



Trabajo de fin de grado - Curso 2020/ 2021

Contaminación atmosférica en la Península Ibérica medida con Sentinel-5P

Autor/a: ELENA MARTÍNEZ MATEO

Tutor/a: ANA BELEN RUESCAS ORIENT

VNIVERSITAT
D VALÈNCIA 

Grado en Geografía y Medio Ambiente

Facultat de Geografia i Història

Índice general

1. Introducción	5
1.1. La contaminación atmosférica.¿Qué es?	5
1.2. Los principales contaminantes atmosféricos y sus efectos	10
1.3. Impacto ambiental. Planes de vigilancia y medidas correctoras.	14
1.4. Objetivo principal del trabajo	18
2. Datos y Métodos	19
2.1. Satélite Sentinel - 5P	19
2.2. Metodología aplicada	23
2.2.1. Análisis de los datos Sentinel-5p utilizando xarray.	24
2.2.2. Procesamiento multi-temporal Sentinel-5P (HARP+XARRAY)	27

3. Resultados	29
3.1. Dióxido de nitrógeno.	29
3.2. Monóxido de carbono.	31
4. Discusión	32
5. Conclusión	35
Bibliografía	37

Resumen.

Este estudio está basado en el análisis de la contaminación atmosférica sobre la Península Ibérica mediante el uso de técnicas de teledetección. La metodología utilizada ha sido el procesamiento de imágenes tomadas por el satélite Sentinel-5P, sensor TROPOMI, mediante código en Python. En el trabajo hemos generado la cartografía del monóxido de carbono y de dióxido de nitrógeno para el mes de marzo de los años 2019 y 2020. Durante el mes de marzo de 2020, la contaminación atmosférica se vio reducida debido a las duras restricciones que vivió la población debido al COVID-19, por lo que vemos la importancia de realizar este tipo de estudios para conocer el comportamiento de la atmósfera y el efecto de las acciones antrópicas sobre estas, y así tratar de tomar medidas para controlar el cambio climático.

Palabras clave: Contaminación atmosférica, CO, NO₂, Península Ibérica, Sentinel-5P, TROPOMI

Abstract

This study is based on the analysis of air pollution over the Iberian Peninsula through the use of remote sensing techniques. The methodology used has been the processing of images taken by the Sentinel-5P satellite, TROPOMI sensor, using Python code. We have generated the carbon monoxide and nitrogen dioxide cartography for the month of March of the years 2019 and 2020. During the month of March 2020, air pollution was reduced due to the harsh lockdown that the population suffered due to COVID-19, so we see the importance of carrying out this type of studies to know the behavior of the atmosphere and the effect of anthropic actions on it, and thus try to take measures to control climate change

Keywords: Air pollution, CO, NO₂, Iberian Peninsula, Python, Sentinel-5P, TROPOMI

Introducción

1.1. La contaminación atmosférica.¿Qué es?

Cuando analizamos el concepto de contaminación atmosférica, podemos encontrar distintas definiciones, pero todas tienen en común el hecho de que están referidas a la presencia de gases contaminantes (o nocivos) en la atmósfera, al superar un límite establecido puede llegar a ser nocivo para la población.

En la legislación española, podemos encontrarla definida en la ley 38/1972 (actualmente derogada) como la presencia en el aire de materia o formas de energía que impliquen riesgo, daño o molestia grave para las personas y bienes de cualquier naturaleza (BOE-A-1972-1885, actualmente derogada por la Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera).

Actualmente, la contaminación es un problema generalizado, pero que está agravado en las grandes ciudades a causa de tres grandes causantes: la industria, las calefacciones y el tráfico (debido al uso de combustibles fósiles, como carbón o petróleo), siendo la combustión resultado de los contaminantes primarios. [Park et.al., 2021]

Si analizamos el caso de las emisiones del hemisferio norte, podemos ver como son muchos los artículos que nos muestran que sus emisiones son mayores, ya que es en este hemisferio donde se recoge una mayor actividad industrial y contaminante que en el hemisferio sur. Además, si comparamos el caso de las ciudades asiáticas y las ciudades europeas y norteamericanas, podemos ver como tienen una mayor concentración de dióxido de nitrógeno por dióxido de carbono [Park et.al., 2021].

Para poder entender este fenómeno, primero debemos comprender qué es la atmósfera, la cual está diferenciada en diferentes capas gaseosas que soportan el peso de las capas que están por encima (Figura 1.1). Según aumentamos la altura de las capas, vemos como esta fuerza, conocida como presión atmosférica, va disminuyendo. Se diferencian según su temperatura y la altura en [Martinez-Ataz & Diaz de Mera Morales, 2004]:

- **Troposfera:** más próxima a la Tierra. Es la capa donde se encuentra el aire que respiramos y donde los fenómenos meteorológicos tienen lugar. Es la capa más dinámica, ya que siempre está en movimiento. Por tanto, vemos como es donde el mayor número de fenómenos atmosféricos contaminantes se producen, por lo que la vida de las personas se ve directamente afectada. Con la altura, la temperatura desciende. Tiene su límite en la tropopausa.
 - **Altura:** Tiene una altura de 10 km en los polos, pero alcanza los 18 km en la zona ecuatorial.
 - **Gases que la componen:** Esta formada por oxígeno (78 %), nitrógeno (20 %), argón (0.03 %), vapor de agua (0.01 %) y otros gases.

- **Estratosfera:** es la segunda capa más cercana a la superficie terrestre, y se caracteriza por la ausencia de corrientes verticales y la escasa concentración de vapor de agua, además de encontrarse la mayor parte del ozono atmosférico (es por esto por lo que también se la conoce por capa de ozono u ozonósfera).
 - **Altura:** Se extiende desde los 15 km hasta los 40 km de altura.
 - **Gases que la componen:** Ozono.

- Mesosfera: es la siguiente capa, y no tiene grandes características que la diferencien o que la hagan destacar. La temperatura desciende hasta los $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$
 - Altura: Alcanza los 80 km de altura.
 - Gases que la componen: Esta compuesta por oxígeno (principalmente), dióxido de carbono y nitrógeno. Tiene una proporción casi igual que la de la troposfera.
- Termosfera: en esta capa, la temperatura se eleva rápidamente, llegando a los $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ en apenas 500 km de altura. Este aumento tan brusco es producido por la absorción de la radiación solar más energética y a la baja densidad de la atmósfera a elevadas altitudes.
 - Altura: Alcanza los 640 km de altura.
 - Gases que la componen: Formada prácticamente por iones.

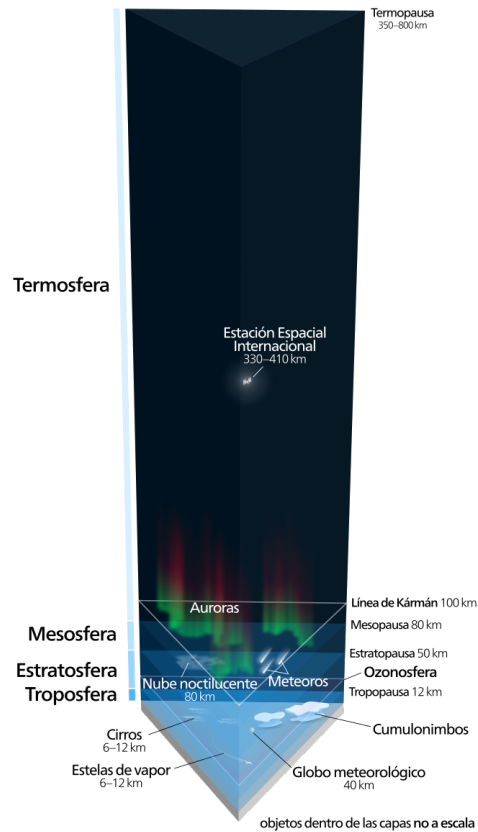


Figura 1.1: Modelo de las capas atmosféricas. *Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license*.

Son estas características las que hacen de la atmósfera un elemento imprescindible en nuestra vidas, ya que sin ella, nuestra existencia no se daría, ya que los gases que la conforman son vitales para la vida, para la respiración y fotosíntesis de los seres vivos, tiene una función reguladora de la temperatura terrestre al no dejar que los rayos incidan directamente sobre la tierra y no dejar que el calor escape. Además, al actuar como un filtro para los rayos solares, consigue que las radiaciones nocivas para la Tierra no alcancen la superficie.

La troposfera es la capa atmosférica en la que se dan lugar la mayor parte de procesos de oxidación de las sustancias presentes (N , O_2). Esta oxidación se produce debido a la presencia del óxido de nitrógeno (NO) y la radiación solar, y da como resultado el ozono (O_3). Es por este motivo por lo que analizar los

fenómenos atmosféricos es muy importante, y por lo que han aparecido los modelos para la simulación de la posible contaminación atmosférica. Estos modelos relacionan las emisiones de contaminantes con las concentraciones recogidas por los instrumentos que recogen la contaminación mediante el uso de algoritmos matemáticos [Martinez-Ataz & Diaz de Mera Morales, 2004].

Los principales contaminantes que podemos encontrar en la troposfera son el ozono (O_3), el monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO_2), dióxido de nitrógeno (NO_2) y otros aerosoles. En el presente trabajo, centraremos el estudio en el dióxido de nitrógeno y en el monóxido de carbono. El dióxido de nitrógeno se forma desde el suelo debido a las emisiones causadas por la combustión de combustibles fósiles (en vehículos, industrias y plantas energéticas) con altas temperaturas. Contribuye directamente a la decadencia del ozono en la estratosfera mediante reacciones químicas que acaban formando ácido nítrico (HNO_3), el responsable de la lluvia ácida, afectando a la salud de los seres vivos del planeta negativamente, y contribuyendo al aumento de la tasa de mortalidad.

Si hacemos una comparación entre las emisiones de NO_2 y CO_2 en Europa, podemos ver como existe una relación positiva, es decir, observamos una mayor concentración de emisiones de CO_2 cuando también hay una mayor concentración de emisiones de NO_2 . Además, vemos como este hecho se acentúa en las ciudades donde el PIB es mayor (debido a que tienen un mayor número de procesos de combustión), aunque estos valores cada vez van aumentando más lentamente. A la hora de analizar los niveles de este contaminante, debemos de tener en cuenta que es muy sensible a las condiciones meteorológicas, como pueden ser la luz solar, la temperatura y el viento, ya que pueden afectar a su periodo de vida y la dispersión del mismo por la atmósfera [ESA-d, 2021].

1.2. Los principales contaminantes atmosféricos y sus efectos

El monóxido de carbono (CO) es un contaminante imprescindible cuando queremos entender la química de la troposfera y que en las áreas urbanas se ha convertido en el principal contaminante atmosférico. Tiene su origen en la combustión de los combustibles fósiles, la quema de biomasa y, por el proceso químico de la oxidación del metano y otros carbonos. Además, al juntarse con el metano (el cual tiene un periodo de vida muy largo en la atmósfera), tiende a repartirse uniformemente por toda la atmósfera.

También cabe destacar el gas ozono (O_3), el cual se forma debido a la absorción de la luz del sol (en su espectro ultravioleta) por parte de la molécula de oxígeno y reacción de los átomos generados con dichas moléculas de oxígeno, lo que provoca el ascenso de las temperaturas. Debemos destacar que este proceso es reversible debido a la reacción con distintas sustancias químicas de la atmósfera por las cuales el ozono vuelve a su estado natural. Es por esto por lo que hablamos de un movimiento cíclico de creación y destrucción de ozono que acaba determinando la concentración en un momento dado.

Todos estos gases suponen una modificación del estado natural de la atmósfera, por lo que podemos ver grandes consecuencias, que en la mayoría de veces pueden llegar a suponer un riesgo. Un ejemplo es el efecto invernadero, un mecanismo por el cual debido a la presencia de contaminantes en la atmósfera, la temperatura terrestre aumenta (Figure 1.2). Este efecto en realidad tiene un origen natural, y tiene como objetivo ayudar a la regulación de la temperatura terrestre, ayudándola a mantener una temperatura constante en la superficie terrestre, pero, con el incremento de la actividad humana, vemos un incremento en este efecto (debido al aumento de contaminantes en la atmósfera). Es por este incremento por lo que los modelos de cambio climático predicen aumentos de temperatura para el año 2100 de unos dos grados respecto a 1990, lo que supondría un aumento en el nivel del mar, tormentas más frecuentes y de mayor intensidad, eventos extremos y la destrucción de la capa de ozono (Figure 1.3).

