



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE  
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

---

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

**La Terra vista dal cielo: l'area metropolitana di Roma**  
**The Earth observed from the sky:**  
**the metropolitan area of Rome**

*Relatore:*

**Prof. Ing. Giorgio PASSERINI**

*Tesi di laurea di:*

**Domitilla Flavia DE RUBEIS**

*Correlatore:*

**Dott. Umberto RIZZA**

Anno accademico 2018/2019

# INDICE

1. INTRODUZIONE.....	3
1.1. L'ATMOSFERA.....	6
1.1.1. PLANETARY BOUNDARY LAYER.....	8
1.2. INQUINANTI ATMOSFERICI .....	10
1.2.1. SO <sub>x</sub> : OSSIDI DI ZOLFO - SO <sub>2</sub> : ANIDRIDE SOLFOROSA .....	14
1.2.2. CO: MONOSSIDO DI CARBONIO .....	15
1.2.3. NO <sub>x</sub> : OSSIDI DI AZOTO – NO <sub>2</sub> : NITRITO .....	17
1.2.4. O <sub>3</sub> : OZONO.....	19
2. MATERIALI E METODI.....	21
2.1. TELERILEVAMENTO .....	21
2.2. SENSORI.....	25
2.2.1. CLASSIFICAZIONE DEI SENSORI .....	27
2.2.2. COMPONENTI DEI SENSORI .....	29
2.3. STORIA DEI SATELLITI .....	32
2.4. DESCRIZIONE DEI DATI SATELLITARI .....	34
2.4.1. Earth Observing System Data and Information System (EOSDIS).....	34
2.4.2. Livelli di elaborazione dati .....	35
2.4.3. Earth Observing System (EOS).....	36

2.4.4.	AURA.....	37
2.4.5.	OMI .....	38
2.4.6.	TERRA.....	39
2.4.7.	MOPITT .....	40
2.5.	GIOVANNI.....	41
2.6.	PANOPLY .....	41
3.	RISULTATI E DISCUSSIONE.....	43
3.1.	Mappe 2D georeferenziate .....	44
3.1.1.	SO <sub>2</sub> .....	45
3.1.2.	CO.....	49
3.1.3.	NO <sub>2</sub> .....	51
3.1.4.	O <sub>3</sub> .....	53
3.2.	Serie temporali.....	55
3.2.1.	SO <sub>2</sub> .....	56
3.2.2.	CO.....	60
3.2.3.	NO <sub>2</sub> .....	64
3.2.4.	O <sub>3</sub> .....	68
4.	CONCLUSIONI .....	72
5.	BIBLIOGRAFIA .....	74

## 1. INTRODUZIONE

L'Ozone Monitoring Instrument (OMI) a bordo del satellite Aura della NASA nell'ambito del programma "Earth Observing System (EOS)" ha fornito osservazioni globali sui livelli di ozono e sui principali gas inquinanti atmosferici, come il biossido di azoto ( $\text{NO}_2$ ) e il biossido di zolfo ( $\text{SO}_2$ ) dall'ottobre del 2004. I dati registrati forniscono una copertura spaziale e temporale coerente e consentono lo studio delle emissioni antropogeniche e naturali su scala locale e/o globale. In questo contesto, Krotkov et al., (2015) hanno esaminato i trends di  $\text{SO}_2$  e  $\text{NO}_2$  sulle regioni più industrializzate del pianeta nel primo decennio di misurazioni del sensore OMI (2005-2015) (Krotkov, et al., 2015)

È interessante notare come negli ultimi 20 anni i progressi nel telerilevamento satellitare hanno reso le osservazioni spaziali un aspetto sempre più importante nel campo della fisica e chimica dell'atmosfera e nella gestione della qualità dell'aria.

Questo progresso è stato facilitato dall'utilizzo degli spettrometri a frequenze UV (Ultra-Violet) più moderni, come l'OMI. In particolare, in una ricerca recente viene dimostrato che è possibile, utilizzando la tecnica "*principal component analysis*" (PCA), continuare il monitoraggio globale dell'inquinamento da  $\text{SO}_2$  a lungo termine dell'OMI con il più recente OMPS (Ozone Mapping and Profiler Suite). (Zhang, et al., 2017)

Per validare i dati di OMI sono state effettuate varie ricerche tra cui quella di G. C. M. Vinken et al. tra il 2005 e il 2006 in cui sono state analizzate le emissioni di  $\text{NO}_2$  troposferico del Mar Baltico, del Mare del Nord, del Golfo di Biscaglia e del Mar Mediterraneo. Questi dati sono stati poi confrontati con il modello chimico GEOS-Chem. (Vinken, et al., 2014)

