

Figura 52: Medidas de la columna vertical total de O_3 recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde marzo de 2020 hasta febrero de 2021; la línea de puntos azul muestra un ajuste potencial, de ecuación: $y = 0,1485x^{-0,028}$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,124$; b) desde marzo de 2021 hasta febrero de 2022; la línea de puntos naranja muestra un ajuste potencial, de ecuación: $y = 0,1396x^{-0,008}$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,0255$. La zona recuadrada en ambas figuras coincide con las fechas próximas a la erupción.

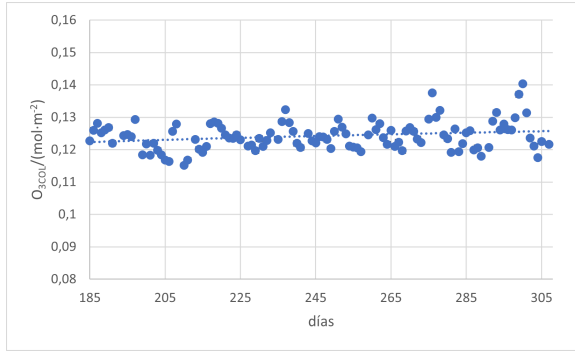


(a)

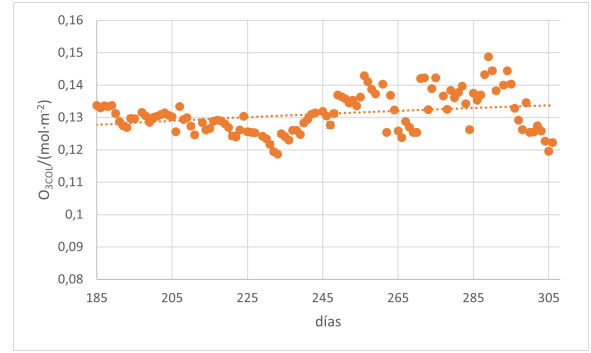


(b)

Figura 53: Medidas de la columna vertical total de O_3 recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde septiembre de 2020 hasta diciembre de 2020; la línea de puntos azul muestra un ajuste lineal, de ecuación: $y = 3 \cdot 10^{-5}x + 0,1172$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,0533$; b) desde septiembre de 2021 hasta diciembre de 2021; la línea de puntos naranja muestra un ajuste lineal, de ecuación: $y = 5 \cdot 10^{-5}x + 0,1186$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,0857$.

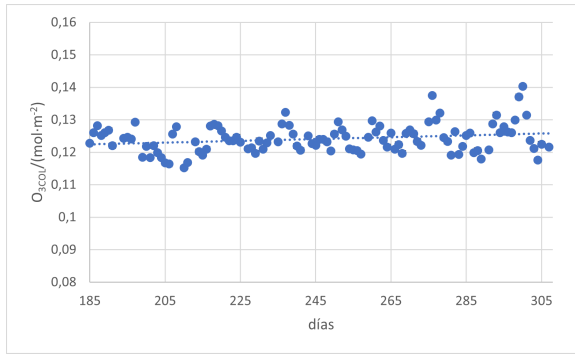


(a)

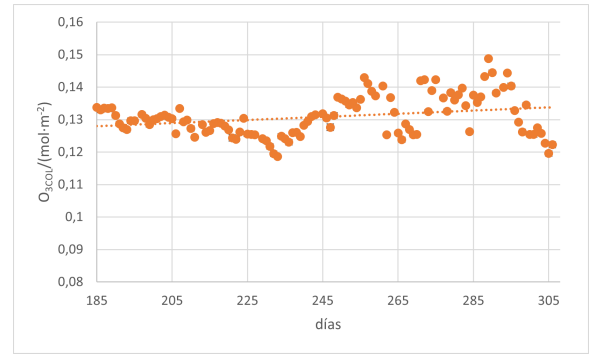


(b)

Figura 54: Medidas de la columna vertical total de O_3 recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde septiembre de 2020 hasta diciembre de 2020; la línea de puntos azul muestra un ajuste logarítmico, de ecuación: $y = 0,0067\ln(x) + 0,0873$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,0503$; b) desde septiembre de 2021 hasta diciembre de 2021; la línea de puntos naranja muestra un ajuste logarítmico, de ecuación: $y = 0,012\ln(x) + 0,0652$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,0825$.

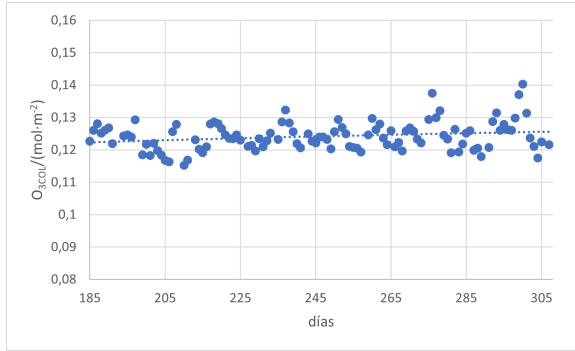


(a)

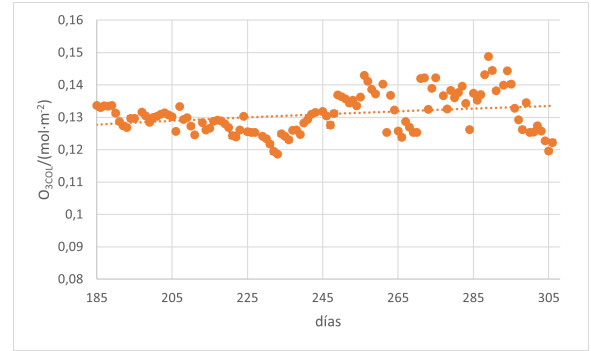


(b)

Figura 55: Medidas de la columna vertical total de O_3 recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde septiembre de 2020 hasta diciembre de 2020; la línea de puntos azul muestra un ajuste exponencial, de ecuación: $y = 0,1175e^{0,0002x}$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,0534$; b) desde septiembre de 2021 hasta diciembre de 2021; la línea de puntos naranja muestra un ajuste exponencial, de ecuación: $y = 0,1195e^{-0,0004x}$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,0857$.



(a)



(b)

Figura 56: Medidas de la columna vertical total de O_3 recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde septiembre de 2020 hasta diciembre de 2020; la línea de puntos azul muestra un ajuste potencial, de ecuación: $y = 0,0928x^{0,0528}$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,0505$; b) desde septiembre de 2021 hasta diciembre de 2021; la línea de puntos naranja muestra un ajuste potencial, de ecuación: $y = 0,0809x^{0,0875}$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,0829$.

A.5. Aerosoles: $\lambda_1 = 340 \text{ nm}$ y $\lambda_2 = 380 \text{ nm}$

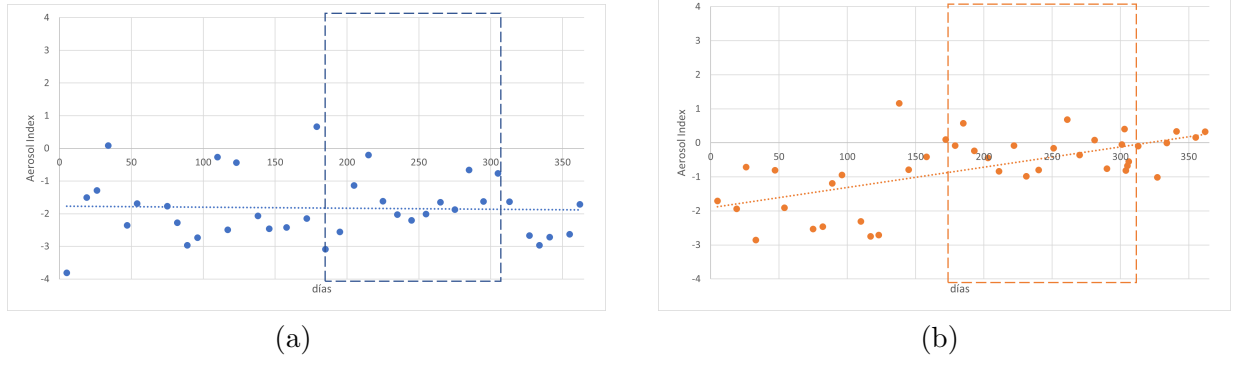


Figura 57: Medidas del índice de aerosoles recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde marzo de 2020 hasta febrero de 2021; superior, detalle de dichas medidas ampliando su escala de representación; la línea de puntos azul muestra un ajuste lineal, de ecuación: $y = -0,0003x - 1,7716$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,0012$; b) desde marzo de 2021 hasta febrero de 2022; la línea de puntos naranja muestra un ajuste lineal, de ecuación: $y = 0,006x - 1,907$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,3908$. La zona recuadrada en ambas figuras coincide con las fechas próximas a la erupción.