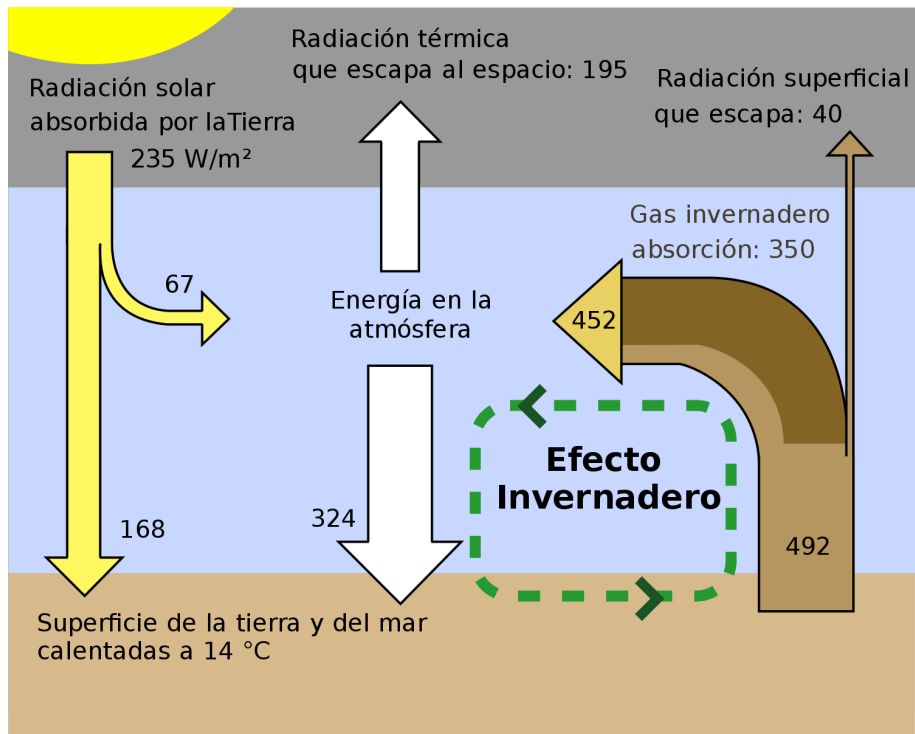


Figura 1.2: Representación esquemática simplificada de los flujos de energía entre el espacio, la atmósfera de la Tierra y su superficie. *Fuente: Robert A. Rohde (Dragons flight at English Wikipedia).*

En los contaminantes presentes en la atmósfera, podemos destacar los CFCs y los halones, que sobreviven lo suficiente tiempo en la troposfera como para alcanzar la estratosfera, donde la radiación ultravioleta rompe las moléculas, liberando los átomos de cloro, que contribuyen a la destrucción de ozono dando lugar a ciclos catalíticos muy eficaces, de forma que un solo átomo de cloro puede destruir hasta 100.000 moléculas de ozono antes de depositarse o ser eliminado. Destacamos también los óxidos de nitrógeno, que alcanzan la estratosfera fundamentalmente a través del NO_2 , que también sobrevive largo tiempo en la troposfera [Martinez-Ataz & Diaz de Mera Morales, 2004] (Figure 1.3).

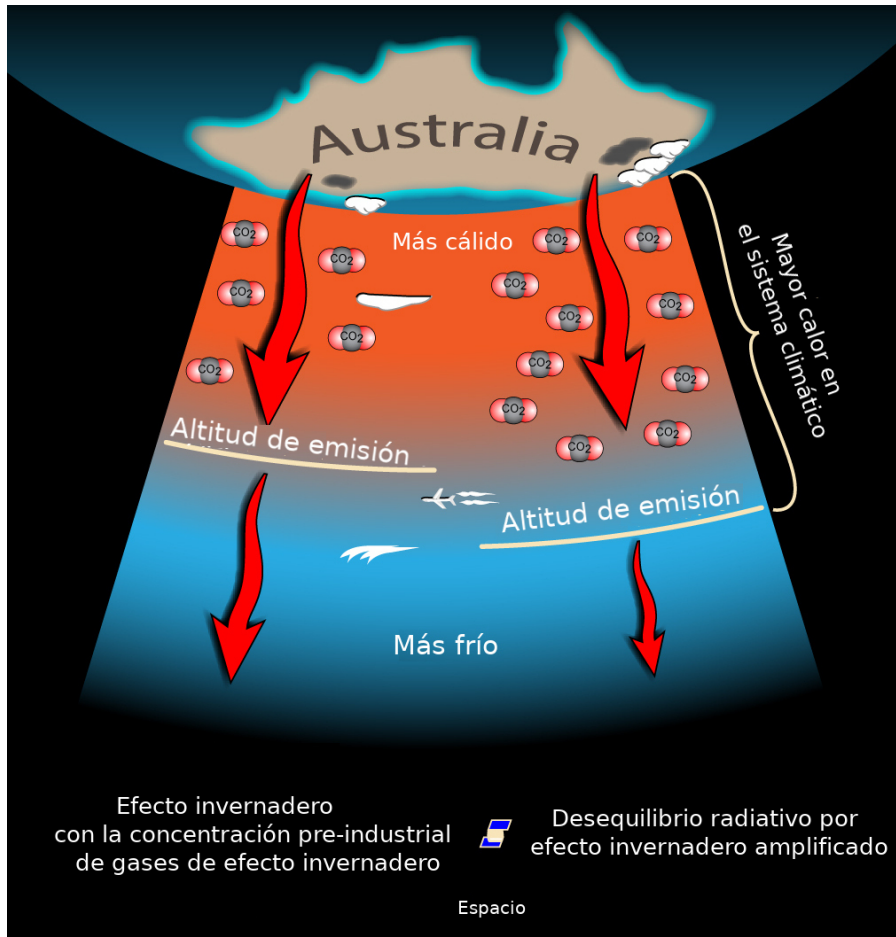


Figura 1.3: Desequilibrio radiativo por efecto invernadero amplificado *Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license*.

En los años 70, vemos como diferentes estudios apuntaban a una disminución drástica de la concentración de ozono en la primavera de la Antártida, un proceso que ha sido agravado con el tiempo, llegando a que la concentración en primavera es menor a la mitad de la concentración de la que existía en los años 60 por las mismas fechas. Debemos tener en cuenta que durante el invierno polar, el mecanismo de calentamiento estratosférico habitual no actúa debido a la oscuridad, por lo que se alcanzan temperaturas muy bajas, lo que hace que se condense en la atmósfera cristales de ácido nítrico hidratado, lo que conocemos como nubes estratosféricas polares. Debido a este enfriamiento, el descenso del aire de las capas altas combinado con la rotación terrestre origina un vórtice, o masa de aire giratoria con

vientos de hasta 300 km/h, que aísla el aire del interior durante meses, como si estuviera confinado en un reactor gigante. Como resultado, los ciclos catalíticos anómalos de destrucción dejan de funcionar, por lo que la concentración de ozono vuelve a su nivel normal unas semanas después de desaparecer las nubes estratosféricas polares y el vértice, cerrándose el agujero de ozono por otro año. Aún así, antes de que esto pase, parte de la masa de aire pobre en ozono puede desplazarse de la Antártida y mezclarse con el aire de los alrededores, disminuyendo temporalmente la concentración de ozono de regiones geográficas próximas. [Martinez-Ataz & Diaz de Mera Morales, 2004]. El fenómeno observado en el Antártico es mucho menos drástico en la primavera del Ártico, debido a que las temperaturas son menos extremas, aunque en los últimos años se viene observando un enfriamiento de la estratosfera del Ártico con el consiguiente aumento de la destrucción de ozono también en esta región. [Martinez-Ataz & Diaz de Mera Morales, 2004].

Otra consecuencia es la lluvia ácida, que tiene lugar cuando las nubes transportan contaminantes desde el aire y los depositan junto con la lluvia, nieve, rocío, niebla, casos en los que hablamos de deposición húmeda. También pueden ser depositados directamente en el suelo (deposición seca). Esta lluvia ácida se genera debido a las emisiones, principalmente de óxidos de azufre y nitrógeno, que cuando llegan a la atmósfera sufren un proceso de oxidación que los convierte en ácido sulfúrico y en ácido nítrico (respectivamente), unos ácidos que se disuelven en las gotas de lluvia produciendo una precipitación ácida y muy corrosiva. El efecto puede observarse a grandes distancias de las fuentes emisoras, y dependiendo de las condiciones meteorológicas, la lluvia ácida puede afectar a zonas no industrializadas alejadas y a ecosistemas muy diversos. [Martinez-Ataz & Diaz de Mera Morales, 2004]. Los principales efectos de la lluvia ácida están relacionados con daños en los ecosistemas tanto acuáticos como terrestres.

Para resumir, los principales contaminantes llegan a la atmósfera como producto de la combustión, constituyendo un primer grupo de contaminantes primarios, los cuales pueden reaccionar con los principales componentes atmosféricos, con intervención de la radiación solar, convirtiéndose en contaminantes secundarios [Martinez-Ataz & Diaz de Mera Morales, 2004]. Otra posible clasificación de los contaminantes podría referirse al origen de las emisiones, por lo que encontramos contaminantes biogénicos (origen natural) o antropogénico (actividad humana). Si seguimos analizando su origen, podemos ver

como las fuentes de emisión se diferencian según su movimiento. Las fuentes móviles, son elementos no fijos, como por ejemplo los coches, que no están quietos, si no que van moviéndose por el territorio. También encontramos fuentes estacionarias o inmóviles, unas fuentes que contaminan debido a la quema de diferentes combustibles fósiles, como es el caso de las grandes industrias, que contaminan donde están situadas. Por último, podemos encontrar fuentes intermitentes, que son procesos puntuales que suponen una emisión de contaminantes, siendo un ejemplo los incendios forestales, los cuales liberan mucho CO₂ en un espacio temporal determinado.

1.3. Impacto ambiental. Planes de vigilancia y medidas correctoras.

Un determinado número de contaminantes, denominados contaminantes criterio, tiene efectos documentados sobre la gente, plantas o materiales con unas concentraciones dadas en el aire contaminado. En todos los países se dan unos valores límites para proteger la salud pública y el bienestar [Martinez-Ataz & Diaz de Mera Morales, 2004].

- Los contaminantes primarios o criterio son los que modifican la calidad ambiental del aire. El objetivo principal deber ser proteger la salud pública, con margen de seguridad.
- Es necesario proteger el bienestar de la población, por lo que se deben asumir las pérdidas económicas debido a los daños en las cosechas, bosques, materiales e incluso la pérdida de visibilidad (esto lo vemos en las grandes ciudades, donde las grandes cúpulas de contaminación atmosférica dificultan la visión, o son notables en el ambiente).
- Existen otros contaminantes que no son criterio ya que su impacto no es tan directo en el medio, pero vemos como también están sujetos a los límites establecidos por cada país con el objetivo de que no se vuelvan perjudiciales.

Un ejemplo de estos contaminantes criterio son el dióxido de azufre, el dióxido de nitrógeno, el monóxido de carbono, material particulado y ozono. En España podemos ver como estos límites están recogidos en

Real Decreto 1073/2002, de 18 de octubre, sobre evaluación y gestión de la calidad del aire ambiente en relación con el dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, óxidos de nitrógeno, partículas, plomo, benceno y monóxido de carbono. Los límites del monóxido de carbono se recogen en la Figura 1.4.

Periodo de Referencia	Valor	Situación
Treinta minutos	45 mg/m ³	Admisible
Octohorario	15 mg/m ³	Admisible
Diario	34 mg/m ³	Emergencia de primer grado
Diario	48 mg/m ³	Emergencia de segundo grado
Diario	60 mg/m ³	Emergencia total

Figura 1.4: Ejemplo de los límites de contaminación con el caso del monóxido de carbono (*Fuente: Gobierno regional de Castilla la Mancha*).

Tener acceso al aire limpio es un requisito indispensable para la calidad de vida, ya que la contaminación tiene un impacto directo en la salud de las personas, constituyendo uno de los mayores riesgos para la población [Ballester Díez et.al., 1999]. Además no solo afecta a la salud de las personas, sino que también vemos un grave impacto ambiental. Este impacto es debido a que la contaminación provoca que nuestro ecosistema cambie, sobre todo en zonas donde la densidad poblacional es alta (es decir, en grandes ciudades), ya que el uso de combustibles fósiles y la presencia de industrias es elevado, aunque también podemos encontrar este problema en ciudades más pequeñas. Esto se explica por que la degradación de los espacios naturales se agrava debido a la actividad humana, con espacios naturales cada vez están más integrados en la red urbana, lo que permite que las enfermedades y nuevos patógenos tengan una mayor expansión, como se ha visto recientemente con el virus del SARS-CoV-2 [Bauwens, 2020]. Es, por tanto, necesario establecer políticas de calidad de aire, con estándares de calidad previamente definidos, para poder establecer una base, y que monitorizar la presencia de contaminantes atmosféricos en la troposfera sea necesario con el objetivo de mejorar la calidad del aire. Esta monitorización se realiza mediante cromatógrafos de gases, espectrómetros de masas o sensores ultravioleta, entre otros, los cuales están distribuidos por todo el territorio terrestre y que nos permite obtener información de calidad sobre un gran espectro de contaminantes. Esta red de monitorización se puede relocalizar para poder obtener una mejor lectura del área de estudio, lo que nos permite ajustar y mejorar los modelos de calidad de aire (Real Decreto 102/2011).

También encontramos métodos "naturales", como es el caso de los efectos que produce al aumento antropogénico del nitrógeno en los criptogamas, principalmente en briófitos (grupo de organismos formados por musgos y esfagnos; hepáticas y antoceros) y líquenes (organismos resultantes de la simbiosis entre un hongo, un alga o una cianobacteria), elementos muy importantes en ciclo biogeoquímico del nitrógeno. Estos organismos influyen en la fijación del nitrógeno (N) no reactivo a través de su asociación con comunidades de cianobacterias, y modifican las formas químicas en que el nitrógeno reactivo está disponible para los restantes componentes de la biosfera, sea como ion nitrato, ion amonio o compuestos orgánicos [Varela et. al., 2017]. Es por esto por lo que la amplia distribución geográfica de muchas especies, con frecuencia incluso cosmopolitas, permite estudiar los patrones espacio - temporales del depósito atmosférico del nitrógeno y promete aportar datos reveladores a escalas superiores, según apuntan los modelos existentes [Sutton et al. 2011]

La legislación europea actual marca unos puntos principales sobre la contaminación:

- Fijar unos estándares para la calidad del aire respecto a los principales contaminantes.
- Fijar unos límites máximos para las emisiones.
- Regulación de la composición de los combustibles y ciertos procesos industriales para que sean menos contaminantes.
- Creación y regulación de redes de vigilancia de la contaminación.
- Método de referencia para la monitorización de los principales contaminantes.
- Establecimiento y regulación para los casos de infracción.