Per quanto concerne, invece, il MOPITT, ovvero il satellite utilizzato per il monitoraggio del CO, tra il 2005 e il 2015 è stato condotto uno studio da Palve et al., (2018), nel quale sono stati usati i dati del MOPITT per esaminare le sorgenti di CO in India, la variabilità ed il trasporto durante l'anno. Si è osservato che durante i mesi invernali le emissioni di CO in alcune regioni sono state molto più elevate rispetto ai mesi

estivi e che l'aumento delle emissioni veicolari e dell'attività industriale dopo il 2010 ha favorito l'aumento delle emissioni di CO nelle stesse aree. (Palve, et al., 2018)

Sempre in India, Ghude et al., (2011) hanno usato i dati giornalieri di CO troposferico dal sensore MOPITT, tra il 2000 e il 2007 per esaminare le emissioni regionali di CO ed il suo trasporto durante il monsone estivo/invernale, concentrandosi sul subcontinente indiano (Ghude, et al., 2011).

Casi studio precedenti nell'area asiatica relativi all'utilizzo del sensore appena citato sono da ricondursi a Tanimoto et al., (2008) del National Institute for Environmental Studies (Tanimoto, et al., 2008) e a Kar et al., (2004) dell'University of Toronto (Kar, et al., 2004). In particolare, sono stati pubblicati articoli che riguardano la validazione dei dati del MOPITT come, ad esempio, quello di L. K. Emmons dell'Atmospheric Chemistry Division (Emmons, et al., 2004)

Gli inquinanti presenti in atmosfera possono raggiungere delle concentrazioni rilevanti soprattutto in aree metropolitane e in aree industrializzate. È il caso dell'area metropolitana di Roma oggetto di questa tesi.

È stata condotta un'analisi dei dati satellitari degli inquinanti SO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>2</sub> e O<sub>3</sub> negli anni dal 2008 al 2017. I satelliti ai quali si è fatto riferimento sono Aura e Terra e, in particolare, i rispettivi sensori OMI per l'SO<sub>2</sub>, l'NO<sub>2</sub> e l'O<sub>3</sub> e MOPITT per il CO.

Nella prima parte dell'analisi, sono state generate le mappe georeferenziate tramite un procedimento che verrà di seguito brevemente descritto e sono state analizzate le medie annuali. Nella seconda parte, che riguarda le serie temporali, sono stati osservati sia i dati mensili che quelli annuali e, infine, è stato dedotto l'andamento nel decennio in analisi.

Innanzitutto, utilizzando il web portal GIOVANNI (Geospatial Interactive Online Visualization AND aNalysis Infrastructure), sviluppato dal Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (NASA/ GES DISC), collegato con la banca dati Earth Observing System Data and Information System (EOSDIS), sono stati scaricati i dati in formato netCDF (<https://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/>). Successivamente,

tramite il programma grafico denominato Panoply (<https://www.giss.nasa.gov/tools/panoply/>), i file ottenuti sono stati elaborati sottoforma di mappe georeferenziate 2D. Queste mostrano, in modo intuitivo, le concentrazioni degli inquinanti suddetti in alcune regioni del centro Italia.

Dopo aver elaborato e commentato le mappe, sono stati ricavati i grafici delle serie temporali che rappresentano la situazione in un punto di coordinate ben precise dell'area metropolitana di Roma. Confrontando i risultati ottenuti soprattutto in quest'ultima parte, si è potuto procedere con l'analisi dell'inquinamento atmosferico della zona in questione.

Infine, sono state ipotizzate le cause più probabili sia per l'andamento generale che per eventi singolari accaduti nel decennio di riferimento.

## 1.1. L'ATMOSFERA

L'atmosfera è la copertura gassosa che circonda il nostro pianeta. Nel caso specifico della Terra, la sua estensione è data dalla somma degli strati nei quali può essere suddivisa. Ovviamente, trattandosi di gas, non sono distinguibili in modo netto e preciso, ma approssimativamente si possono classificare come segue.

**Troposfera:** partendo dalla superficie terrestre e proseguendo per circa 10-20km in altezza in corrispondenza rispettivamente dei poli e dell'equatore, esso è lo strato nel quale la temperatura diminuisce all'aumentare dell'altitudine con un gradiente termico di circa 0,6 °C ogni 100 metri. All'interno di questo strato avvengono i fenomeni atmosferici come il vento, le precipitazioni e la formazione delle nuvole.

Il Planetary Boundary-Layer (PBL), che vedremo in seguito, è lo strato più basso della troposfera ed ha questo andamento della temperatura perché il riscaldamento avviene per irraggiamento solare del suolo terrestre.