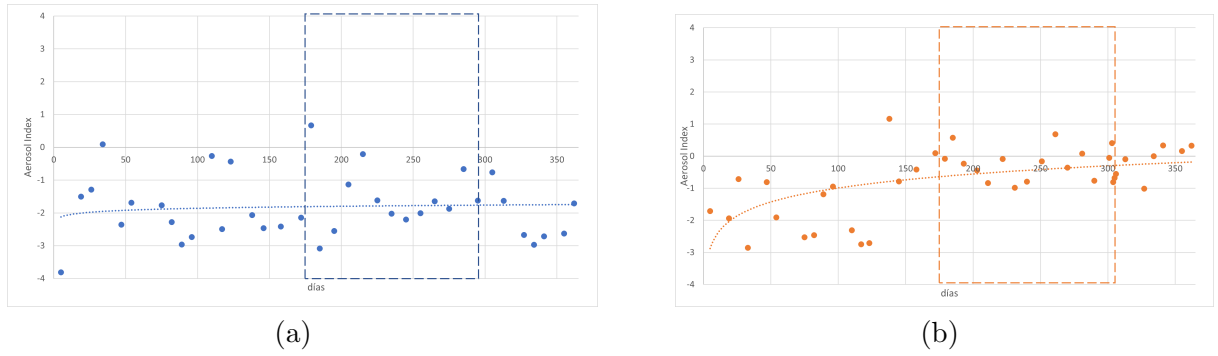
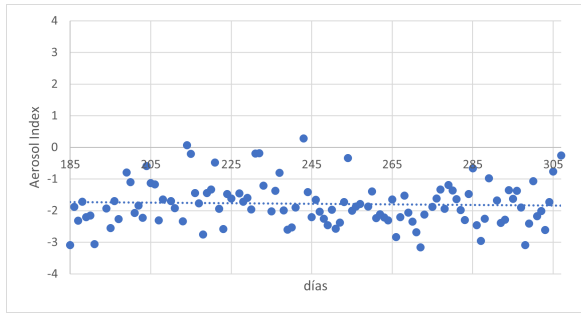
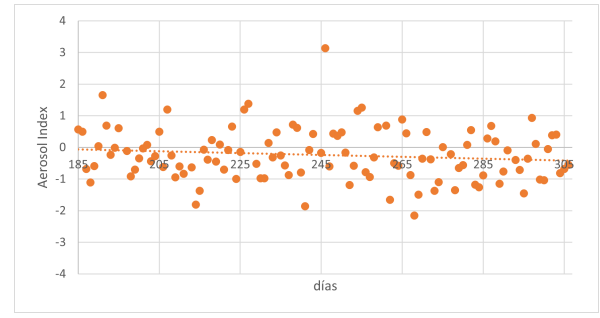


Figura 58: Medidas del índice de aerosoles recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde marzo de 2020 hasta febrero de 2021; la línea de puntos azul muestra un ajuste logarítmico, de ecuación: $y = 0,0882\ln(x) - 2,2649$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,0073$; b) desde marzo de 2021 hasta febrero de 2022; la línea de puntos naranja muestra un ajuste logarítmico, de ecuación: $y = 0,6286\ln(x) - 3,886$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,3258$. La zona recuadrada en ambas figuras coincide con las fechas próximas a la erupción.

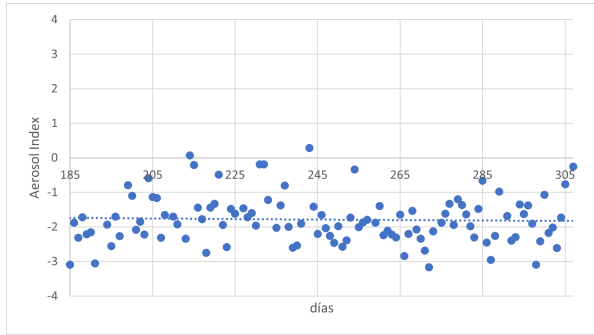


(a)

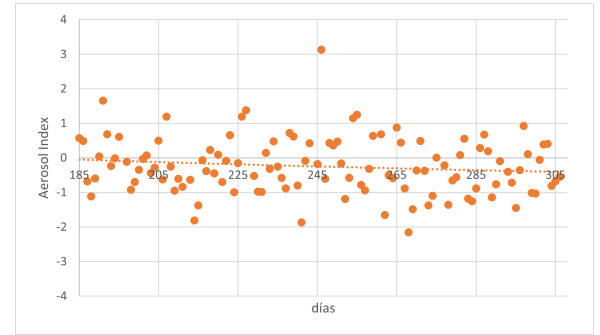


(b)

Figura 59: Medidas del índice de aerosoles recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde septiembre de 2020 hasta diciembre de 2020; la línea de puntos azul muestra un ajuste lineal, de ecuación: $y = -0,0009x - 1,5664$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,002$; b) desde septiembre de 2021 hasta diciembre de 2021; la línea de puntos naranja muestra un ajuste lineal, de ecuación: $y = -0,003x + 0,4894$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,0168$.



(a)



(b)

Figura 60: Medidas del índice de aerosoles recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde septiembre de 2020 hasta diciembre de 2020; la línea de puntos azul muestra un ajuste logarítmico, de ecuación: $y = -0,178\ln(x) - 0,8039$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,0014$; b) desde septiembre de 2021 hasta diciembre de 2021; la línea de puntos naranja muestra un ajuste logarítmico, de ecuación: $y = -0,711\ln(x) + 3,6648$. Con valor R cuadrado: $R^2 = 0,0164$.

A.6. Aerosoles: $\lambda_1 = 354 \text{ nm}$ y $\lambda_2 = 388 \text{ nm}$

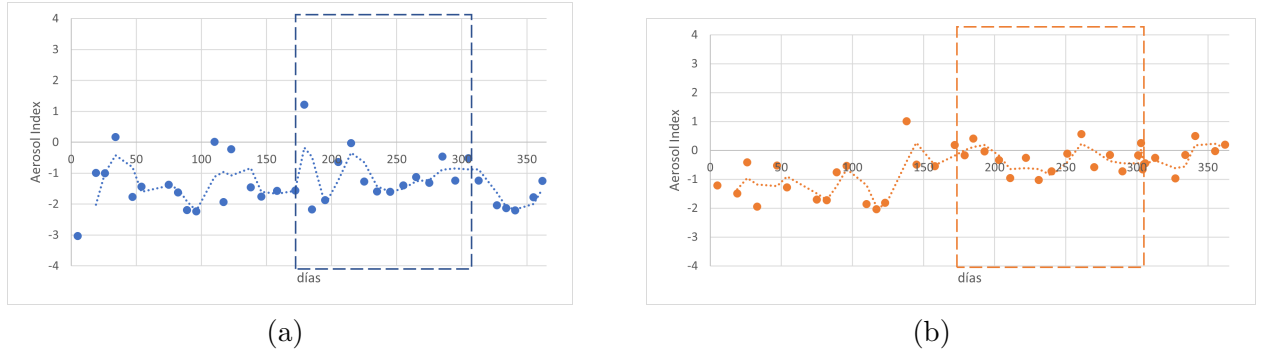


Figura 61: Medidas del índice de aerosoles recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde marzo de 2020 hasta febrero de 2021; superior, detalle de dichas medidas ampliando su escala de representación; la línea de puntos azul muestra un ajuste por medio de su media móvil; b) desde marzo de 2021 hasta febrero de 2022; la línea de puntos naranja muestra un ajuste por medio de su media móvil. La zona recuadrada en ambas figuras coincide con las fechas próximas a la erupción.

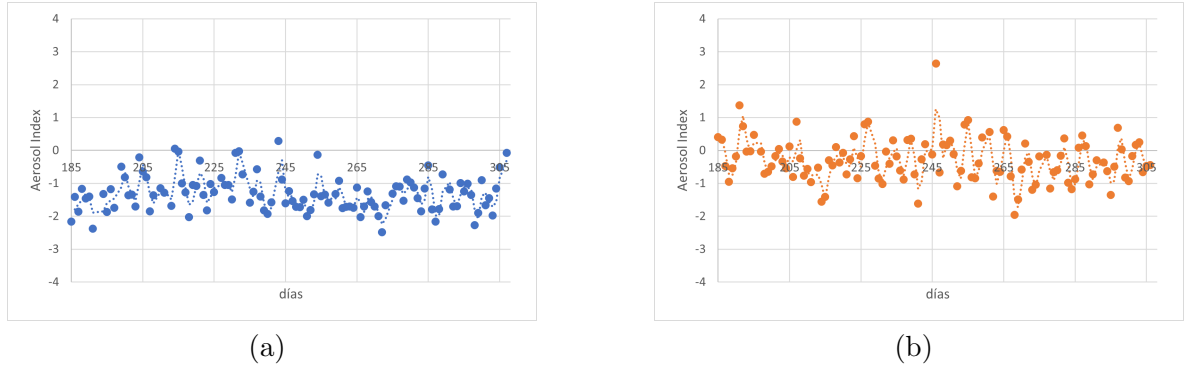


Figura 62: Medidas del índice de aerosoles recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde septiembre de 2020 hasta diciembre de 2020; la línea de puntos azul muestra un ajuste por medio de su media móvil; b) desde septiembre de 2021 hasta diciembre de 2021; la línea de puntos naranja muestra un ajuste por medio de su media móvil.