Para verificar el cumplimiento de estos límites legales de emisiones e inmisiones, la ley ha establecido redes de vigilancia de la contaminación a medir sus emisiones. La tendencia de la legislación es a que también los pequeños emisores, y en particular los automóviles, tengan también que medir periódicamente sus niveles de emisión [Martinez-Ataz & Diaz de Mera Morales, 2004]. Estos métodos de análisis deben de ser muy exactos, ya que deben detectar concentraciones muy pequeñas. Podemos encontrar

diferentes formas de tomar muestras representativas del aire a analizar en un lugar y momento determinado. Existen métodos extractivos, sus elementos básicos de este sistema de muestreo son una entrada de aire, un colector de muestra, un medidor de flujo, y un dispositivo para mover el aire a través del colector, que normalmente es una bomba; métodos de muestreo *in situ* que permiten hacer medidas en tiempo real y de modo continuo, aunque con menos selectividad y sensibilidad que los extractivos, y solo están desarrollados para los principales contaminantes; y, por último, sistemas de teledetección con los que se detecta la contaminación a distancia, sin contacto físico, por lo que permiten hacer mediciones en lugares inaccesibles, o de grandes zonas [Martinez-Ataz & Diaz de Mera Morales, 2004].

La Organización Meteorológica Mundial, ha creado la Red BAPMON (*Background Air Pollution Monitoring Network*), la cual se centra en recoger datos sobre la concentración de fondo, que es la concentración provocada por el aporte de las fuentes que no han sido previamente analizadas de los principales contaminantes. Por tanto, vemos como se trata de vigilar y reconocer los cambios a gran escala que se produzcan en la atmósfera y que tengan relación con la meteorología y el clima. En Europa, con el objetivo de proporcionar información a los gobiernos sobre los flujos de contaminación transfronteriza entre los distintos países europeos, se creó el programa y red europea EMEP dentro del marco del Convenio de Ginebra (*European Monitoring Evaluation Programme*)*. Si focalizamos en nuestra zona de estudio, en la Península Ibérica (concretamente en España), están activas varias redes de vigilancia de la contaminación atmosférica instaladas en diferentes comunidades autónomas y que registran datos sobre una amplia gama de contaminantes y controladas por el Ministerio de Transición ecológica y el reto demográfico. También podemos encontrar proyectos como el MECAPIP (*Mesometeorological Cycles of Air Pollution in the Iberian Peninsula*), que tiene el objetivo de documentar los procesos atmosféricos sobre la Península Ibérica, la RECAPMA (*Regional Cycles of Air Pollution in the Western Mediterranean Area*) que amplió el área de estudio desde la costa Atlántica de Portugal hasta Italia y el SECAP, mismo proyecto que el anterior pero que afecta a toda la cuenca Mediterránea (*South European Cycles of Air Pollution*).

*Disponible en <https://www.emep.int>

1.4. Objetivo principal del trabajo

La contaminación atmosférica es uno de los mayores problemas medioambientales que afectan a la salud de las personas en la totalidad del planeta. Esta contaminación está generada por diferentes fuentes, principalmente de la combustión industrial y de los motores de los vehículos.

Es por tanto, que el objetivo de este trabajo es analizar esta contaminación atmosférica en base a las concentraciones de dióxido de nitrógeno y monóxido de carbono en un momento específico en el tiempo (meses de marzo de 2019 y 2020) en la región geográfica de la Península Ibérica mediante los datos obtenidos por el satélite SENTINEL - 5P y modelos informáticos.

Datos y Métodos

2.1. Satélite Sentinel - 5P

El satélite Sentinel - 5 Precursor (S5p) es la primera misión Copernicus dedicada a la monitorización de la atmósfera. Esta misión es el resultado de la colaboración entre la ESA, la comisión Europa, la NSO (*Netherlands Space Office*), la industria, los propios usuarios y, por supuesto, por científicos. Además, debemos destacar que está incluido en el programa COPERNICUS de la UE.

COPERNICUS es un programa de observación de la superficie terrestre de la Unión Europea que tiene como objetivo analizar el planeta y su entorno para mejorar la calidad de vida de toda la población europea. Está compuesto por servicios de información basado en datos satelitales de observación de la Tierra y datos recogidos *in situ*. Cuenta con un conjunto de satélites y misiones que contribuyen a cumplir su objetivo. Los satélites, principalmente de la familia Sentinel, están diseñados para este programa, y aparecieron en 2014 con el lanzamiento de Sentinel – 1A, y busca poner en órbita un total de 20 satélites (aproximadamente) antes del año 2030 [ESA-d, 2021]. Como ya hemos comentado previamente, también recoge información de sistemas in situ, como pueden ser las estaciones terrestres, que nos proporcionan una serie de datos adquiridos por una multitud de sensores en tierra, mar o aire.

El Sentinel-5p (S5P) consiste en un único satélite que contiene el sensor TROPOMI (*TROPOspheric Monitoring Instrument*). El principal objetivo de este satélite es realizar mediciones atmosféricas con una alta resolución espacio - temporal para poder ser utilizadas para analizar la calidad del aire, el ozono, la radiación UV y poder hacer un monitoreo y pronóstico del clima [ESA-b, 2020]. Los productos y servicios proporcionados por TROPOMI son utilizados por COPERNICUS para una gran variedad de aplicaciones de escala globales. Datos y productos pueden encontrarse en los servicios *Copernicus Climate Data Storage*^{*}, o *Copernicus Atmosphere Monitoring Service*^{**}. S5P fue lanzado el 13 de octubre de 2017 en el cosmódromo Plesetsk, en Rusia. El lanzamiento de esta misión supuso una reducción en las brechas de disponibilidad de productos de datos atmosféricos a escala global entre SCIAMACHY/Envisat (que finalizó su misión en 2012), la misión OMI/AURA (aún activa) y las misiones Sentinel-4 y Sentinel-5 que serán lanzadas en el futuro.

Si analizamos las características del satélite, vemos como es un satélite de órbita terrestre baja, compatible con cohetes pequeños, como pueden ser VEGA y ROCKOT, siendo ROCKOT el vehículo lanzamiento seleccionado. Tiene una vida útil (estimada) de siete años. Su plataforma mecánica consta de una estructura hexagonal, que actúa como soporte de las unidades eléctricas de la plataforma y como UCI (unidad de control de instrumentos), el TROPOMI, además de conectarse con un anillo de interfaz de vehículo de lanzamiento estándar (Figure 2.1) [ESA-b, 2020].

*<https://cds.climate.copernicus.eu>

**<https://atmosphere.copernicus.eu>

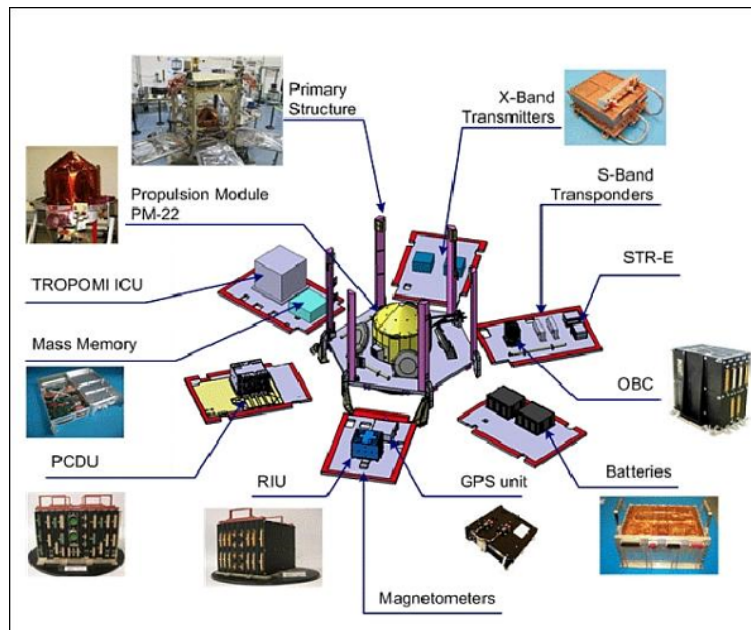


Figura 2.1: Partes del satélite Sentinel-5 Precursor. Fuente: ESA

Los productos obtenidos están diferenciados por niveles, y son los siguientes:

- Productos nivel 0: son los productos que están sin procesar, y están incluidos los datos recogidos por los cuatro espectrómetros, tanto para las mediciones atmosféricas como las medidas de calibración. También están incluidos los datos de ingeniería, datos auxiliares y los metadatos de adquisición para su posterior procesamiento. Estos datos no están disponibles para el público.
- Productos nivel 1-B: son los productos que recogen la información sobre la parte superior de la atmósfera corregida radiométricamente y geolocalizada. También se tienen en cuenta la radiancia de la Tierra en todas las bandas espectrales, además de las irradiancias solares. Estos productos sí que están disponibles para el público junto con la documentación pertinente (en una guía técnica de productos y algoritmos).
- Productos nivel 2: estos productos son las columnas totales geolocalizadas de ozono, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, monóxido de carbono, formaldehído y metano. También incluye información de la geolocalización, y máscaras de nubes y aerosoles. Estos productos también están disponibles para el público acompañados de documentación para el usuario.

El procesamiento en tiempo casi real (NRT, *Near Real Time*) está sujeto a la disponibilidad de los productos dentro de las tres horas posteriores a la detección, y encontramos los perfiles verticales de ozono, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, monóxido de carbono, formaldehído, nubes y aerosoles. En el procesamiento fuera de línea (OFFL, *offilne*) la disponibilidad de datos depende del producto. Para los productos nivel 1-B, son datos recogidos durante las doce horas posteriores a la detección para las columnas de metano, ozono troposférico y dióxido de nitrógeno total corregido dentro de los 5 días posteriores a la detección [ESA-b, 2020]. Para las actividades de reprocesamiento (mejora de los algoritmos y métodos de procesamiento) no existen limitaciones de tiempo. El reprocesamiento de los productos Sentinel-5P se realizará cuando se considere necesario realizar actualizaciones importantes del producto.

Para este trabajo, hemos necesitado realizar la descarga de los productos S5P de segundo nivel (*Level-2*, L2). Estos productos están caracterizados por tener:

- Columnas totales geolocalizadas de ozono, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, monóxido de carbono, formaldehído y metano.
- Columnas troposféricas geolocalizados de ozono.
- Perfiles verticales geolocalizados de ozono.
- Información geolocalizada de nubes y aerosoles.

Estas imágenes son descargadas desde la página *Copernicus Open Access Data Hub*, sin coste alguno y a disposición de la población.

Como recurso didáctico, hemos considerado los materiales y cursos ofrecidos por Copernicus RUS (*Research and User Support*^{***}). Gracias a estos materiales hemos aprendido como trabajar con las imágenes derivadas de TROPOMI, mediante un Jupyter Notebook de Python, ajustando los parámetros necesarios a nuestra área de estudio y rango temporal. Por tanto, estamos ante un análisis realizado con código Python, y aunque no es necesario conocer en profundidad este lenguaje, si que es

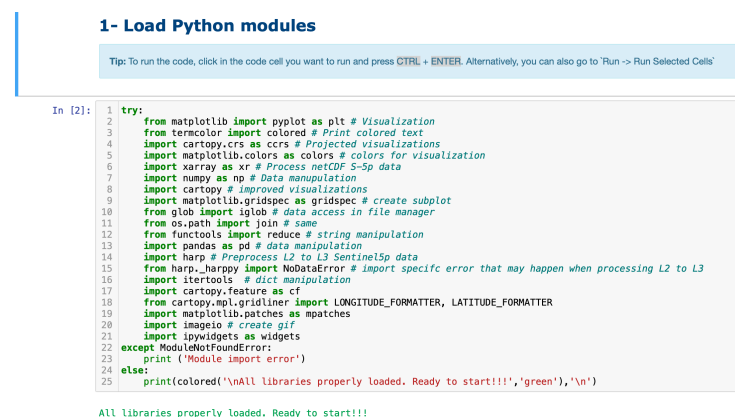
^{***}<https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/copernicus-sentinel-5p>

conveniente tener unas nociones básicas para poder seguir la metodología y comprender todo los pasos a realizar.

2.2. Metodología aplicada

La metodología se puede separar en dos grandes bloques, los cuales, a la hora de desarrollarse, podrán ser desglosados en puntos más concretos. También debemos tener en cuenta que no va a ser un proceso fácil, si no todo lo contrario, ya que es un proceso para el cual debes estar familiarizado con el código, ya que si no será muy difícil (si no imposible) entender este proceso, además de poder corregirlo y adecuarlo en caso de error.