La linea immaginaria che divide la troposfera dallo strato successivo è definita *tropopausa*.

**Stratosfera:** la sua estensione è di circa 50 km e la temperatura aumenta all'aumentare della quota. Uno strato degno di nota presente nella stratosfera è l'**ozonosfera** che si trova circa a 40 km di distanza dalla fine della troposfera ed è propensa all'assorbimento della radiazione ultravioletta UV-C e UV-B che comporta anche il suo successivo riscaldamento.

La *stratopausa* separa questo strato dalla mesosfera.

**Mesosfera:** il suo spessore arriva fino agli 80 Km di quota e la temperatura diminuisce all'aumentare dell'altezza ed è caratterizzato da una grande rarefazione dei gas presenti.

Il successivo strato è preceduto dalla *mesopausa*.

**Termosfera:** si estende oltre 500 Km; la sua temperatura cresce al crescere della quota. Al confine con la esosfera, nella *termopausa*, orbitano i satelliti artificiali e la base spaziale internazionale.

**Ionosfera:** questo strato si sovrappone alla mesosfera fino ad arrivare alla esosfera. La sua dimensione dipende da quanta energia assorbe dal Sole che provoca l'eccitamento degli elettroni presenti formando ioni. (NASA, 2019)

**Esosfera:** è lo strato più esterno dell'atmosfera e il suo limite superiore sfuma progressivamente verso lo spazio. (CNR, 2016)

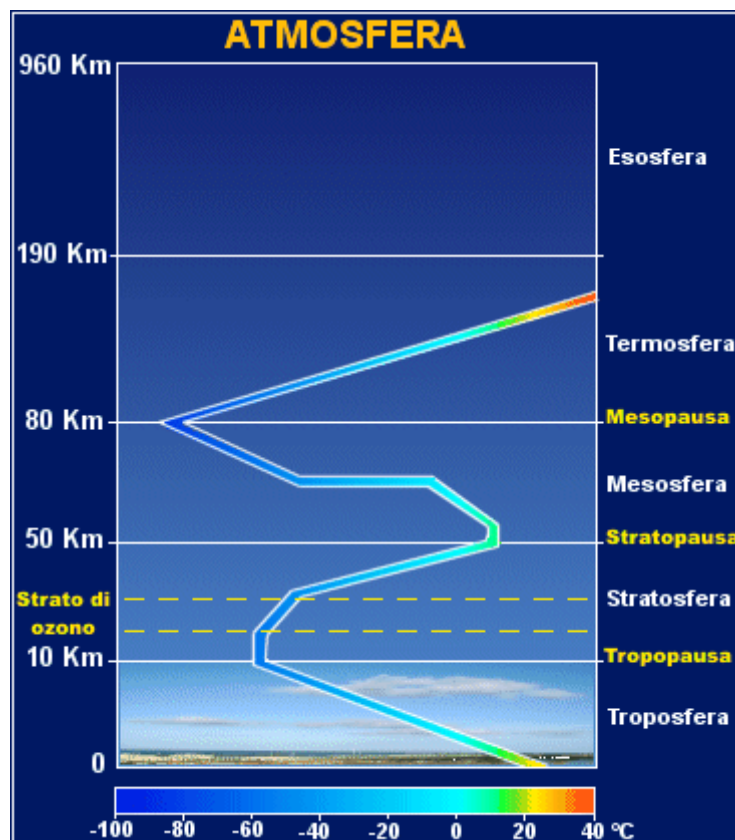


Figura 1 Andamento della temperatura con la quota (<http://andreaclasse20.blogspot.com/2012/12/una-stuttura-stratificata.html>, 2012)

Può essere altresì effettuata un'altra particolarizzazione dell'atmosfera, in particolare della troposfera. Essa può essere ulteriormente divisa in **atmosfera libera** e **planetary boundary layer**. Nel paragrafo successivo verrà presentata una breve descrizione delle principali caratteristiche di quest'ultimo strato. Le equazioni che



regolano il PBL e la “*upper troposphere*” seguono leggi ed approssimazioni differenti, che, ai fini dello studio proposto, non è necessario approfondire.