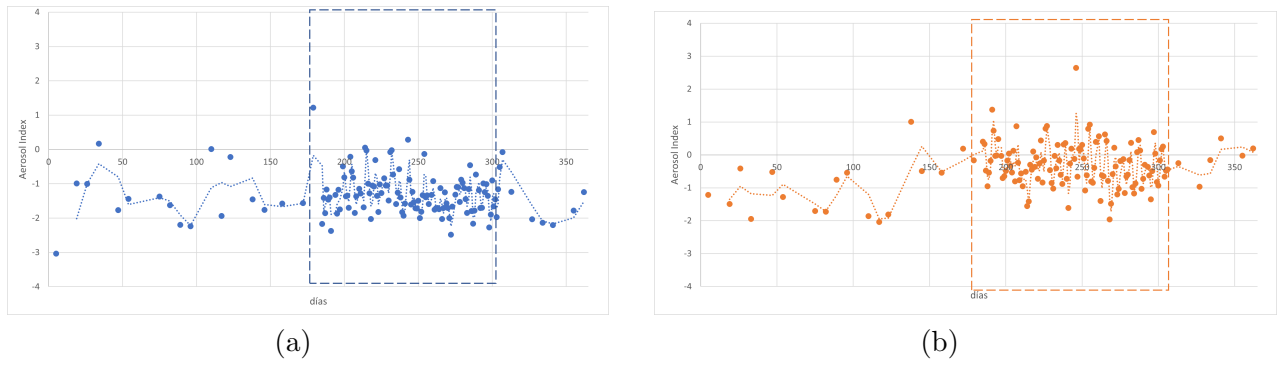


Figura 63: Medidas del índice de aerosoles recogidas por TROPOMI en la localización del volcán de Cumbre Vieja: a) desde marzo de 2020 hasta febrero de 2021; superior, detalle de dichas medidas ampliando su escala de representación; la línea de puntos azul muestra un ajuste por medio de su media móvil; b) desde marzo de 2021 hasta febrero de 2022; la línea de puntos naranja muestra un ajuste por medio de su media móvil. La zona recuadrada en ambas figuras coincide con las fechas próximas a la erupción, dónde la concentración de medidas es mayor.

B. Mapas

B.1. Dióxido de azufre

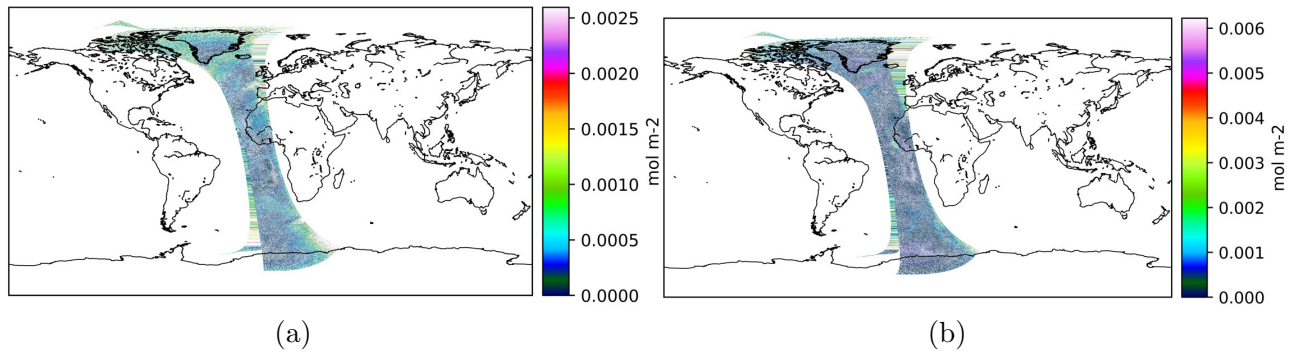


Figura 64: Mapa con los valores de la columna vertical total de SO_2 recogidos por Sentinel-5P para: a) el día 17 de septiembre de 2020; b) el día 19 de septiembre de 2021. Comienzo de la erupción del volcán de Cumbre Vieja.

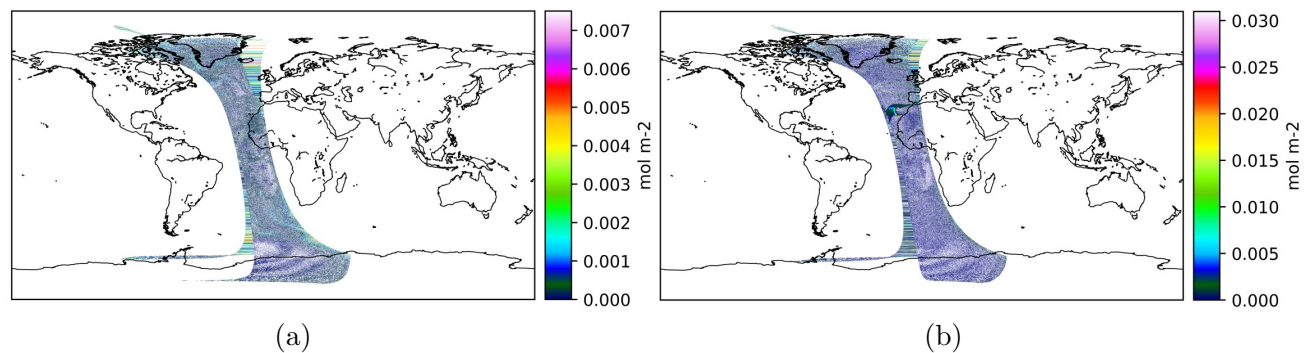


Figura 65: Mapa con los valores de la columna vertical total de SO_2 recogidos por Sentinel-5P para: a) el día 2 de octubre de 2020; b) el día 1 de octubre de 2021. Pico de mayor concentración de SO_2 durante la erupción del volcán de Cumbre Vieja.

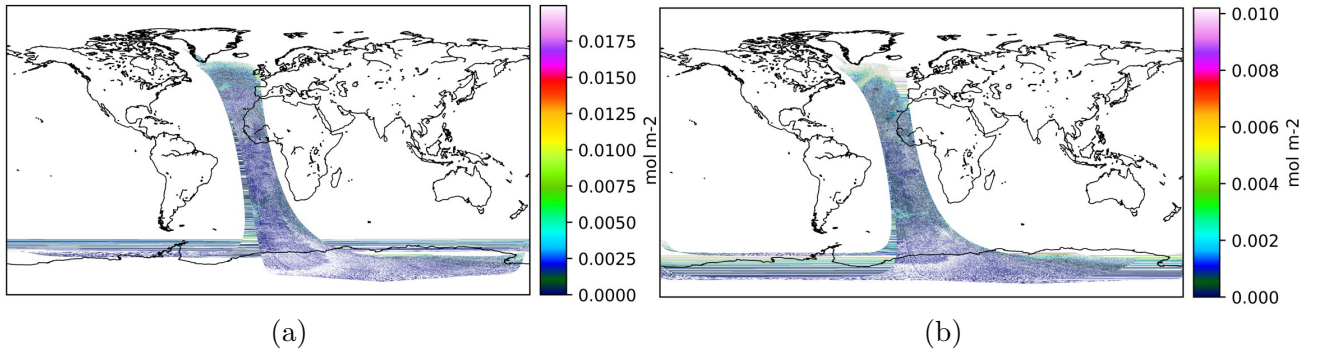


Figura 66: Mapa con los valores de la columna vertical total de SO_2 recogidos por Sentinel-5P para: a) el día 11 de diciembre de 2020; b) el día 13 de diciembre de 2021. Fin de la erupción del volcán de Cumbre Vieja.

B.2. Monóxido de carbono

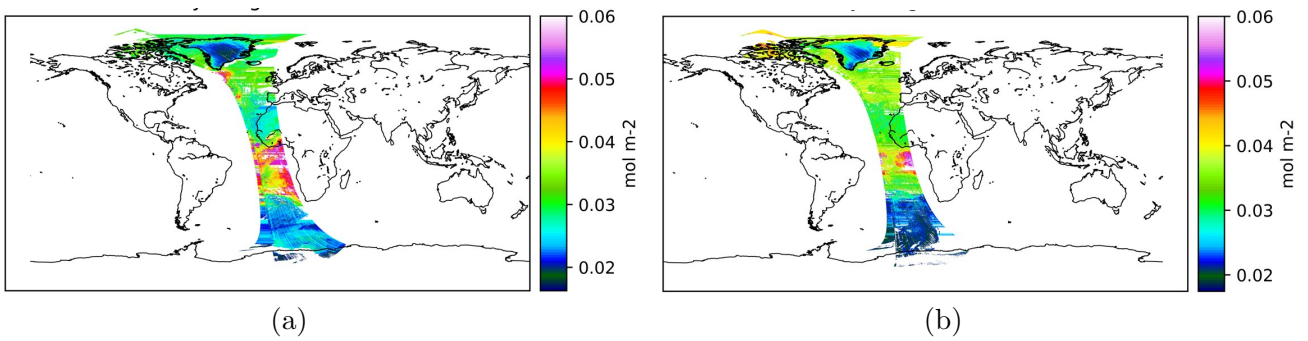


Figura 67: Mapa con los valores de la columna vertical total de CO recogidos por Sentinel-5P para: a) el día 17 de septiembre de 2020; b) el día 19 de septiembre de 2021. Comienzo de la erupción del volcán de Cumbre Vieja.