Antes de comenzar, hay que cargar los módulos Python necesarios para este ejercicio. Estos módulos son conocidos como bibliotecas, las cuales son un conjunto de métodos y herramientas con múltiples funciones para el correcto tratamiento estadístico y cartográfico de las matrices de datos. Una vez cargados correctamente, el programa tendrá lo necesario para poder procesar las imágenes correctamente (Figura 2.2).



```
1- Load Python modules

Tip: To run the code, click in the code cell you want to run and press CTRL + ENTER. Alternatively, you can also go to 'Run -> Run Selected Cells'

In [2]: 1 try:
2         from matplotlib import pyplot as plt # Visualization
3         from termcolor import colored # Print colored text
4         import cartopy.crs as ccrs # Projected visualizations
5         import matplotlib.colors as colors # colors for visualization
6         import xarray as xr # Process netCDF S-5p data
7         import numpy as np # Data manipulation
8         import cartopy # Improved visualizations
9         import matplotlib.gridspec as gridspec # create subplot
10        from glob import glob # data access in file manager
11        from os.path import join # same
12        from functools import reduce # string manipulation
13        import pandas as pd # data manipulation
14        import harp # Preprocess L2 to L3 Sentinel5p data
15        from harp_happy import NoDataError # import specific error that may happen when processing L2 to L3
16        import itertools # dict manipulation
17        import cartopy.feature as cf
18        from cartopy.mpl.gridliner import LONGITUDE_FORMATTER, LATITUDE_FORMATTER
19        import matplotlib.patches as mpatches
20        import imageio # create gif
21        import ipywidgets as widgets
22    except ModuleNotFoundError:
23        print('Module import error!')
24    else:
25        print(colored('\nAll libraries properly loaded. Ready to start!!!', 'green'), '\n')

All libraries properly loaded. Ready to start!!!
```

Figura 2.2: Módulos de Python necesarios para el procesamiento. Fuente: RUS

2.2.1. Análisis de los datos Sentinel-5p utilizando xarray.

Para poder comenzar con el análisis, debemos de acceder a los datos contenido en los productos de L2 Sentinel-5P en formato netCDF (matriz múltiple), por lo que es necesario saber como se estructuran. Dentro de este tipo de archivos, podemos encontrar una serie de grupos que tienen como objetivo organizar los datos para facilitar la búsqueda y manejo de los datos recogido por el sensor (Figura 2.3). Una vez tenemos claro como están estructurados estos archivos, podemos acceder a los datos desde Python con las herramientas HARP y XARRAY. La herramienta principal en esta parte del análisis es XARRAY que nos permite entender y acceder a las distintas parte de la matriz en netCDF y proporciona funciones de diagnóstico para análisis avanzados y visualización con estas estructuras de datos. Con esta herramienta, pasaremos a buscar los productos de dióxido de nitrógeno en la carpeta elegida, seleccionaremos los productos de nivel 2 de dióxido de nitrógeno, abriremos los productos y atributos globales, los metadatos y los datos auxiliares. Una vez hemos podido acceder a estos datos, podemos visualizar los distintos productos.

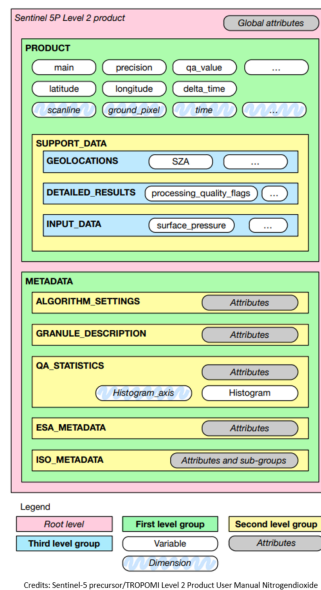


Figura 2.3: Organización de los datos de las imágenes en L2 en netCDF (izquierda). Visualización de los datos NO₂. Fuente: ESA

La visualización de los datos nos permite tener una visión general de los productos que luego utilizaremos en este análisis. Para tener una representación óptima, cambiaremos las unidades de medida utilizadas, pasando de mol/m² a moléculas/cm². Si utilizamos la biblioteca CARTOPY (paquete utilizado para el procesamiento de datos geoespaciales con el objetivo de producir mapas y otros análisis de datos geoespaciales), veremos como esta gráfica será mejor. La visualización, de momento es sólo de imágenes tomadas en un momento determinado (Figura 2.4)

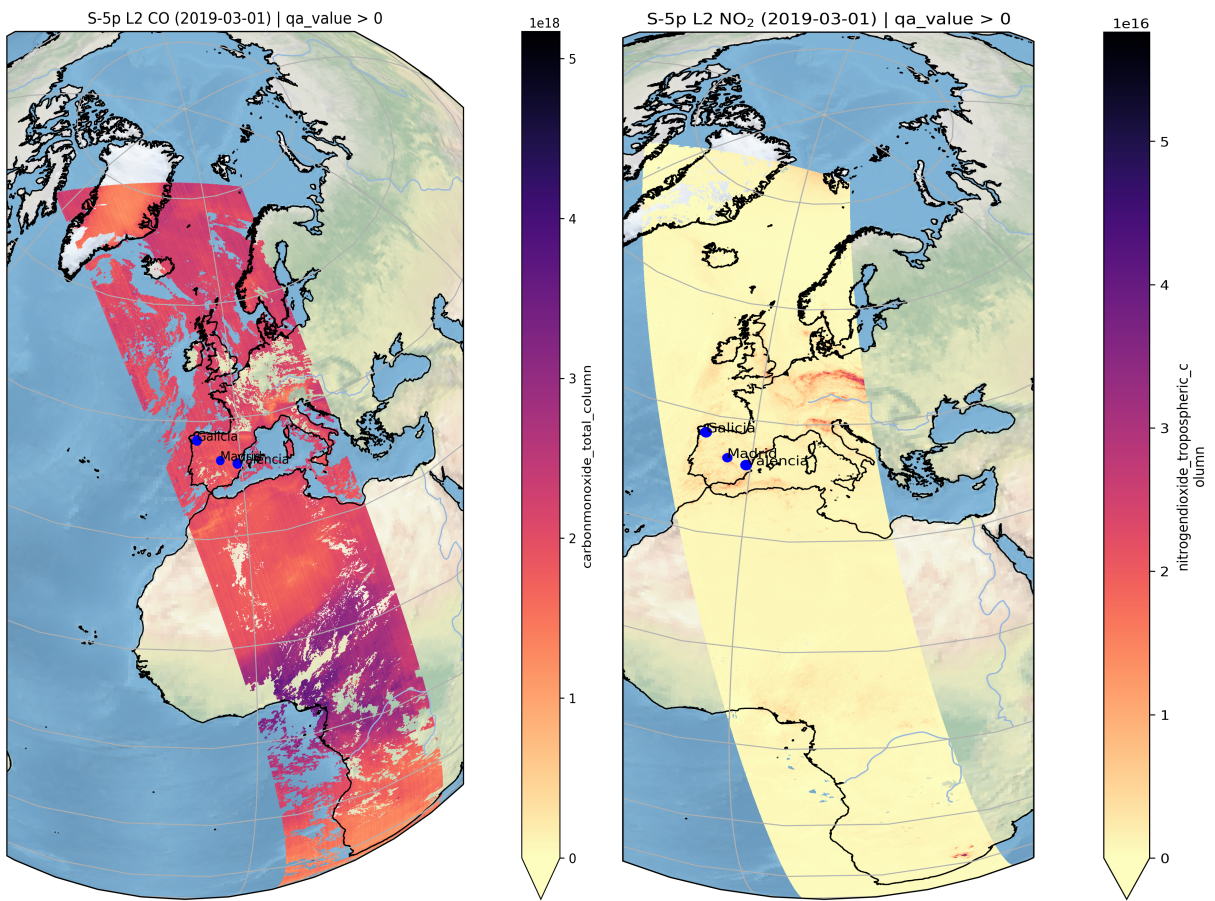


Figura 2.4: Visualización de una órbita de CO y de NO₂ de una imagen L2

Una vez hemos conseguido una visión general completa de los datos, podremos empezar a procesar utilizando los estándares de calidad incluidos en los productos Sentinel-5P L2. La calidad de estas observaciones, vemos como dependen de muchos factores, y están tomados en cuenta en la definición de los valores de calidad segura (*qa-value*) que proporciona a los usuarios que empleen estos datos un filtro para eliminar las observaciones menos precisas y que puedan llevarnos a un error en nuestro análisis.

- *qa-value*>0.75: filtro recomendable ya que elimina todas las imágenes con cubiertas de nubes (cuando la refracción de las nubes sea mayor de 0.5), escenas cubiertas parcialmente con nieve/hielo, y otros errores.
- *qa-value*>0.5: es un filtro menos estricto que el anterior, es útil para estudios de asimilación y comparación de modelos.

En el caso actual se ha decidió trabajar con un valor de calidad superior a 0.5 (Figura 2.5), ya que al procesar sólo un mes de datos, cuantos más píxeles tuviéramos, más completa se vería la imagen. Esto, por supuesto, repercute en la precisión de los resultados, que son algo menos fiables.

En este paso, crearemos también un marco geográfico para reducir los productos Sentinel-5P a nuestra área de estudio, la Península Ibérica.

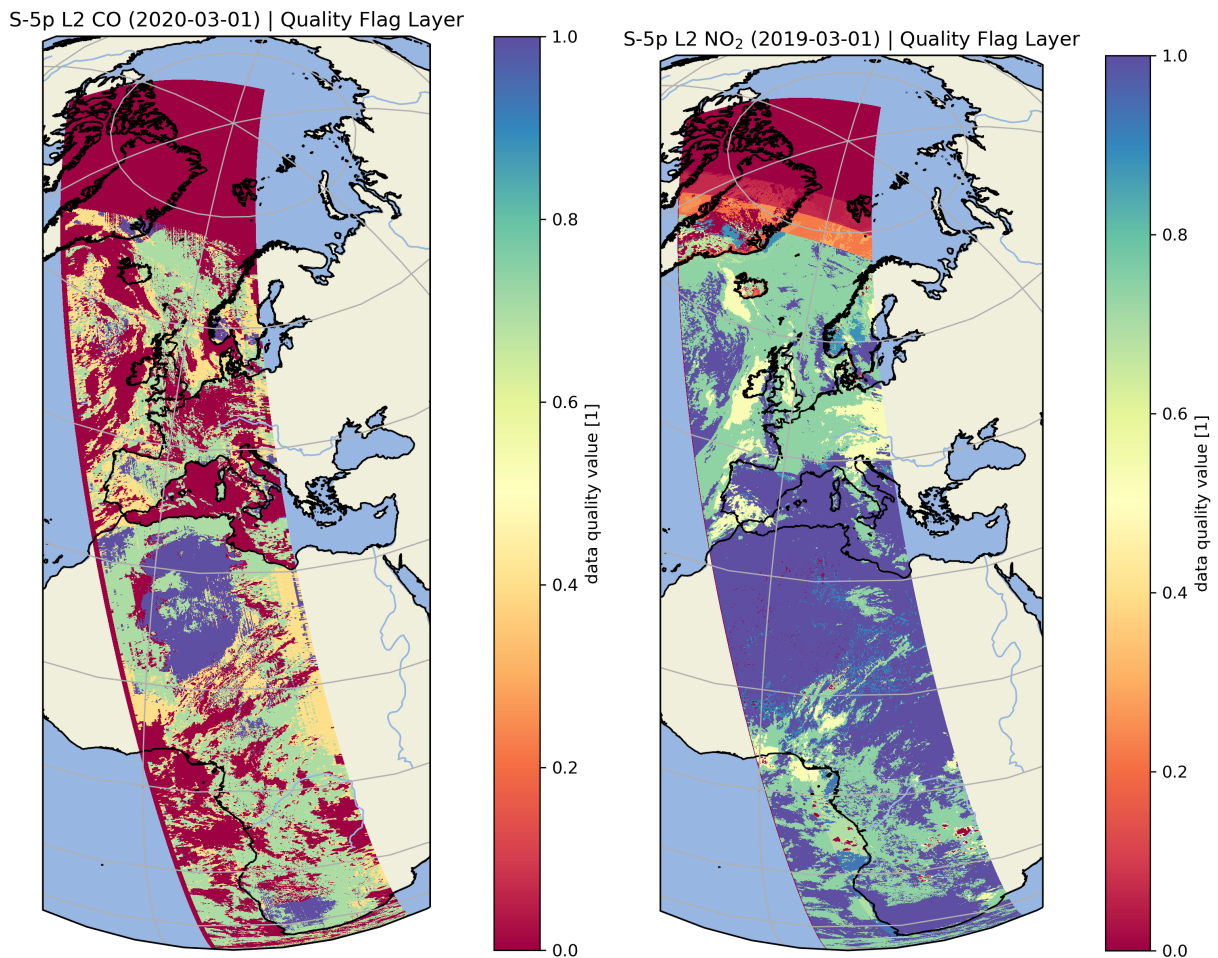


Figura 2.5: Visualización de la estimación de la calidad de los datos

2.2.2. Procesamiento multi-temporal Sentinel-5P (HARP+XARRAY)

Una vez hemos pre-procesados los datos, seleccionando aquellos cuyo índice de calidad fuera superior al 0.5 y recortando el área de estudio para las dos variables de interés (CO y NO₂), pasaremos a calcular la media mensual para cada variable en marzo de 2019 y marzo de 2020. Para esto, utilizaremos la herramienta HARP, la cual nos ayudará a preprocesar los datos satelitales y correlativos, de modo que los dos datasets que deben compararse terminen teniendo la misma cuadrícula temporal/espacial, el mismo formato de datos/estructuras y la misma unidad física.

Normalmente, cuando HARP se ejecuta, se pueden producir excepciones, siendo la más común la de `NoDataError`, el cual se produce cuando el producto es devuelto desde una importación que no contiene variables, o si las tienes, no contiene datos. Esto puede estar causado por un producto que no se solapa con nuestra área de interés o que todos los pixeles han sido filtrado por el *qa-value* establecido en los pasos anteriores. Estos datos serán derivados automáticamente a una carpeta de imágenes no transformadas y desechados. Todo los datos válidos se almacenan en una matriz que pasa ya a ser considerada un producto de Nivel-3 (L3). También crearemos un diccionario que contenga, para cada producto, el inicio y el final del granulado de los datos en UTC para poder después establecer cómo calcular la media. En este caso nos interesa una media mensual con todas las imágenes L3, pero podríamos decidir hacer una media quincenal, por ejemplo, y este modo de arreglar los datos nos lo permitiría fácilmente.

El cálculo del promedio se realiza de nuevo con las funciones de `XARRAY` sobre la matriz de L3. El último paso consiste en crear un mapa que nos muestre el promedio de las concentraciones del contaminante analizado durante el periodo de tiempo seleccionado sobre nuestra zona de estudio. Además, si nuestro objetivo, como es en nuestro caso, es realizar una comparación entre dos momentos temporales diferentes, podemos repetir este proceso para obtener otra imagen resultante con el objetivo de hacer un GIF que nos junte ambos periodos y nos ayude a compararlos.

Una vez conocemos el proceso y nos hemos familiarizado con el, para el dióxido de nitrógeno debemos realizarlo una vez por momento temporal, es decir, una vez para 2019 y una segunda vez para 2020. Para el caso del monóxido de carbono, debemos adecuar el código, ya que los metadatos difieren, lo que hace necesario estos cambios en el código. Todo el código Python empleado ha sido copiado en el Anexo 1.

Resultados

3.1. Dióxido de nitrógeno.

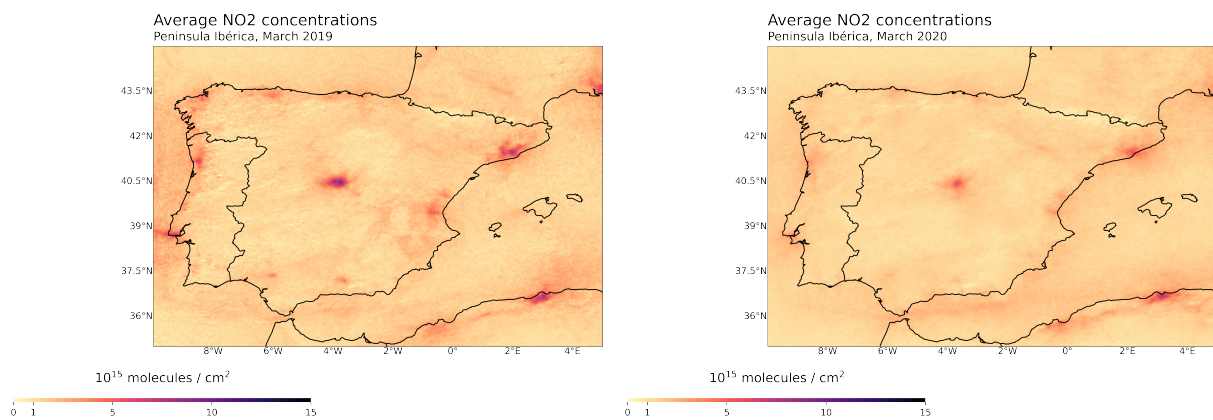


Figura 3.1: Concentración media de dióxido de nitrógeno sobre la Península Ibérica: izquierda marzo de 2019, derecha marzo de 2020

La Figura 3.1 muestra los resultados obtenidos tras haber realizado el promedio de las 63 imágenes descargadas para el periodo de marzo en cada año (es decir, en total hemos pre-procesado 126 imágenes de este producto). En una primera observación apreciamos una clara diferencia ante ambos mapas, y

es que en el caso de marzo de 2020, podemos ver como esta concentración de NO_2 sobre las grandes ciudades (Barcelona, Madrid, Lisboa) y otras de tamaño más reducido, ha disminuido, consecuencia, probablemente, de las fuertes restricciones que sufría el territorio debido al COVID-19. El confinamiento vivido en el mes de marzo de 2020 supuso un gran descenso de la concentración de dióxido de nitrógeno en la áreas más pobladas de la Península. El tráfico se vio reducido al máximo, al igual que la actividad industrial y sectores energéticos, que tuvieron que disminuir su producción y por ende sus niveles de expulsión de dióxido de nitrógeno. En el caso de marzo de 2019, vemos una distribución homogénea en la concentración atmosférica a lo largo de nuestro ámbito, pero podemos ver picos de contaminación en la áreas urbanas más pobladas, como son el caso de Madrid, Lisboa, Barcelona y en menor medida de Valencia. Estas concentraciones más elevadas y puntuales son debido a que estos lugares son grandes áreas industriales y urbanas, por lo que hay un gran número de procesos de combustión, tanto en la industria como en el día a día de las personas (vehículos). En el caso de marzo de 2020, vemos como las concentraciones son menores que en el año pasado debido a la pandemia global, pero aún así, podemos apreciar como es en estas zonas urbanas donde mayor cantidad de dióxido de nitrógeno atmosférico podemos encontrar.

3.2. Monóxido de carbono.

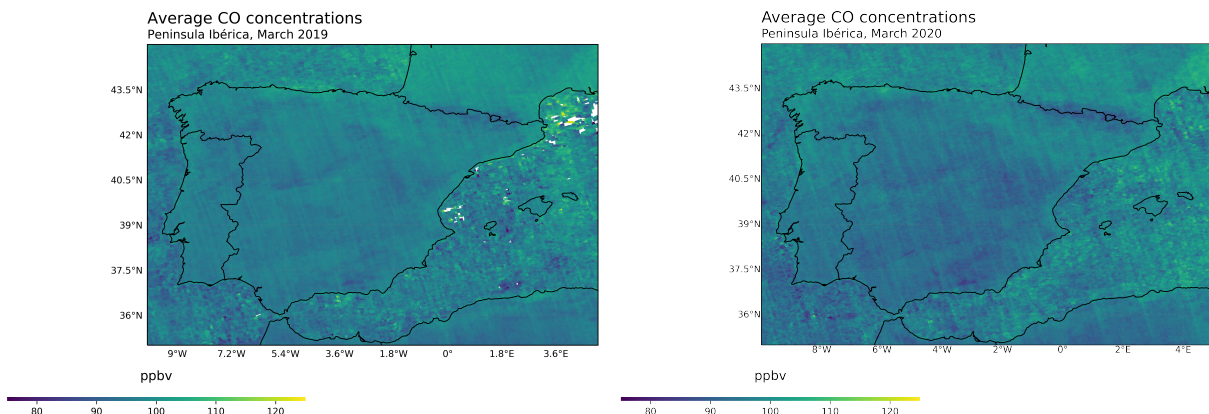


Figura 3.2: Concentración media de monóxido de carbono sobre la Península Ibérica: izquierda marzo de 2019, derecha marzo de 2020

En el análisis del monóxido de carbono atmosférico, hemos tenido que pre-procesar y promediar 57 imágenes para 2019 y 68 para 2020, lo que ha supuesto un total de 125 imágenes procesadas para obtener los resultados. En este caso, observamos como el comportamiento es similar que para el dióxido de nitrógeno, y es que en el mes de marzo de 2020 podemos ver una significativa reducción en las concentraciones atmosféricas de monóxido de carbono debido, de nuevo, a la pandemia global.

Además, debemos de tener en cuenta que en este caso las unidades difieren del caso anterior, ya que aquí medimos la concentración en partes de billón (ppbv). En el caso de marzo de 2019 (Figura 3.2), vemos como la concentración de monóxido de carbono, a pesar de estar distribuida de una forma homogénea, tiene una mayor concentración (leve) en las zonas costeras, mientras que las zonas de interior tienen una concentración menor. Aún así, si observamos a nivel de detalle, vemos como en las áreas urbanas con mayor actividad vemos un ligero incremento en la concentración. Los píxeles que aparecen en blanco no contienen datos. En marzo de 2020, la concentración de monóxido de carbono sigue siendo homogénea, pero ha sufrido una disminución general debido (inferimos) a las restricciones por la pandemia. También vemos un ligero incremento de concentración en las zonas costeras y grandes áreas urbanas.

Discusión

Nuestros resultados son claros, pero para poder hablar de un modelo de comportamiento, debemos observar otros estudios para poder corroborar que en el período de 2020, las concentraciones de gases contaminantes han disminuido, sobre todo en los meses en los que la pandemia obligó a confinar a la población y a reducir las actividades industriales y los viajes. Es por esto, que vamos a comparar los resultados de nuestro análisis con los de otros estudios, para ver sus similitudes y diferencias. En estos ejemplos, podemos apreciar como en el mismo periodo, al igual que en nuestra península, se produce un descenso de la concentración de dióxido de nitrógeno atmosférico, lo que vendría a verificar nuestra teoría planteada al principio de este apartado, y es que debido a las fuertes restricciones que vivió la población en marzo de 2020 en la mayoría de países, la actividad antrópica disminuyó considerablemente, lo que conllevó una disminución paralela de la emisión de gases contaminantes. Además, debemos destacar que esta reducción es mucho mayor en las grandes áreas industrializadas, como es el caso de China (Figura 4.1), de Francia (Figura 4.2), y las áreas industrializadas de Italia (Figura 4.3), debido a que se impusieron fuertes restricciones y confinamientos que en muchos de los casos supuso un paro para la industria y por ende los procesos de combustión.

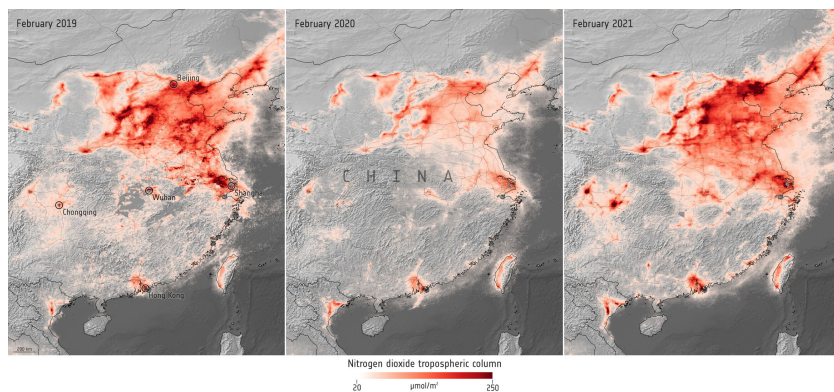


Figura 4.1: Concentración media de dióxido de nitrógeno sobre China. Fuente: ESA.

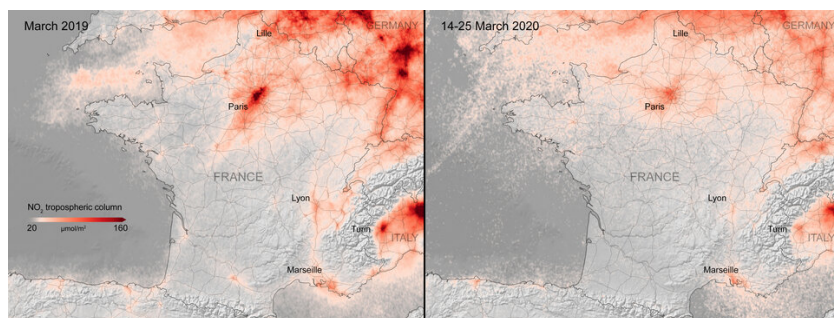


Figura 4.2: Concentración media de dióxido de nitrógeno sobre Francia. Fuente: ESA.

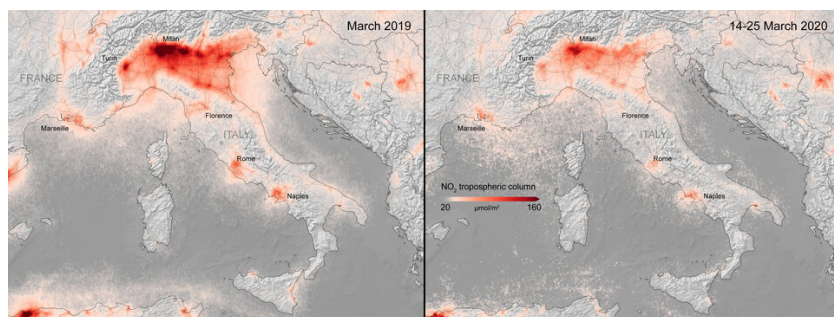


Figura 4.3: Concentración media de dióxido de nitrógeno sobre Italia. Fuente: ESA.

En otros estudios, podemos ver como se comparan distintos gases con el objetivo de comprobar su comportamiento en esta situación excepcional. Un ejemplo es el siguiente del dióxido de azufre en la India (Figura 4.4, Figura 4.5). En este caso podemos ver como los datos están recogido el mes de abril de 2019 y 2020, mes en el que las medidas restrictivas todavía estaban activas, por lo que el escenario

es el mismo, y, al igual que anteriormente, vemos como el país vio reducida su concentración de dióxido de azufre durante el periodo en el que las restricciones estuvieron vigentes.

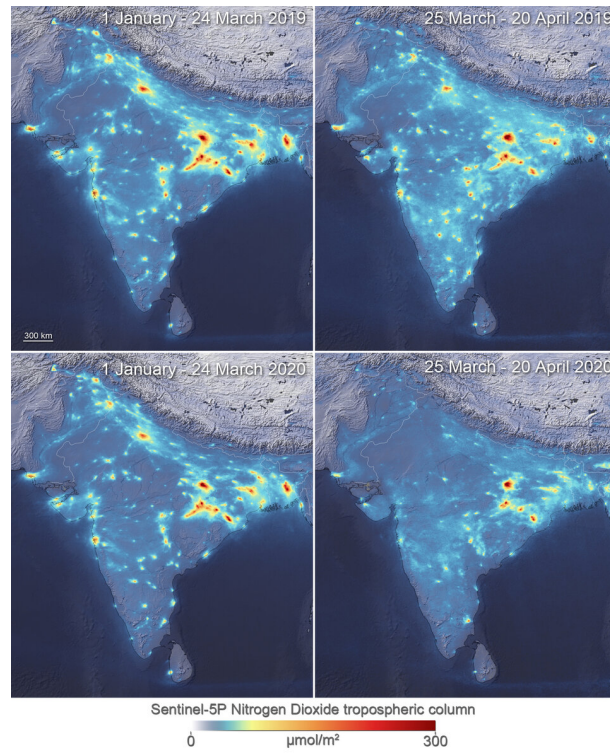


Figura 4.4: Concentración media de dióxido de nitrógeno sobre la India. Fuente: ESA.