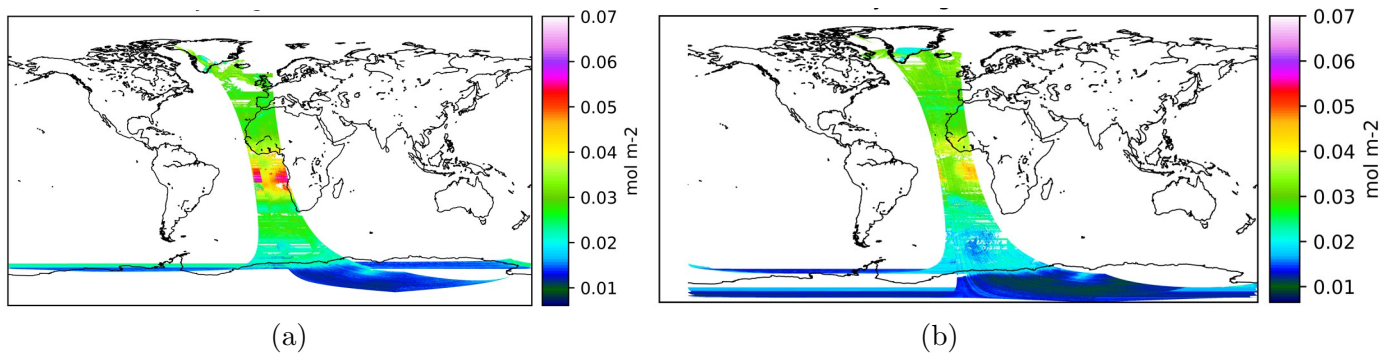


Figura 68: Mapa con los valores de la columna vertical total de CO recogidos por Sentinel-5P para: a) el día 31 de octubre de 2020; b) el día 1 de noviembre de 2021. Pico de mayor concentración de CO durante la erupción del volcán de Cumbre Vieja.

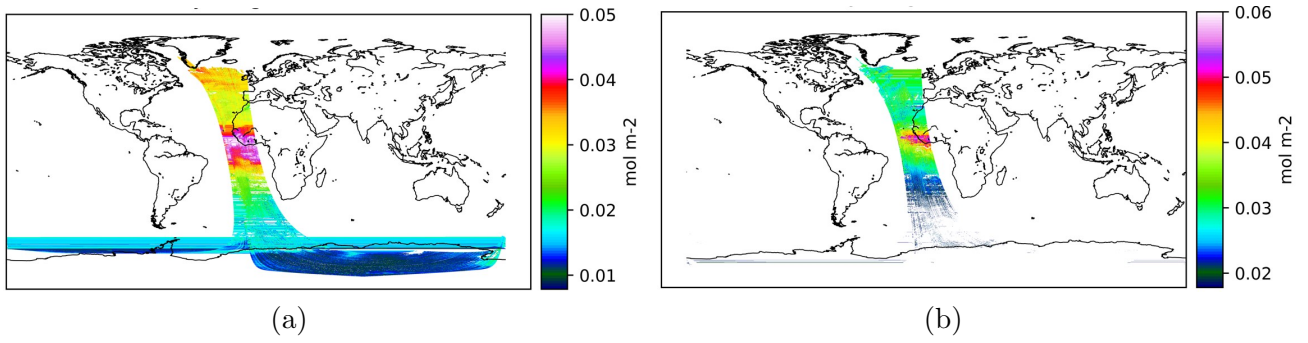


Figura 69: Mapa con los valores de la columna vertical total de CO recogidos por Sentinel-5P para: a) el día 11 de diciembre de 2020; b) el día 13 de diciembre de 2021. Fin de la erupción del volcán de Cumbre Vieja.

B.3. Dióxido de nitrógeno

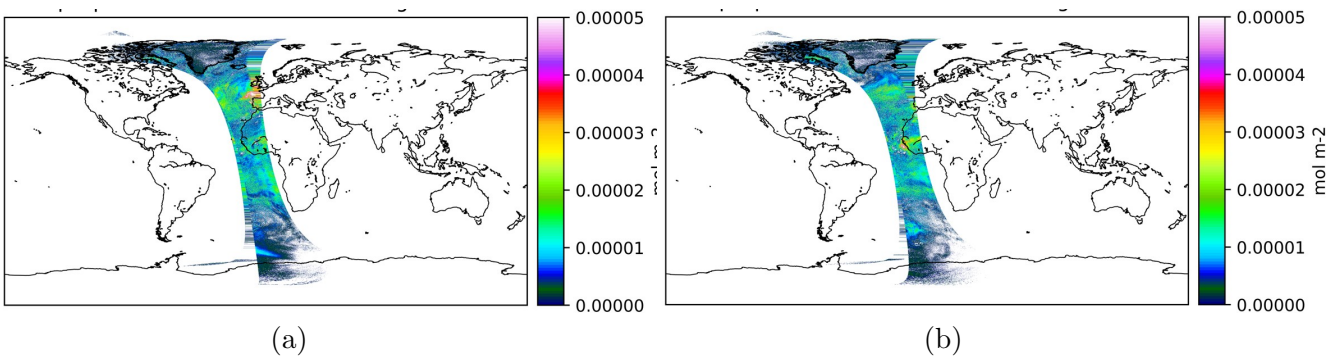


Figura 70: Mapa con los valores de la columna vertical troposférica de NO₂ recogidos por Sentinel-5P para: a) el día 17 de septiembre de 2020; b) el día 19 de septiembre de 2021. Comienzo de la erupción del volcán de Cumbre Vieja.

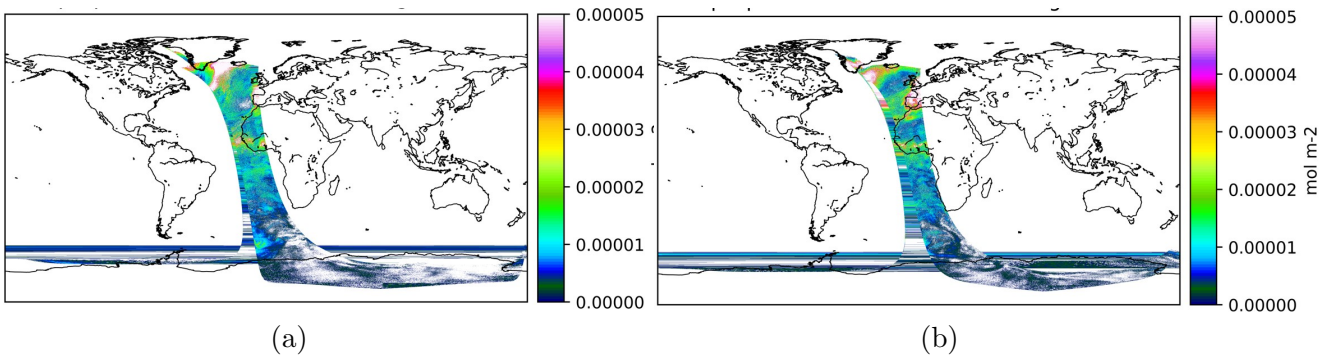


Figura 71: Mapa con los valores de la columna vertical troposférica de NO₂ recogidos por Sentinel-5P para: a) el día 25 de noviembre de 2020; b) el día 24 de noviembre de 2021. Segundo pico de mayor concentración de NO₂ durante la erupción del volcán de Cumbre Vieja ya que las medidas del máximo, día 25 de Noviembre de 2021 han sido de muy baja precisión.

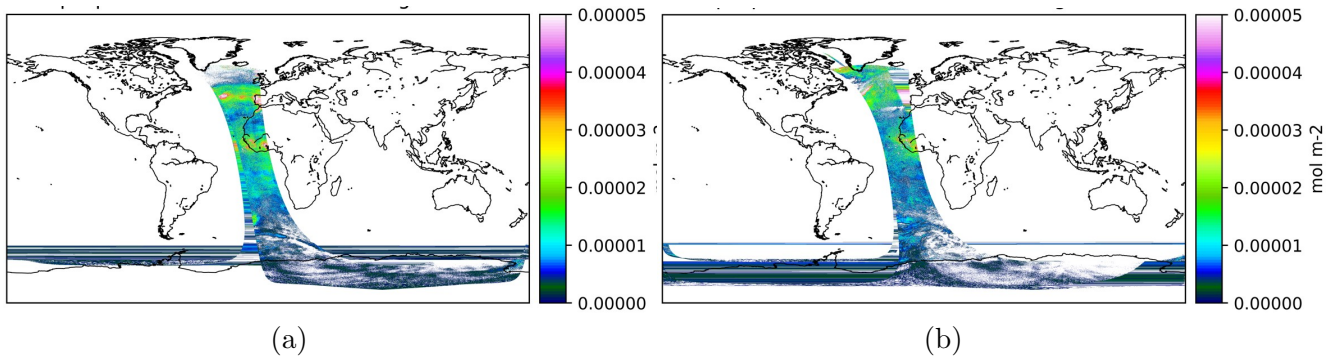


Figura 72: Mapa con los valores de la columna vertical troposférica de NO_2 recogidos por Sentinel-5P para: a) el día 11 de diciembre de 2020; b) el día 13 de diciembre de 2021. Fin de la erupción del volcán de Cumbre Vieja.