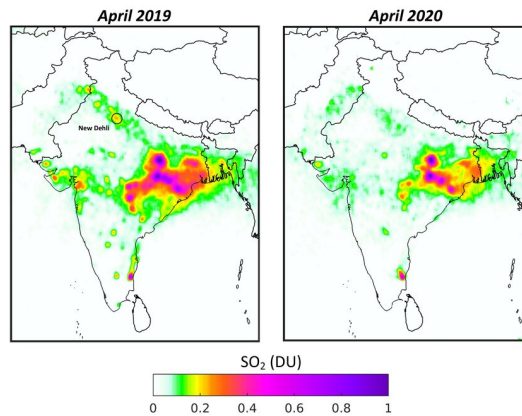


Figura 4.5: Concentración media de dióxido de azufre sobre la India. Fuente: ESA.

Conclusión

En este trabajo hemos podido valorar y analizar las concentraciones de contaminantes en la atmósfera mediante el procesamiento de imágenes de TROPOMI del Sentinel-5P. Hemos podido ver una importante concentración en toda la Península, la cual esta producida, principalmente, por la actividad antrópica en las grandes áreas urbanas debido a la combustión de los combustibles fósiles, principal fuente de esta contaminación.

Además, hemos podido comprobar que el COVID-19 no solo ha supuesto un impacto en el ámbito sanitario de la población, si no que también ha tenido impacto en la atmósfera, ya que gracias a las medidas restrictivas, se han podido disminuir los niveles de contaminación atmosférica. Aún así, debemos de tener en cuenta que estas medidas no son para siempre, y que este descenso no es suficiente, sino que tiene que ser continuo en el tiempo e igual en todos los países para intentar disminuir el efecto del calentamiento global y por ende del cambio climático, un peligro cada vez más presente en nuestro día a día.

Es por tanto una tarea muy importante realizar este tipo de estudios para poder conocer el estado de nuestra atmósfera, y con ello, poder tomar medidas de control y planes de vigilancia que nos ayuden a mejorar el estado del planeta.

Bibliografía

- [Ballester Díez et.al., 1999] Ballester Díez, F., Tenías, J., and Pérez Hoyos, S. (1999). *Efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud: una introducción*. Revista Española Salud Pública, 73(1):109–121.
- [Bauwens, 2020] Bauwens, M. (2020). *Is the global COVID-19-related drop in NO₂ pollution coming to an end?* <https://eo4society.esa.int/2020/05/14/is-the-global-covid-19-related-drop-in-no2-pollution-coming-to-an-end/>.
- [COPERNICUS] *Copernicus*. <https://www.copernicus.eu/es>.
- [COPERNICUS - SENTINEL-5P] Copernicus: Sentinel-5P. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/copernicus-sentinel-5p>.
- [ESA-a, 2020] (2020). Air pollution drops in India following lockdown. https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-5P/Air_pollution_drops_in_India_following_lockdown.
- [ESA-b, 2020] (2020). Coronavirus lockdown leading to drop in pollution across Europe. http://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-5P/Coronavirus_lockdown_leading_to_drop_in_pollution_across_Europe.

- [ESA-c, 2020] (2020). Sulphur dioxide concentrations drop over India during COVID-19. https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-5P/Sulphur_dioxide_concentrations_drop_over_India_during_COVID-19
- [ESA-d, 2021] (2021). Air pollution returning to pre-COVID levels. https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-5P/Air_pollution_returning_to_pre-COVID_levels.
- [Martinez-Ataz & Diaz de Mera Morales, 2004] Matinez Ataz, E. and Díaz de Mera Morales, Y. (2004). *Contaminación atmosférica*. Ediciones de la Universidad de Castilla la Mancha.
- [Sentinel-5P Products] Data Products - Sentinel-5P Mission. <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-5p/data-products>.
- [Sentinel-5P Mission] Sentinel-5P - Missions. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-5p>
- [Sutton et al. 2011] Sutton, M.A, Oenema, O., Erisman, J.W., Leip, A., van Grinsven, H., Winiwarter, W. (2011) Too much of a good thing. *Nature* 472: 159-161
- [TROPOMI] (2017). TROPOMI. <http://www.tropomi.eu>.
- [Park et.al., 2021] Park, H., Jeong, S., Park, H., Labzovskii, L., and Bowman, K. (2021). An assessment of emission characteristics of Northern Hemisphere cities using spaceborne observations of CO₂, CO, and NO₂. *Remote Sensing of the Environment*, Volume 254 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425720306192?via%3Dihub>.
- [Varela et. al., 2017] Varela, Z., Aranda, S., Estébanez Pérez, B., Medina, N., and Boquete, M. (2017). Empleo de criptógamas como herramienta ecológica de biomonitorización del depósito de nitrógeno en la península ibérica. *Ecosistemas*, 26(1):45–54.

Anexo

Código Python - Dióxido de nitrógeno.

Cargar los módulos Python.

try :

```
from matplotlib import pyplot as plt # Visualization
from termcolor import colored # Print colored text
import cartopy.crs as ccrs # Projected visualizations
import matplotlib.colors as colors # colors for visualization
import xarray as xr # Process netCDF S-5p data
import numpy as np # Data manipulation
import cartopy # improved visualizations
import matplotlib.gridspec as gridspec # create subplot
from glob import iglob #data access in file manager
from os.path import join # same
from functools import reduce # string manipulation
import pandas as pd # data manipulation
import harp # Preprocess L2 to L3 Sentinel5p data
```



```

from harp._harppy import NoDataError
# import specific error that may happen when processing L2 to L3
import itertools # dict manipulation
import cartopy.feature as cf
from cartopy.mpl.gridliner
import LONGITUDE_FORMATTER, LATITUDE_FORMATTER
import matplotlib.patches as mpatches
import imageio # create gif
import ipywidgets as widgets
except ModuleNotFoundError:
    print ( 'Module_import_error' )
else:
    print( colored( '\nAll_libraries_properly_loaded._Ready_to_start!!!',
    'green' ), '\n' )

```

Explorar los datos sentinel utilizando XARRAY

```

# Look for NO2 products in target folder
product_path = "Ruta_donde_se_encuentran_los_archivos_a_procesar"
input_files_OFFL = sorted(list(iglob(join(product_path, '**',
'*OFFL*NO2*.nc'), recursive=True)))
input_files_NRTI = sorted(list(iglob(join(product_path, '**',
'*NRTI*NO2*.nc'), recursive=True)))
print( colored( 'NO2_OFFL_products_detected:', 'blue' ),
len(input_files_OFFL))
print( colored( 'NO2_NRTI_products_detected:', 'blue' ),
len(input_files_NRTI))

# Select Level 2 NO2 product to be explored

```

```

s5p_file = input_files_NRTI[0]
print(colored('Product_selected_for_analysis:', 'blue'), s5p_file)

# Open product - Global attributes
with xr.open_dataset(s5p_file) as s5p_img_GA:
    print(colored('Global_attributes_of_product:\n', 'blue'), s5p_img_GA)

# Open product - GROUP METADATA/GRANULE_DESCRIPTION
with xr.open_dataset(s5p_file, group='METADATA/GRANULE_DESCRIPTION')
as s5p_img_MT:
    print(colored('\nMETADATA/GRANULE_DESCRIPTION_Group:\n', 'blue'),
s5p_img_MT)

# Open product - GROUP PRODUCT
with xr.open_dataset(s5p_file, group='PRODUCT') as s5p_img_PRD:
    print(colored('\nPRODUCT_Group:\n', 'blue'), s5p_img_PRD)

```

Acceso a los grupos.

```

# Open product - GROUP PRODUCT
no2 = s5p_img_PRD['nitrogen_dioxide_tropospheric_column']
print(colored('Dimension:names_for_each_axis(e.g.,("x","y","z")):',
'blue'), no2.dims)
print(colored('\nCoordinates:dict-like_container_of_arrays
that_label_each_point:', 'blue'), no2.coords)
print(colored('\nAttributes:dict_to_hold_arbitrary_metadata(attributes):
\n', 'blue'), no2.attrs)
print(colored('\nValues:a_numpy.ndarray_holding_the_array_values:

```

```
\n', 'blue'), no2.values)
```

Acceso a las variables.

```
# Open product - GROUP PRODUCT
no2 = s5p_img_PRD['nitrogen_dioxide_tropospheric_column']
print(colored('Dimension: _names_for_each_axis_(e.g., _("x", _"y", _"z")):',
'blue'), no2.dims)
print(colored('\nCoordinates: _dict-like_container_of_arrays_that
label_each_point:', 'blue'), no2.coords)
print(colored('\nAttributes: _dict_to_hold_arbitrary_metadata
(attributes):\n', 'blue'), no2.attrs)
print(colored('\nValues: _a_numpy.ndarray_holding_the_array_values:
\n', 'blue'), no2.values)
```

Graficar las variables.

```
# Convert values to molecules/cm2
no2 = no2 * no2.multiplication_factor_to_convert_to_molecules_per_cm2

# First visualization. Simple plot
plt.figure(figsize=(14,6))
ax = plt.axes()
no2[0].plot.pcolormesh(ax=ax, x='longitude', y='latitude',
add_colorbar=True, cmap='magma_r', vmin=0);

# Second visualization using Cartopy and Orthographic projection
plt.figure(figsize=(17,12))
ax = plt.axes(projection=ccrs.Orthographic(11, 42))
```

```

no2[0].plot.pcolormesh(ax=ax, x='longitude', y='latitude',
add_colorbar=True, cmap='magma_r', transform=ccrs.PlateCarree(),
vmin=0)
ax.add_feature(cartopy.feature.RIVERS)
ax.set_title('S-5p_L2_NO$2$(2020-03-26)_|_qa_value_>_0')
ax.coastlines('10m')
#ax.set_global()
ax.stock_img()
ax.gridlines()

# Add Rome and Milan to map
ax.plot(12.496366, 41.902782, 'bo', markersize=7,
transform=ccrs.PlateCarree())
ax.text(13, 42, 'Rome', transform=ccrs.Geodetic())
ax.plot(9.118744, 45.2752790, 'bo', markersize=7,
transform=ccrs.PlateCarree())
ax.text(9.5, 45.5, 'Milan', transform=ccrs.Geodetic())
ax.text(-3.7, 40.8, 'Madrid', transform=ccrs.Geodetic());

# Save figure to file
plt.savefig('Ruta_seleccionada_para_el_resultado',
bbox_inches='tight', dpi=300)

```

Graficar a partir de un umbral de calidad.

```
no2_filter = no2.where(s5p_img_PRD['qa_value'] > 0.75, drop=True)

# Plot original data vs quality flag
plt.figure(figsize=(30, 10))

# Plot qa_value image
ax1 = plt.subplot(121, projection=ccrs.Orthographic(11, 42))
s5p_img_PRD['qa_value'][0].plot.pcolormesh(ax=ax1, x='longitude',
y='latitude',
add_colorbar=True, cmap='Spectral', transform=ccrs.PlateCarree())
ax1.set_title('S-5p-L2-NO$ _2$(2020-03-26)
|_Quality_Flag_Layer')
ax1.add_feature(cartopy.feature.LAND, edgecolor='black')
ax1.add_feature(cartopy.feature.OCEAN)
ax1.add_feature(cartopy.feature.RIVERS)
ax1.coastlines('10m')
ax1.gridlines()

# Plot masked NO2 data
ax2 = plt.subplot(122, projection=ccrs.Orthographic(11, 42))
no2_filter[0].plot.pcolormesh(ax=ax2, x='longitude', y='latitude',
add_colorbar=True, cmap='magma_r', transform=ccrs.PlateCarree(), vmin=0)
ax2.set_title('Filtered_S-5p-L2-NO$ _2$(2020-03-26)
|_Quality_Flag_Layer_>_0.75')
ax2.add_feature(cartopy.feature.RIVERS)
ax2.coastlines('10m')
ax2.stock_img()
ax2.gridlines()
```

```
# Save figure to file
plt.savefig('Ruta_seleccionada_para_el_resultado',
bbox_inches='tight', dpi=300)
```

Establecer un entorno geográfico.

```
# Define AOI (coordinates UR and LL corners lat/lon order)
and subset product
ur = (42, -2.5)
ll = (39, -4.5)

no2_subset = no2_filter.where((no2_filter.longitude < ur[1]) &
(no2_filter.longitude > ll[1]) & (no2_filter.latitude > ll[0]) &
(no2_filter.latitude < ur[0]), drop=True)

# Plot subset
plt.figure(figsize=(12,12))
ax = plt.axes(projection=ccrs.Orthographic(11, 42))

stt_prv = cf.NaturalEarthFeature(category='cultural',
name='admin_1_states_provinces_lines',
scale='10m',facecolor='none')

no2_subset[0].plot.pcolormesh(ax=ax, x='longitude', y='latitude',
add_colorbar=True, cmap='magma_r',transform=ccrs.PlateCarree(),
vmin=0)
ax.add_feature(cartopy.feature.LAND, edgecolor='black')
ax.add_feature(stt_prv, linewidth=0.2, edgecolor='black')
```

```

ax.set_title('NO2 Concentrations over Madrid (2020-03-26)
|_qa_value_>_0.75 ')

# Add POI to map
ax.text(-3.7, 40.8, 'Madrid', transform=ccrs.Geodetic());

# Save figure to file
plt.savefig('Ruta_seleccionada_para_el_resultado', dpi=300)

```

Análisis multi - temporal Sentinel -5p (HARP+XARRAY)

Pre - analisis HARP - Generación de productos Sentinel - 5p L3.

```

# Export path
export_path = 'Ruta_donde_ser_n_guardados_los_archivos'

# Create widget bar to monitor progres
f = widgets.IntProgress(min=0, max=len(input_files_OFFL),
description='Processing_images', bar_style='info')
display(f)
count = 0

# Create list to store non_processed data in case it happens
not_processed = []

for i in input_files_OFFL:
    try:
        f.value += 1

```

```

        harp_L2_L3 = harp.import_product(i, operations="\
        ~~~~~tropospheric_NO2_column_number_density_validity>75;\
        ~~~~~derive(tropospheric_NO2_column_number_density_[Pmolec/cm2]);\
        ~~~~~derive(datetime_stop_{time});\
        ~~~~~latitude > 43.6 [degree_north]; latitude < 47.2 [degree_north];\
        ~~~~~longitude > 7.6 [degree_east]; longitude < 13.7 [degree_east];\
        ~~~~~bin_spatial(360, 43.6, 0.01, 610, 7.6, 0.01);\
        ~~~~~derive(latitude_{latitude}); derive(longitude_{longitude});\
        ~~~~~keep(NO2_column_number_density,\
        ~~~~~tropospheric_NO2_column_number_density,\
        ~~~~~stratospheric_NO2_column_number_density,\
        ~~~~~NO2_slant_column_number_density, tropopause_pressure,\
        ~~~~~absorbing_aerosol_index, cloud_fraction,\
        ~~~~~datetime_start, longitude, latitude)")
        export_folder = "{export_path}/{name}".format(export_path=export_path,
        name=i.split('/')[-1].replace('L2', 'L3'))
        harp.export_product(harp_L2_L3, export_folder, file_format='netcdf')
    except NoDataError:
not_processed.append(i)

print(len(input_files_OFFL)-len(not_processed), '/',
len(input_files_OFFL),
colored('L2_products_converted_to_L3. Check "not_processed"
for reference of non_processed_L2_products.', 'green'))

# Save two original attributes from the L2 product (time_coverage_start and
time_coverage_end)
attributes = {
    i.split('/')[-1]: {

```



```

        'time_coverage_start': xr.open_dataset(i).attrs
        ['time_coverage_start'],
        'time_coverage_end': xr.open_dataset(i).attrs
        ['time_coverage_end'],
    } for i in input_files_OFFL
}
# Print only first items in dictionary as example
dict(itertools.islice(attributes.items(), 1))

```

Análisis multi - temporal.

```

# Create list of L3 products
filename_L3 = sorted(list(iglob(join(export_path, '**', '*L3__NO2*.nc'),
recursive=True)))

# Creates a time coordinate with np datatype datetime64.
Important to allow time indexing later
def preprocess(ds):
    ds['time'] = pd.to_datetime(np.array([attributes[ds.attrs
    ['source_product']]
    ['time_coverage_start']])).values
    return ds

L3_MCH_19_20 = xr.open_mfdataset(filename_L3, combine='nested',
concat_dim='time', preprocess=preprocess, chunks={'time': 100})
L3_MCH_19_20

L3_MCH_19 = L3_MCH_19_20.sel(time=slice('2019-03-01', '2019-03-31'))

```

```

L3_MCH_19 = L3_MCH_19.resample(time='1D').mean(dim='time', skipna=None)

L3_MCH_20 = L3_MCH_19_20.sel(time=slice('2020-03-01', '2020-03-31'))
L3_MCH_20 = L3_MCH_20.resample(time='1D').mean(dim='time', skipna=None)

print(colored('Dataset_for_March_2019:\n', 'blue'),L3_MCH_19,
      colored('\n\nDataset_for_March_2020:\n', 'blue'),L3_MCH_20)

# Mean value for February 2019
L3_MCH_19_mean = L3_MCH_19.mean(dim='time')
no2_MCH_19_mean = L3_MCH_19_mean['tropospheric_NO2_column_number_density']

# Mean value for February 2020
L3_MCH_20_mean = L3_MCH_20.mean(dim='time')
no2_MCH_20_mean = L3_MCH_20_mean['tropospheric_NO2_column_number_density']

print(colored('Dataset_for_March_2019:\n', 'blue'),no2_MCH_19_mean,
      colored('\n\nDataset_for_March_2020:\n', 'blue'),no2_MCH_20_mean)

# Select month to display
data = no2_MCH_20_mean # change by 'no2_MCH_19_mean' accordingly
year = 2020 # change by '2020' accordingly

# Image desing
fig = plt.figure(figsize=(18, 6))

# Main map
ax = fig.add_subplot(1,1,1, projection=ccrs.PlateCarree())
ax.set_extent([6, 15, 43, 47.5])

```

```

states_provinces = cf.NaturalEarthFeature(
    category='cultural',
    name='admin_0_countries',
    scale='10m',
    facecolor='#DEDEDE')

im = data.plot.pcolormesh(ax=ax, transform=ccrs.PlateCarree(),
cmap='magma_r',
vmin=0, vmax=15, x='longitude', y='latitude', zorder=3)
im.colorbar.remove()

# Add text
ax.text(0, 1.07, 'Average_NO2_concentrations', fontsize = 17,
transform=ax.transAxes)
ax.text(0, 1.02, 'North_of_Italy ,_March_{ }'.format(year),
fontsize = 13, transform=ax.transAxes)
ax.text(0.61, -0.21, "Data:_ESA_Sentinel-5p/_TROPOMI\nCredits:
Contains_Copernicus_data_(2020)_processed_by_RUS_Copernicus", fontsize=12,
color='gray', multialignment='right',transform=ax.transAxes)

# add countries
ax.add_feature(states_provinces, edgecolor='black')

ax.coastlines("10m", zorder=3);
ax.add_feature(cartopy.feature.BORDERS.with_scale('10m'), zorder=3)

# set colorbar properties
cbar_ax = fig.add_axes([0.25, -0.015, 0.25, 0.01])

```

```

cbar = plt.colorbar(im, cax=cbar_ax, orientation='horizontal',
ticks=[0,1,5,10,15])
cbar.set_label(r"$10^{\{15\}}$ _molecules_/_cm$_2$)", labelpad=-50,
fontsize=14)
cbar.outline.set_visible(False)
cbar.ax.set_yticklabels(['0', '1', '5', '10', '15'])

# set plot frame color
gl = ax.gridlines(draw_labels=True, linewidth=1, color='gray', alpha=0.3,
linestyle=':')
gl.xlabel_top = False
gl.ylabel_right = False
gl.xformatter = LONGITUDE_FORMATTER
gl.yformatter = LATITUDE_FORMATTER

# Italy map
ax = fig.add_subplot(2,5,10, projection=ccrs.PlateCarree())
#nrwo ncol index
ax.set_extent([5, 19,36, 49])
ax.add_feature(states_provinces, linewidth=0.5, edgecolor='black')
ax.add_patch(mpatches.Rectangle(xy=[7.6, 43.6], width=5.9, height=2.9,
facecolor='blue', alpha=0.3, transform=ccrs.PlateCarree(), zorder=3))

# Save figure to file
plt.savefig('Ruta_para_el_resultado'.format(year),
bbox_inches='tight', dpi=600);

# Create a gif to show the difference
filenames = ['Seleccion_del_resultado_1', 'Seleccion_del_resultado_2']

```

```

images = []
for filename in filenames:
    images.append(imageio.imread(filename))
imageio.mimsave('Ruta_para_el_resultado_final', images, fps=1)

```

Código Python - Monóxido de carbono.

En este caso, como ya hemos comentado al explicar la metodología, podemos ver como los pasos 1 y 2 (visto en el anexo 6.1.1 y 6.1.2) son iguales, siendo la única diferencia el cambiar de condiciones, ya que cuando se menciona NO2 en el código debe ser sustituido por CO.

En el paso 3, vemos como los cambios son mayores, por lo que vamos a dejarlo anexado en este apartado.

Análisis multi - temporal Sentinel -5p (HARP+XARRAY)

Pre - analisis HARP - Generación de productos Sentinel - 5p L3.

```

# Look for NO2 products in target folder
product_path = "Ruta_donde_encontramos_los_archivos_a_procesar"
input_files_OFFL = sorted(list(iglob(join(product_path, '**',
'*OFFL*CO*.nc'), recursive=True)))
print(colored('CO_OFFL_products_detected:', 'blue'),
len(input_files_OFFL))

# Select Level 2 NO2 product to be explored
s5p_file = input_files_OFFL[0]
print(colored('Product_selected_for_analysis:', 'blue'), s5p_file)

```

```

# Export path
export_path = 'Ruta_donde_se_exportar_n_los_productos_exportados'

# Create widget bar to monitor progres
f = widgets.IntProgress(min=0, max=len(input_files_OFFL),
description='Processing_images', bar_style='info')
display(f)
count = 0
print(input_files_OFFL)

# Create list to store non_processed data in case it happens
not_processed = []

for i in input_files_OFFL:
    try:
        f.value += 1
        harp_L2_L3 = harp.import_product(i, operations="\
        CO_column_number_density_validity>50;\
        derive(CO_column_volume_mixing_ratio_{time}_[ppbv]);\
        derive(datetime_stop_{time});\
        latitude_>35.0_[degree_north];_latitude_<45.0_[degree_north];_longitude
        bin_spatial(2160,_35.0,_0.01,_3660,_-10.0,_0.01);\
        derive(latitude_{latitude});_derive(longitude_{longitude});\

        keep(CO_column_volume_mixing_ratio,CO_column_number_density,datetime_st
        export_folder = "{export_path}/{name}".format(export_path=export_path,
        name=i.split('/')[-1].replace('L2', 'L3'))
        harp.export_product(harp_L2_L3, export_folder, file_format='netcdf')
    except NoDataError:

```

```

not_processed.append(i)

print(len(input_files_OFFL)-len(not_processed), '/', len(input_files_OFFL),
      colored('L2_products_converted_to_L3._Check_"not_processed"_for
reference_of_non_processed_L2_products.', 'green'))

# Save two original attributes from the L2 product (time_coverage_start and
time_coverage_end)
attributes = {
    i.split('/')[-1]: {
        'time_coverage_start': xr.open_dataset(i).attrs
        ['time_coverage_start'],
        'time_coverage_end': xr.open_dataset(i).attrs
        ['time_coverage_end'],
    } for i in input_files_OFFL
}

# Print only first items in dictionary as example
dict(itertools.islice(attributes.items(), 1))

len(attributes)

```

Análisis multi - temporal.

```

# Create list of L3 products
filename_L3 = sorted(list(iglob(join('Ruta_donde_se_encuentran_los_archivos*.nc'))),
len(filename_L3)

# Creates a time coordinate with np datatype datetime64.

```

Important to allow time indexing later

```
def preprocess(ds):
```

```
    ds['time'] = pd.to_datetime(np.array([attributes[ds.attrs
    ['source_product']] ['time_coverage_start']])).values
```

```
    return ds
```

```
L3_MCH_19_20 = xr.open_mfdataset(filename_L3, combine='by_coords',
concat_dim='time', preprocess=preprocess, chunks={'time': 100})
```

```
L3_MCH_19_20
```

```
L3_MCH_19 = L3_MCH_19_20.sel(time=slice('2019-03-28', '2019-03-31'))
```

```
L3_MCH_19 = L3_MCH_19.resample(time='1D').mean(dim='time', skipna=None)
```

```
L3_MCH_20 = L3_MCH_19_20.sel(time=slice('2020-03-01', '2020-03-31'))
```

```
L3_MCH_20 = L3_MCH_20.resample(time='1D').mean(dim='time', skipna=None)
```

```
print(colored('Dataset_for_March_2019:\n', 'blue'),L3_MCH_19,
colored('\n\nDataset_for_March_2019:\n', 'blue'),L3_MCH_19)
```

```
print(colored('\n\nDataset_for_March_2020:\n', 'blue'),L3_MCH_20)
```

```
# Mean value for February 2019
```

```
L3_MCH_19_mean = L3_MCH_19.mean(dim='time')
```

```
CO_MCH_19_mean = L3_MCH_19_mean['tropospheric_CO_column_number_density']
```

```
# Mean value for March 2020
```

```
L3_MCH_20_mean = L3_MCH_20.mean(dim='time')
```

```
CO_MCH_20_mean = L3_MCH_20_mean['CO_column_volume_mixing_ratio']
```



```

print(colored('Dataset_for_March_2019:\n', 'blue'),CO_MCH_19_mean,
colored('\n\nDataset_for_March_2020:\n', 'blue'),CO_MCH_20_mean)

print(colored('\n\nDataset_for_March_2020:\n', 'blue'),CO_MCH_20_mean)

# Select month to display
data = CO_MCH_20_mean # change by 'no2_MCH_19_mean' accordingly
year = 2020 # change by '2020' accordingly

# Image desing
fig = plt.figure(figsize=(18, 6))

# Main map
ax = fig.add_subplot(1,1,1, projection=ccrs.PlateCarree())
#ax.set_extent([6, 15, 43, 47.5])
ax.set_extent([-10, 5, 35, 45])

states_provinces = cf.NaturalEarthFeature(
    category='cultural',
    name='admin_0_countries',
    scale='10m',
    facecolor='#DEDEDE')

im = data.plot.pcolormesh(ax=ax, zorder=2, cmap='viridis',
vmin=75, vmax=125)
#im = data.plot.pcolormesh(ax=ax, transform=ccrs.PlateCarree(), vmin=0,
vmax=15, x='longitude', y='latitude')
im.colorbar.remove()