B.4. Ozono

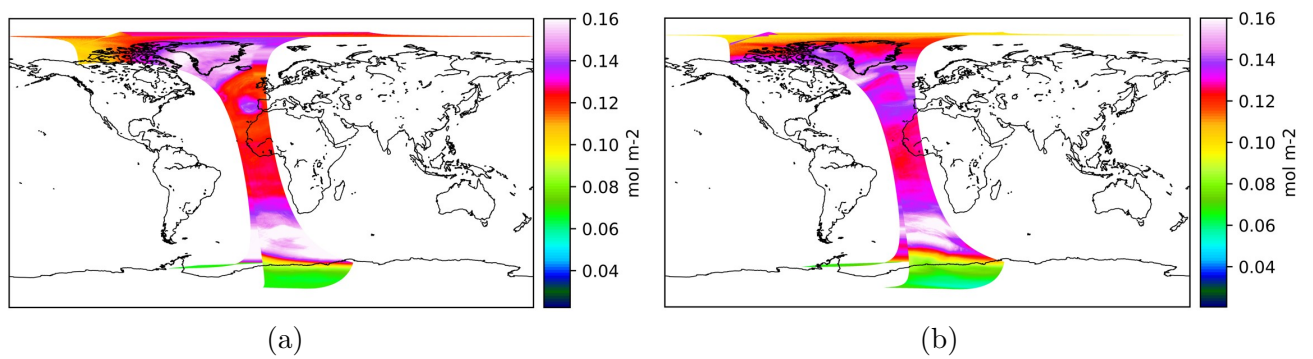


Figura 73: Mapa con los valores de la columna vertical total de O_3 recogidos por Sentinel-5P para: a) el día 17 de septiembre de 2020; b) el día 19 de septiembre de 2021. Comienzo de la erupción del volcán de Cumbre Vieja.

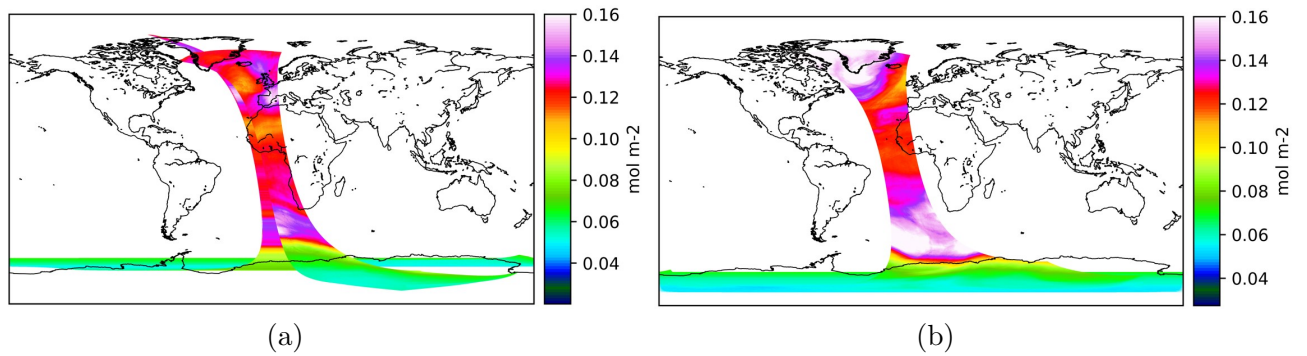


Figura 74: Mapa con los valores de la columna vertical total de O_3 recogidos por Sentinel-5P para: a) el día 26 de octubre de 2020; b) el día 26 de octubre de 2021. Etapa media de la erupción.

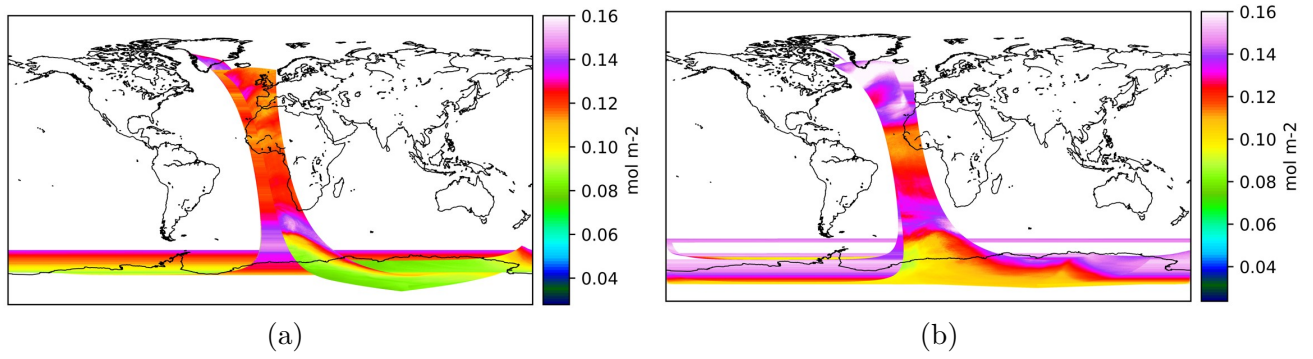


Figura 75: Mapa con los valores de la columna vertical total de O_3 recogidos por Sentinel-5P para: a) el día 11 de diciembre de 2020; b) el día 13 de diciembre de 2021. Fin de la erupción del volcán de Cumbre Vieja.

B.5. Aerosoles: $\lambda_1 = 340 \text{ nm}$ y $\lambda_2 = 380 \text{ nm}$

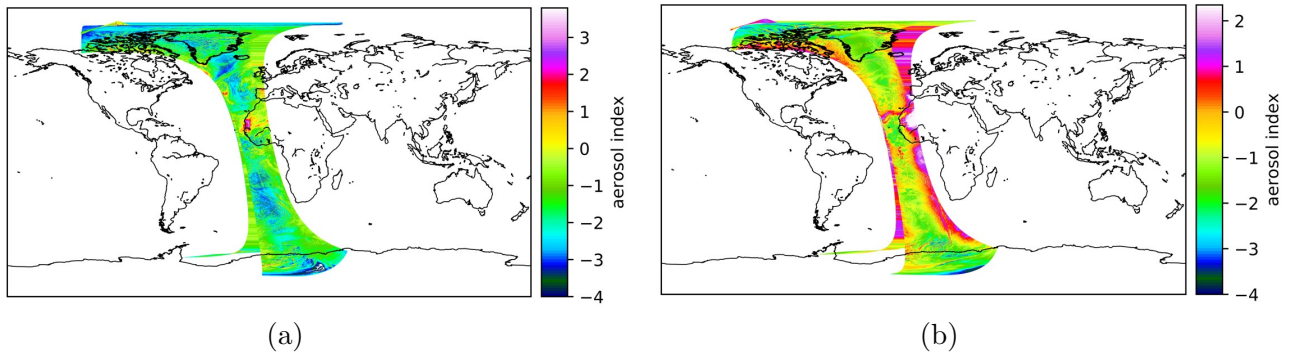


Figura 76: Mapa con los valores del índice de aerosoles recogidos por Sentinel-5P para: a) el día 17 de septiembre de 2020; b) el día 19 de septiembre de 2021. Comienzo de la erupción del volcán de Cumbre Vieja.

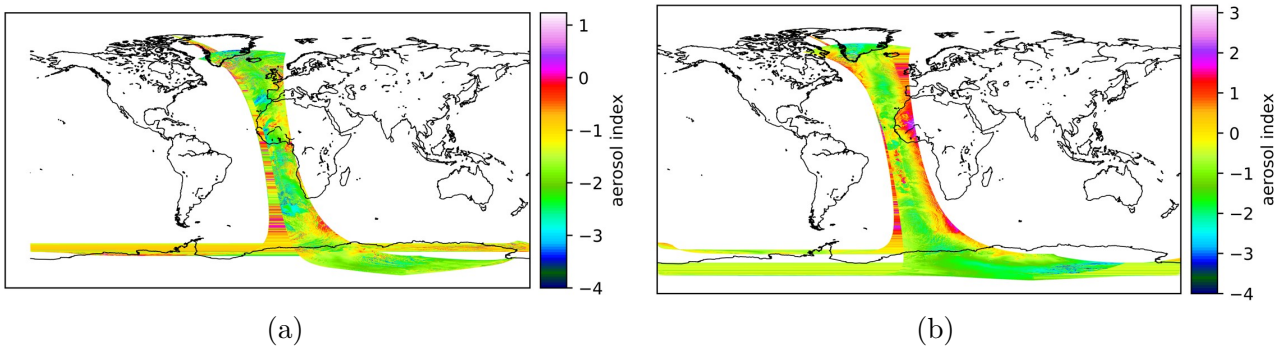


Figura 77: Mapa con los valores del índice de aerosoles recogidos por Sentinel-5P para: a) el día 31 de octubre de 2020; b) el día 1 de noviembre de 2021. Pico de mayor concentración de aerosoles durante la erupción del volcán de Cumbre Vieja.