```

```

# Add text
ax.text(0, 1.07, 'Average_CO_concentrations', fontsize = 17,
transform=ax.transAxes)
ax.text(0, 1.02, 'Peninsula_Ib_rica ,_March_{ }'.format(year),
fontsize = 13, transform=ax.transAxes)
#ax.text(0.61, -0.21, "Data: ESA Sentinel-5p / TROPOMI\n
Credits: Contains Copernicus data (2020) processed by RUS
Copernicus", _fontsize=12, _color='gray', _multialignment='right',
transform=ax.transAxes)

#_add_countries
ax.add_feature(states_provinces, _edgecolor='black')

ax.coastlines("10m", _zorder=3);
ax.add_feature(cartopy.feature.BORDERS.with_scale('10m'), zorder=3)

#_set_colorbar_properties
cbar_ax=_fig.add_axes([0.25, _-0.015, _0.25, _0.01])
cbar=_plt.colorbar(im, _cax=cbar_ax, _orientation='horizontal')#,
ticks=[0,25,50,100,150])
cbar.set_label(r"ppbv", _labelpad=-50, _fontsize=14)
cbar.outline.set_visible(False)
#cbar.ax.set_yticks(['0', '1', _'5', _'10', _'15'])
#cbar.ax.set_yticklabels(['0', '1', _'5', _'10', _'15'])

#_set_plot_frame_color
gl=_ax.gridlines(draw_labels=True, _linewidth=1, _color='gray',
alpha=0.3, _linestyle=':')
gl.top_labels=_False

```

```

gl.right_labels = False
gl.xformatter = LONGITUDE_FORMATTER
gl.yformatter = LATITUDE_FORMATTER

# Save figure to file
plt.savefig('Ruta_y_nombre_donde_guardar_el_archivo_resultado.png'.
format(year), bbox_inches='tight', dpi=600);

# Create a gif to show the difference
filenames = ['Ubicacion_de_la_imagen_de_2019',
'Ubicacion_de_la_imagen_de_2020']
images = []
for filename in filenames:
    images.append(imageio.imread(filename))
imageio.mimsave('Ruta_y_nombre_del_archivo_donde_guardar
el_resultado.gif', images, fps=1)

```

Anexo 2

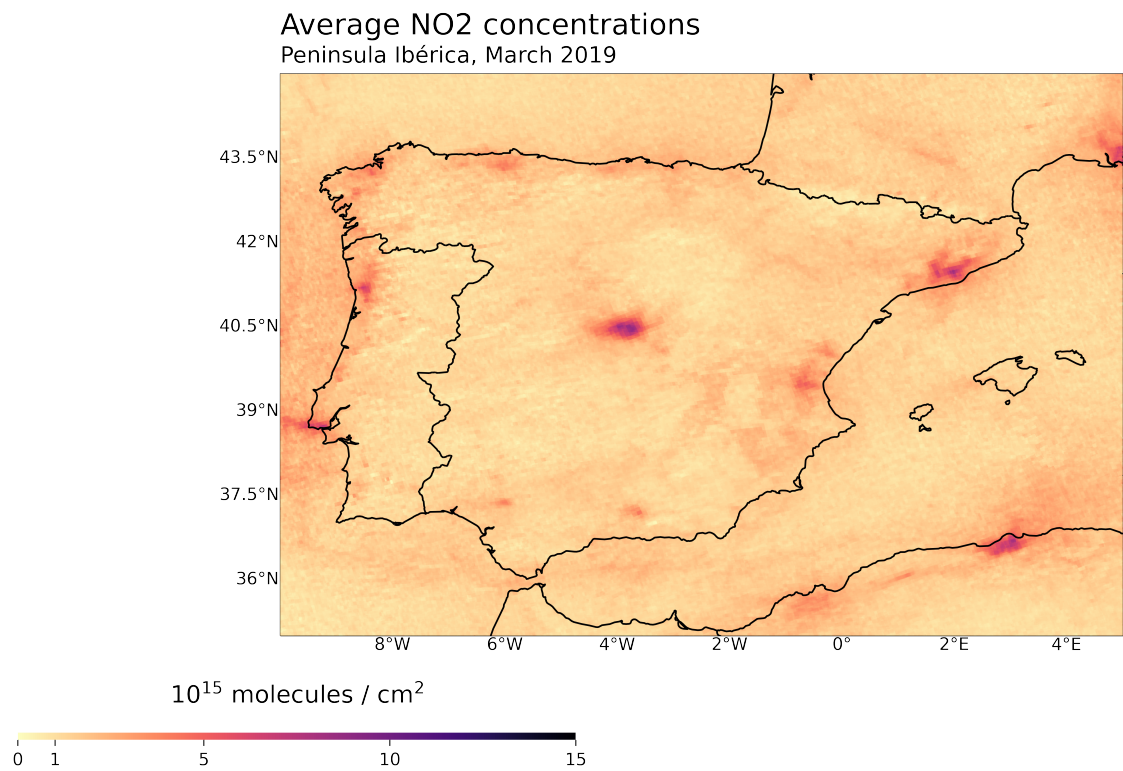


Figura 5.1: Concentración media de dióxido de nitrógeno sobre la Península Ibérica en 2019

Average NO₂ concentrations
Península Ibérica, March 2020

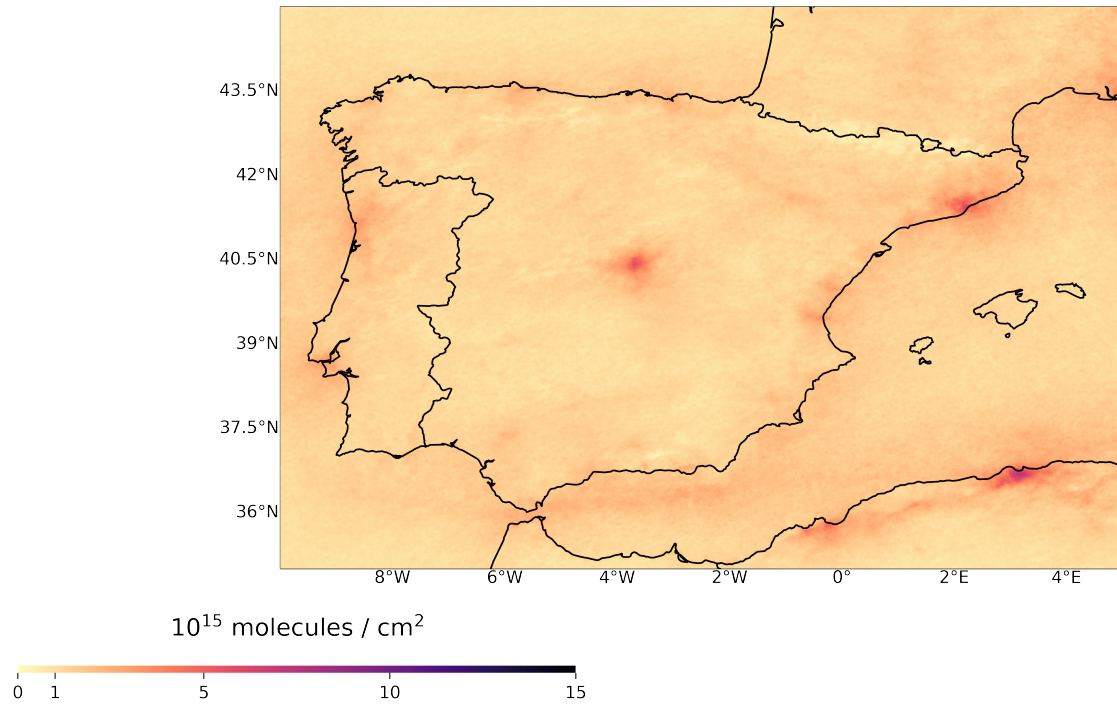


Figura 5.2: Concentración media de dióxido de nitrógeno sobre la Península Ibérica en 2020.

Average CO concentrations
Península Ibérica, March 2019

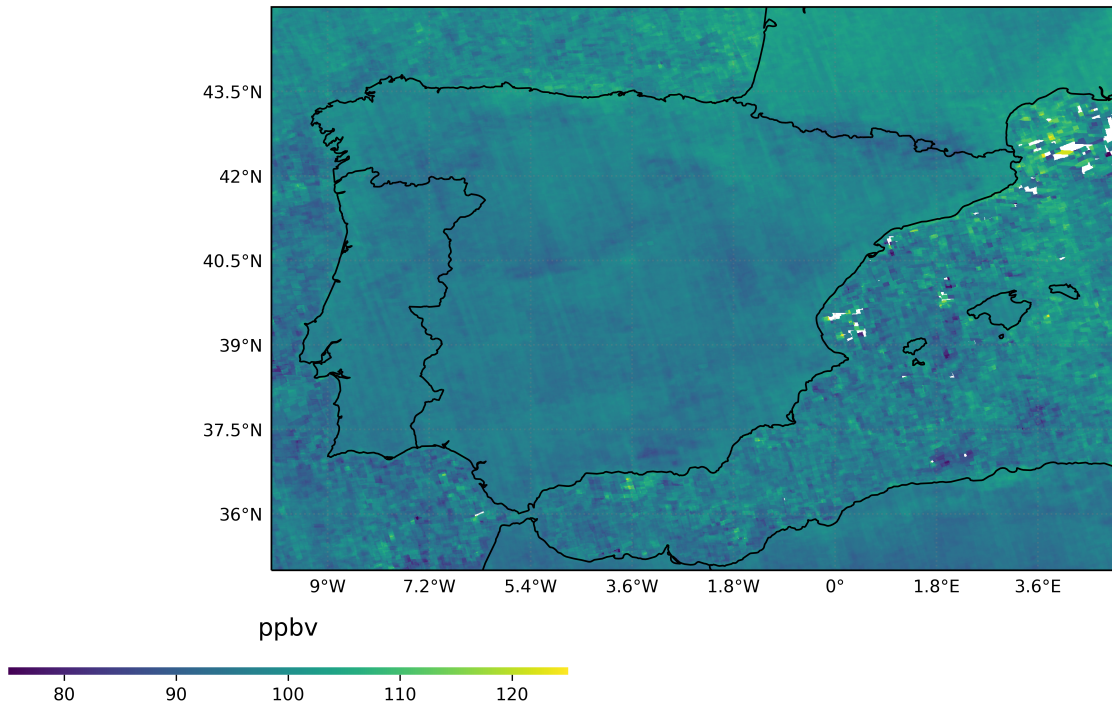


Figura 5.3: Concentración media de monóxido de carbono sobre la Península Ibérica en 2019.

Average CO concentrations
Península Ibérica, March 2020

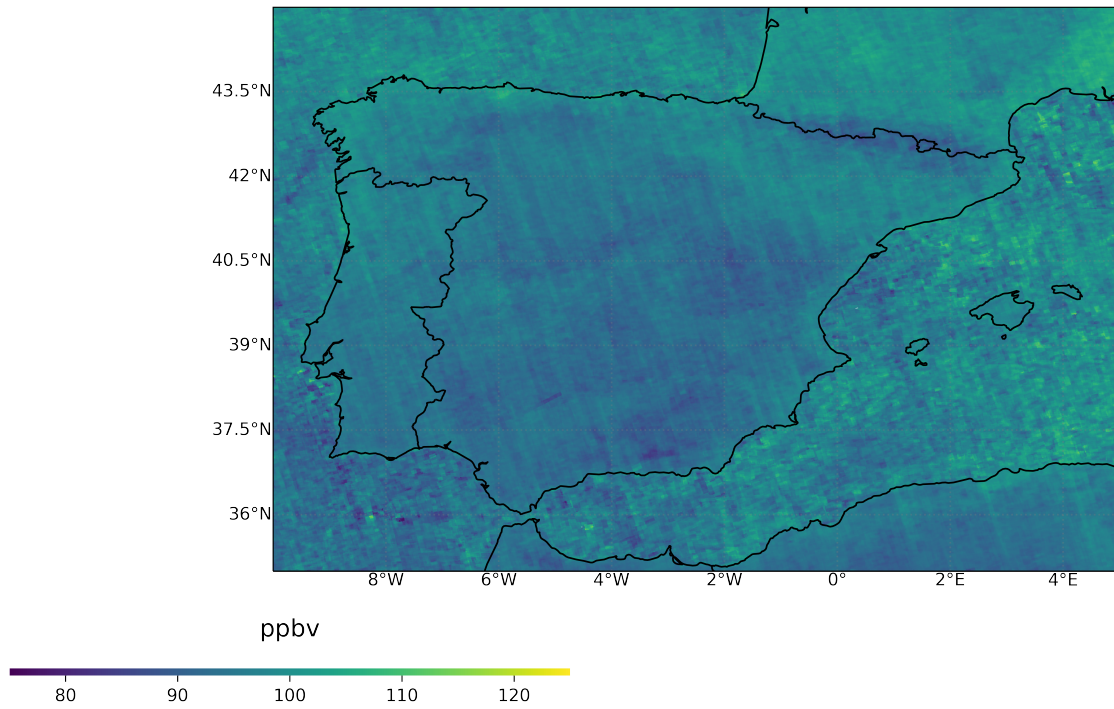


Figura 5.4: Concentración media de monóxido de carbono sobre la Península Ibérica en 2020.