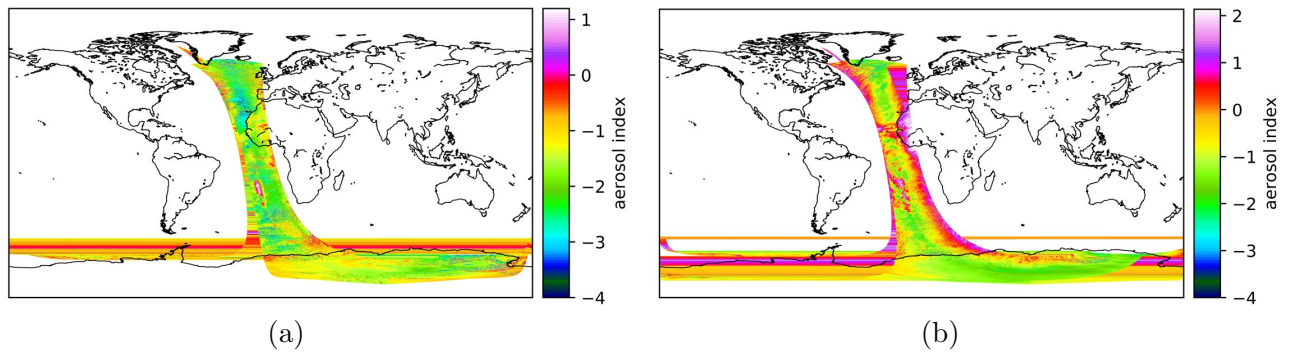


Figura 78: Mapa con los valores del índice de aerosoles recogidos por Sentinel-5P para: a) el día 11 de diciembre de 2020; b) el día 13 de diciembre de 2021. Fin de la erupción del volcán de Cumbre Vieja.

C. Códigos

C.1. Medidas en una localización

```

1 #!/usr/bin/python
2 '''
3 Module: read_tropomi_no2_at_a_location.py
4 =====
5 Disclaimer: The code is for demonstration purposes only. Users are responsible
6           to check for accuracy and revise to fit their objective.
7
8 Author: Justin Roberts-Pierel, 2015
9 Organization: NASA ARSET
10 Purpose: To view info about a variety of SDS from an OMI he5 file both generally
11         and at a specific lat/lon
12
13 Modified by Vikalp Mishra & Pawan Gupta, May 10 2019 to read TROPOMI data
14 =====
15 Modificado por Irene Casta eda D ez , 29/03/2022.
16 =====
17 '''
18 #import necessary modules
19 import numpy as np
20 import sys
21 from numpy import unravel_index
22 from netCDF4 import Dataset
23
24 #This finds the user's current path so that all hdf4 files can be found
25 try:
26     fileList=open('fileList.txt','r')
27 except:
28     print('Did not find a text file containing file names (perhaps name does not
29         match)')
30     sys.exit()
31
32 #loops through all files listed in the text file
33 for FILE_NAME in fileList:
34     FILE_NAME=FILE_NAME.strip()
35     user_input=input('\nWould you like to process\n' + FILE_NAME + '\n\n(Y/N)')
36     if(user_input == 'N' or user_input == 'n'):
37         print('Skipping...')
38         continue
39     else:
40         file = Dataset(FILE_NAME, 'r')

```

```

40 # read the data
41     #latitude_ 28.61
42     #longitude 17.87
43     SDS_NAME=['h', 'm', 'l', 'v']
44     if 'AER_AI' in FILE_NAME:
45
46         print('This is a TROPOMI AI1 file.')
47         #this is how you access the data tree in an hdf5 file
48         SDS_NAME[0]='aerosol_index_340_380'
49         SDS_NAME[1]='aerosol_index_340_380_precision'
50         SDS_NAME[2]='aerosol_index_354_388'
51         SDS_NAME[3]='aerosol_index_354_388_precision'
52
53
54
55     if 'CO' in FILE_NAME:
56
57         print('This is a TROPOMI CO file.')
58         #this is how you access the data tree in an hdf5 file
59         SDS_NAME[0]='carbonmonoxide_total_column'
60         SDS_NAME[1]='carbonmonoxide_total_column_precision'
61         SDS_NAME[2]='qa_value'
62         SDS_NAME[3]='qa_value'
63
64
65     if 'NO2' in FILE_NAME:
66
67         print('This is a TROPOMI NO2 file.')
68         #this is how you access the data tree in an hdf5 file
69         SDS_NAME[0]='nitrogendioxide_tropospheric_column'
70         SDS_NAME[1]='nitrogendioxide_tropospheric_column_precision'
71         SDS_NAME[2]='qa_value'
72         SDS_NAME[3]='qa_value'
73
74     if 'O3' in FILE_NAME:
75
76         print('This is a TROPOMI O3 file.')
77         #this is how you access the data tree in an hdf5 file
78         SDS_NAME[0]='ozone_total_vertical_column'
79         SDS_NAME[1]='ozone_total_vertical_column_precision'
80         SDS_NAME[2]='qa_value'
81         SDS_NAME[3]='qa_value'
82     if 'SO2' in FILE_NAME:
83
84         print('This is a TROPOMI SO2 file.')
85         #this is how you access the data tree in an hdf5 file
86         SDS_NAME[0]='sulfurdioxide_total_vertical_column'
87         SDS_NAME[1]='sulfurdioxide_total_vertical_column_precision'
88         SDS_NAME[2]='qa_value'
89         SDS_NAME[3]='qa_value'
90
91
92
93
94     ds=file
95     grp='PRODUCT'
96     lat= ds.groups[grp].variables['latitude'][0][:][:]
97     lon= ds.groups[grp].variables['longitude'][0][:][:]
98     data0= ds.groups[grp].variables[SDS_NAME[0]]
99     data1= ds.groups[grp].variables[SDS_NAME[1]]
100    data2= ds.groups[grp].variables[SDS_NAME[2]]
101    data3= ds.groups[grp].variables[SDS_NAME[3]]
102
103    #get necessary attributes

```

```

104     fv0=data0._FillValue
105     fv1=data1._FillValue
106     fv2=data2._FillValue
107     fv3=data3._FillValue
108
109     #get lat and lon information
110     min_lat=np.min(lat)
111     max_lat=np.max(lat)
112     min_lon=np.min(lon)
113     max_lon=np.max(lon)
114
115     # set map labels
116     map_label0 = data0.units
117     map_title0 = data0.long_name
118     SDS_NAME[0]=map_title0
119     map_label1 = data1.units
120     map_title1 = data1.long_name
121     SDS_NAME[1]=map_title1
122     map_label2 = data2.units
123     map_title2 = data2.long_name
124     SDS_NAME[2]=map_title2
125     map_label3 = data3.units
126     map_title3 = data3.long_name
127     SDS_NAME[3]=map_title3
128
129     #get the data as an array and mask fill/missing values
130     dataArray0=np.array(data0[0][:][:])
131     dataArray0[dataArray0==fv0]=np.nan
132     data0=dataArray0
133     dataArray1=np.array(data1[0][:][:])
134     dataArray1[dataArray1==fv1]=np.nan
135     data1=dataArray1
136     dataArray2=np.array(data2[0][:][:])
137     dataArray2[dataArray2==fv2]=np.nan
138     data2=dataArray2
139     dataArray3=np.array(data3[0][:][:])
140     dataArray3[dataArray3==fv3]=np.nan
141     data3=dataArray3
142
143
144     #get statistics about data
145     average0=np.nanmean(dataArray0)
146     average1=np.nanmean(dataArray1)
147     average2=np.nanmean(dataArray2)
148     average3=np.nanmean(dataArray3)
149     stdev0=np.nanstd(dataArray0)
150     stdev1=np.nanstd(dataArray1)
151     stdev2=np.nanstd(dataArray2)
152     stdev3=np.nanstd(dataArray3)
153     median0=np.nanmedian(dataArray0)
154     median1=np.nanmedian(dataArray1)
155     median2=np.nanmedian(dataArray2)
156     median3=np.nanmedian(dataArray3)
157     map_label0='mol/cm2'
158     map_label1='mol/cm2'
159     map_label2='mol/cm2'
160     map_label3='mol/cm2'
161
162
163     user_lat=28.61
164     user_lon=-17.87
165     #calculation to find nearest point in data to entered location (
haversine formula)
166     R=6371000#radius of the earth in meters

```

```

167     lat1=np.radians(user_lat)
168     lat2=np.radians(lat)
169     delta_lat=np.radians(lat-user_lat)
170     delta_lon=np.radians(lon-user_lon)
171     a=(np.sin(delta_lat/2))*(np.sin(delta_lat/2))+(np.cos(lat1))*(np.cos(
lat2))*(np.sin(delta_lon/2))*(np.sin(delta_lon/2))
172     c=2*np.arctan2(np.sqrt(a),np.sqrt(1-a))
173     d=R*c
174     #gets (and then prints) the x,y location of the nearest point in data to
entered location, accounting for no data values
175     x0,y0=np.unravel_index(d.argmin(),d.shape)
176     x1,y1=np.unravel_index(d.argmin(),d.shape)
177     x2,y2=np.unravel_index(d.argmin(),d.shape)
178     x3,y3=np.unravel_index(d.argmin(),d.shape)
179
180     #calculates mean, median, stdev in a 3x3 grid around nearest point to
entered location
181     if x0 < 1:
182         x0+=1
183     if x0 > dataArray0.shape[0]-2:
184         x0-=2
185     if y0 < 1:
186         y0+=1
187     if y0 > dataArray0.shape[1]-2:
188         y0-=2
189     three_by_three0=dataArray0[x0-1:x0+2,y0-1:y0+2]
190     three_by_three0=three_by_three0.astype(float)
191     three_by_three0[three_by_three0==float(fv0)]=np.nan
192     nnan0=np.count_nonzero(~np.isnan(three_by_three0))
193     if nnan0 == 0:
194         print ('There are no valid pixels in a 3x3 grid centered at your
entered location.')
195     else:
196         three_by_three_average0=np.nanmean(three_by_three0)
197         three_by_three_std0=np.nanstd(three_by_three0)
198         three_by_three_median0=np.nanmedian(three_by_three0)
199         if nnan0 == 1:
200             npixels0='is'
201             mpixels0='pixel'
202         else:
203             npixels0='are'
204             mpixels0='pixels'
205         print('There',npixels0,nnan0,'valid',mpixels0,'in a 3x3 grid
centered at your entered location.')
206         print('The average value in this grid is: ', '{:.2e}'.format(
three_by_three_average0), '\nThe median value in this grid is: ', '{:.2e}'.
format(three_by_three_median0), '\nThe standard deviation in this grid is: ',
'{:.2e}'.format(three_by_three_std0))
207     #1
208     if x1 < 1:
209         x1+=1
210     if x1 > dataArray1.shape[0]-2:
211         x1-=2
212     if y1 < 1:
213         y1+=1
214     if y1 > dataArray1.shape[1]-2:
215         y1-=2
216     three_by_three1=dataArray1[x1-1:x1+2,y1-1:y1+2]
217     three_by_three1=three_by_three1.astype(float)
218     three_by_three1[three_by_three1==float(fv1)]=np.nan
219     nnan1=np.count_nonzero(~np.isnan(three_by_three1))
220     if nnan1 == 0:
221         print ('There are no valid pixels in a 3x3 grid centered at your
entered location.')

```

```

222     else:
223         three_by_three_average1=np.nanmean(three_by_three1)
224         three_by_three_std1=np.nanstd(three_by_three1)
225         three_by_three_median1=np.nanmedian(three_by_three1)
226         if nnan1 == 1:
227             npixels1='is'
228             mpixels1='pixel'
229         else:
230             npixels1='are'
231             mpixels1='pixels'
232         print('There',npixels1,nnan1,'valid',mpixels1,'in a 3x3 grid
233         centered at your entered location.')
234         print('The average value in this grid is: ', '{:.2e}'.format(
235         three_by_three_average1), ' \nThe median value in this grid is: ', '{:.2e}'.
236         format(three_by_three_median1), '\nThe standard deviation in this grid is: ',
237         '{:.2e}'.format(three_by_three_std1))
238
239     #2
240     if x2 < 1:
241         x2+=1
242     if x2 > dataArray2.shape[0]-2:
243         x2-=2
244     if y2 < 1:
245         y2+=1
246     if y2 > dataArray0.shape[1]-2:
247         y2-=2
248     three_by_three2=dataArray2[x2-1:x2+2,y2-1:y2+2]
249     three_by_three2=three_by_three2.astype(float)
250     three_by_three2[three_by_three2==float(fv2)]=np.nan
251     nnan2=np.count_nonzero(~np.isnan(three_by_three2))
252     if nnan2 == 0:
253         print ('There are no valid pixels in a 3x3 grid centered at your
254         entered location.')
255     else:
256         three_by_three_average2=np.nanmean(three_by_three2)
257         three_by_three_std2=np.nanstd(three_by_three2)
258         three_by_three_median2=np.nanmedian(three_by_three2)
259         if nnan2 == 1:
260             npixels2='is'
261             mpixels2='pixel'
262         else:
263             npixels2='are'
264             mpixels2='pixels'
265         print('There',npixels2,nnan2,'valid',mpixels2,'in a 3x3 grid
266         centered at your entered location.')
267         print('The average value in this grid is: ', '{:.2e}'.format(
268         three_by_three_average2), ' \nThe median value in this grid is: ', '{:.2e}'.
269         format(three_by_three_median2), '\nThe standard deviation in this grid is: ',
270         '{:.2e}'.format(three_by_three_std2))
271
272     #3
273     if x3 < 1:
274         x3+=1
275     if x3 > dataArray3.shape[0]-2:
276         x3-=2
277     if y3 < 1:
278         y3+=1
279     if y3 > dataArray3.shape[1]-2:
280         y3-=2
281     three_by_three3=dataArray3[x3-1:x3+2,y3-1:y3+2]
282     three_by_three3=three_by_three3.astype(float)
283     three_by_three3[three_by_three3==float(fv3)]=np.nan
284     nnan3=np.count_nonzero(~np.isnan(three_by_three3))
285     if nnan3== 0:
286         print ('There are no valid pixels in a 3x3 grid centered at your

```

```

entered location.')
```

```

277     else:
278         three_by_three_average3=np.nanmean(three_by_three3)
279         three_by_three_std3=np.nanstd(three_by_three3)
280         three_by_three_median3=np.nanmedian(three_by_three3)
281         if nnan3 == 1:
282             npixels3='is'
283             mpixels3='pixel'
284         else:
285             npixels3='are'
286             mpixels3='pixels'
287         print('There',npixels3,nnan3,'valid',mpixels3,'in a 3x3 grid
centered at your entered location.')
```

```

288         print('The average value in this grid is: ', '{:.2e}'.format(
three_by_three_average3), ' \nThe median value in this grid is: ', '{:.2e}'.
format(three_by_three_median3), '\nThe standard deviation in this grid is: ',
'{:.2e}'.format(three_by_three_std3))
```

```

289
290
291     #calculates mean, median, stdev in a 5x5 grid around nearest point to
entered location
```

```

292     if x0 < 2:
293         x0+=1
294     if x0 > dataArray0.shape[0]-3:
295         x0-=1
296     if y0 < 2:
297         y0+=1
298     if y0 > dataArray0.shape[1]-3:
299         y0-=1
300     five_by_five0=dataArray0[x0-2:x0+3,y0-2:y0+3]
301     five_by_five0=five_by_five0.astype(float)
302     five_by_five0[five_by_five0==float(fv0)]=np.nan
303     nnan0=np.count_nonzero(~np.isnan(five_by_five0))
304     if nnan0 == 0:
305         print ('There are no valid pixels in a 5x5 grid centered at your
entered location. \n')
```

```

306         five_by_five_average0=0
307         five_by_five_std0=0
308         five_by_five_median0=0
309     else:
310         five_by_five_average0=np.nanmean(five_by_five0)
311         five_by_five_std0=np.nanstd(five_by_five0)
312         five_by_five_median0=np.nanmedian(five_by_five0)
313         if nnan0 == 1:
314             npixels0='is'
315             mpixels0='pixel'
316         else:
317             npixels0='are'
318             mpixels0='pixels'
319         print('\nThere',npixels0,nnan0,' valid',mpixels0,' in a 5x5 grid
centered at your entered location. \n')
```

```

320         print('The average value in this grid is: ', '{:.2e}'.format(
five_by_five_average0), ' \nThe median value in this grid is: ', '{:.2e}'.
format(five_by_five_median0), '\nThe standard deviation in this grid is: ',
'{:.2e}'.format(five_by_five_std0))
```

```

321     #1
322     if x1 < 2:
323         x1+=1
324     if x1 > dataArray1.shape[0]-3:
325         x1-=1
326     if y1 < 2:
327         y1+=1
328     if y1 > dataArray1.shape[1]-3:
329         y1-=1
```

```

330     five_by_five1=dataArray1[x1-2:x1+3,y1-2:y1+3]
331     five_by_five1=five_by_five1.astype(float)
332     five_by_five1[five_by_five1==float(fv1)]=np.nan
333     nnan1=np.count_nonzero(~np.isnan(five_by_five1))
334     if nnan1 == 0:
335         print ('There are no valid pixels in a 5x5 grid centered at your
entered location. \n')
336         five_by_five_average1=0
337         five_by_five_std2=0
338         five_by_five_median3=0
339     else:
340         five_by_five_average1=np.nanmean(five_by_five1)
341         five_by_five_std1=np.nanstd(five_by_five1)
342         five_by_five_median1=np.nanmedian(five_by_five1)
343         if nnan1 == 1:
344             npixels1='is'
345             mpixels1='pixel'
346         else:
347             npixels1='are'
348             mpixels1='pixels'
349         print('\nThere',npixels1,nnan1,' valid',mpixels1,' in a 5x5 grid
centered at your entered location. \n')
350         print('The average value in this grid is: ', '{:.2e}'.format(
five_by_five_average1), ' \nThe median value in this grid is: ', '{:.2e}'.
format(five_by_five_median1), '\nThe standard deviation in this grid is: ',
'{:.2e}'.format(five_by_five_std1))
351
352     #2
353     if x2 < 2:
354         x2+=1
355     if x2 > dataArray2.shape[0]-3:
356         x2-=1
357     if y2 < 2:
358         y2+=1
359     if y2 > dataArray2.shape[1]-3:
360         y2-=1
361     five_by_five2=dataArray2[x2-2:x2+3,y2-2:y2+3]
362     five_by_five2=five_by_five2.astype(float)
363     five_by_five2[five_by_five2==float(fv2)]=np.nan
364     nnan2=np.count_nonzero(~np.isnan(five_by_five2))
365     if nnan2 == 0:
366         print ('There are no valid pixels in a 5x5 grid centered at your
entered location. \n')
367     else:
368         five_by_five_average2=np.nanmean(five_by_five2)
369         five_by_five_std2=np.nanstd(five_by_five2)
370         five_by_five_median2=np.nanmedian(five_by_five2)
371         if nnan2 == 1:
372             npixels2='is'
373             mpixels2='pixel'
374         else:
375             npixels2='are'
376             mpixels2='pixels'
377         print('\nThere',npixels2,nnan2,' valid',mpixels2,' in a 5x5 grid
centered at your entered location. \n')
378         print('The average value in this grid is: ', '{:.2e}'.format(
five_by_five_average2), ' \nThe median value in this grid is: ', '{:.2e}'.
format(five_by_five_median2), '\nThe standard deviation in this grid is: ',
'{:.2e}'.format(five_by_five_std2))
379
380     #3
381     if x3 < 2:
382         x3+=1
383     if x3 > dataArray3.shape[0]-3:
384         x3-=1

```

```

384         if y3 < 2:
385             y3+=1
386         if y3 > dataArray3.shape[1]-3:
387             y3-=1
388         five_by_five3=dataArray3[x3-2:x3+3,y3-2:y3+3]
389         five_by_five3=five_by_five3.astype(float)
390         five_by_five3[five_by_five3==float(fv3)]=np.nan
391         nnan3=np.count_nonzero(~np.isnan(five_by_five3))
392         if nnan3 == 0:
393             print ('There are no valid pixels in a 5x5 grid centered at your
entered location. \n')
394
395         else:
396             five_by_five_average3=np.nanmean(five_by_five3)
397             five_by_five_std3=np.nanstd(five_by_five3)
398             five_by_five_median3=np.nanmedian(five_by_five3)
399             if nnan3 == 1:
400                 npixels3='is'
401                 mpixels3='pixel'
402             else:
403                 npixels3='are'
404                 mpixels3='pixels'
405             print('\nThere',npixels3,nnan3,' valid',mpixels3,' in a 5x5 grid
centered at your entered location. \n')
406             print('The average value in this grid is: ', '{:.2e}'.format(
five_by_five_average3), ' \nThe median value in this grid is: ', '{:.2e}'.
format(five_by_five_median3), '\nThe standard deviation in this grid is: ',
'{:.2e}'.format(five_by_five_std3))
407             # print('The average value in this grid is: ',round(
five_by_five_average,3), ' \nThe median value in this grid is: ',round(
five_by_five_median,3), '\nThe standard deviation in this grid is: ',round(
five_by_five_std,3))
408
409
410             with open('values', 'a+') as f:
411                 f.write(f'{three_by_three_average0} {three_by_three_average1} {
three_by_three_average2} {three_by_three_average3} {five_by_five_average0} {
five_by_five_average1} {five_by_five_average2} {five_by_five_average3}\n')

```

C.2. Maps

```

1  #!/usr/bin/python
2  '''
3  Module: read_and_map_tropomi_no2.py
4  =====
5  Disclaimer: The code is for demonstration purposes only. Users are responsible
to check for accuracy and revise to fit their objective.
6
7  Author: Justin Roberts-Pierel, 2015
8  Organization: NASA ARSET
9  Purpose: To extract No2 or SO2 data from an OMI HDF5 file and create a map of
the resulting data
10
11  See the README associated with this module for more information.
12  Modified by Vikalp Mishra & Pawan Gupta, May 10 2019 to read TROPOMI data
13  =====
14  Modificado por Irene Casta eda D ez , 29/03/2022.
15  =====
16  '''
17  import numpy as np
18  from mpl_toolkits.basemap import Basemap
19  import matplotlib.pyplot as plt
20  import sys
21  from netCDF4 import Dataset
22

```

```

23 #This finds the user's current path so that all hdf4 files can be found
24 try:
25     fileList=open('fileList.txt','r')
26 except:
27     print('Did not find a text file containing file names (perhaps name does not
28         match)')
29     sys.exit()
30 #loops through all files listed in the text file
31 for FILE_NAME in fileList:
32     FILE_NAME=FILE_NAME.strip()
33     user_input=input('\nWould you like to process\n' + FILE_NAME + '\n\n(Y/N)')
34     if(user_input == 'N' or user_input == 'n'):
35         print('Skipping...')
36         continue
37     else:
38         file = Dataset(FILE_NAME, 'r')
39 # read the data
40     ds=file
41     grp='PRODUCT'
42     lat= ds.groups[grp].variables['latitude'][0][:][:]
43     lon= ds.groups[grp].variables['longitude'][0][:][:]
44     if 'AER_AI' in FILE_NAME:
45         sds_name='aerosol_index_340_380'
46         map_label='aerosol index'
47     if 'CH4' in FILE_NAME:
48         sds_name='methane_mixing_ratio_bias_corrected'
49         map_label='1e-9'
50     if 'CO' in FILE_NAME:
51         sds_name='carbonmonoxide_total_column'
52         map_label='mol m-2'
53     if 'NO2' in FILE_NAME:
54         sds_name='nitrogendioxide_tropospheric_column'
55         map_label='mol m-2'
56     if 'O3' in FILE_NAME:
57         sds_name='ozone_total_vertical_column'
58         map_label='mol m-2'
59     if 'SO2' in FILE_NAME:
60         sds_name='sulfurdioxide_total_vertical_column'
61         map_label='mol m-2'
62     data= ds.groups[grp].variables[sds_name]
63
64     #get necessary attributes
65     fv=data._FillValue
66
67     #get lat and lon information
68     min_lat=np.min(lat)
69     max_lat=np.max(lat)
70     min_lon=np.min(lon)
71     max_lon=np.max(lon)
72
73     # set map labels
74     # map_label = data.units
75     map_title = data.long_name
76     print(data.units)
77
78     #get the data as an array and mask fill/missing values
79     dataArray=np.array(data[0][:][:])
80     dataArray[dataArray==fv]=np.nan
81     data=dataArray
82     # data=data.reshape(xdim,ydim)
83
84
85     #get statistics about data

```

```

86     average=np.nanmean(dataArray)
87     stdev=np.nanstd(dataArray)
88     median=np.nanmedian(dataArray)
89     # map_label='mol/cm2'
90
91     #print statistics
92 #     print('The average of this data is: ',round(average,3),'\nThe standard
deviation is: ',round(stdev,3),'\nThe median is: ',round(median,3))
93     print('The average of this data is: ', '{:.2e}'.format(average), '\nThe
standard deviation is: ', '{:.2e}'.format(stdev), '\nThe median is: ', '{:.2e}'
.format(median))
94     print('The range of latitude in this file is: ',min_lat,' to ',max_lat,
'degrees \nThe range of longitude in this file is: ',min_lon, ' to ',max_lon
,' degrees')
95     is_map=input('\nWould you like to create a map of this data? Please
enter Y or N \n')
96
97     #if user would like a map, view it
98     if is_map == 'Y' or is_map == 'y':
99         data = np.ma.masked_array(data, np.isnan(data))
100         m = Basemap(projection='cyl', resolution='l',
101                     llcrnrlat=-90, urcrnrlat = 90,
102                     llcrnrlon=-180, urcrnrlon = 180)
103         m.drawcoastlines(linewidth=0.5)
104         #m.drawparallels(np.arange(-90., 120., 30.), labels=[1, 0, 0, 0])
105         #m.drawmeridians(np.arange(-180, 180., 45.), labels=[0, 0, 0, 1])
106         my_cmap = plt.cm.get_cmap('gist_ncar', 100)#rainbow#gist_ncar#
nipy_spectral
107         my_cmap.set_under('w')
108         vmin1=0.16
109         vmax1=-3
110
111         if 'AER_AI' in FILE_NAME:
112             vmin1=-4
113             vmax1=0.5
114         m.pcolormesh(lon, lat, data, latlon=True, vmin=vmin1, vmax=np.nanmax
(data)*vmax1, cmap=my_cmap)
115         cb = m.colorbar()
116         cb.set_label(map_label)
117         plt.autoscale()
118         #title the plot
119         plt.title('{0}\n {1}'.format(FILE_NAME, map_title))
120         fig = plt.gcf()
121         # Show the plot window.
122         plt.show()
123         #once you close the map it asks if you'd like to save it
124         is_save=str(input('\nWould you like to save this map? Please enter Y
or N \n'))
125         if is_save == 'Y' or is_save == 'y':
126             #saves as a png if the user would like
127             pngfile = '{0}.png'.format(FILE_NAME[:-3])
128             fig.savefig(pngfile, dpi = 1000, bbox_inches='tight')
129
130         #close the hdf5 file
131         file.close()

```