### 1.1.1. PLANETARY BOUNDARY LAYER

La descrizione del PBL è esaurientemente espressa da R. B. Stull (1988): “*sin dal nostro primo respiro, passiamo la maggior parte della nostra vita vicino alla superficie terrestre. Percepriamo il calore del sole durante il giorno e l’aria fredda notturna. È qui dove crescono i nostri raccolti e le nostre case sono state costruite e dove la maggior parte dei commerci avviene. Ci siamo abituati alle brezze e al microclima locale e ci accorgiamo della differenza quando ci spostiamo in un altro posto.*” Si può quindi definire il PBL come la parte di troposfera influenzata dalla presenza del suolo le cui forzanti si esplicano in un’ora circa. Approssimativamente lo strato si estende dal suolo ai 3000 m circa, in base a molteplici fattori, tra cui, principalmente, l’andamento del riscaldamento giorno-notte.

Le forzanti citate sono principalmente l’attrito, che causano un forte rimescolamento all’interno dello strato, pertanto, il trasporto avviene soprattutto tramite moto turbolento.

Esso è presente soprattutto di giorno, grazie alle *termiche*, ovvero vortici convettivi che si creano sulla superficie a causa dell’irraggiamento solare. La turbolenza è inoltre alimentata dai vortici turbolenti (eddies) che sono generati dall’irregolarità del vento e dalle forze di attrito del terreno.

Il PBL viene ulteriormente classificato in base ai regimi di stabilità che sono fortemente dipendenti dalla radiazione solare, quindi cambiano a seconda che sia giorno o notte. Lo strato più ampio che si forma viene definito Mixed Layer (ML), ovvero dove avviene la maggior parte del “*mixing*” delle variabili atmosferiche. Di notte le termiche non vengono più alimentate e il ML lascia posto ad altri strati tra cui il Residual Layer e lo Stable Nocturnal Boundary Layer che risentono del raffreddamento del terreno.

In sintesi, è possibile descrivere il PBL come uno strato prevalentemente convettivo all'interno del quale avviene il rimescolamento degli inquinanti che può essere più o meno efficace a seconda della turbolenza e dell'ampiezza dello strato stesso.

(Stull, 1988)

## 1.2. INQUINANTI ATMOSFERICI

Come si legge nel Decreto del Presidente della Repubblica 203 del 1988, si definisce inquinamento atmosferico “ogni modificazione della normale composizione o stato fisico dell'aria atmosferica, dovuta alla presenza nella stessa di una o più sostanze in quantità e con caratteristiche tali da alterare le normali condizioni ambientali e di salubrità dell'aria; da costituire pericolo ovvero pregiudizio diretto o indiretto per la salute dell'uomo; da compromettere le attività ricreative e gli altri usi legittimi dell'ambiente; alterare le risorse biologiche e gli ecosistemi ed i beni materiali pubblici e privati”. (D.P.R. 203, 1988)

La normale composizione dell'aria è la composizione standard dell'atmosfera, ovvero:

- ≈ 78% di azoto N;
- ≈ 21% di ossigeno O<sub>2</sub>;
- ≈ 1% di Argon Ar;
- le percentuali restanti sono espresse in ppm e sono relative ad altre molecole come mostra la tabella seguente:

Tabella 1 Composizione dell'aria ad un'altezza di 105km. In grassetto sono evidenziati i gas serra. (Wallace & Hobbs, 2006)

Constituent <sup>a</sup>	Molecular weight	Fractional concentration by volume
Nitrogen (N <sub>2</sub> )	28.013	78.08%
Oxygen (O <sub>2</sub> )	32.000	20.95%
Argon (Ar)	39.95	0.93%
<b>Water vapor (H<sub>2</sub>O)</b>	18.02	0–5%
<b>Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>)</b>	44.01	380 ppm
Neon (Ne)	20.18	18 ppm
Helium (He)	4.00	5 ppm
<b>Methane (CH<sub>4</sub>)</b>	16.04	1.75 ppm
Krypton (Kr)	83.80	1 ppm
Hydrogen (H <sub>2</sub> )	2.02	0.5 ppm
<b>Nitrous oxide (N<sub>2</sub>O)</b>	56.03	0.3 ppm
<b>Ozone (O<sub>3</sub>)</b>	48.00	0–0.1 ppm

Gli inquinanti possono essere classificati in **naturali** ed **antropici** in base alla tipologia di fonte emissiva.

Un'altra importante caratterizzazione dipende dal tipo di origine: si parla di **inquinanti primari** quando essi sono prodotti direttamente da una sorgente; gli **inquinanti secondari** nascono, invece, da precursori che possono essere primari e/o secondari, che, attraverso reazioni chimiche, si combinano e danno origine a nuovi inquinanti.

Inoltre, è opportuno suddividere il problema dell'inquinamento in tre fasi:

- **Emissione:** introduzione dell'inquinante in atmosfera da una fonte di emissione;
- **Trasmissione:** comprende il trasporto, dispersione e diluizione dell'elemento (trasformazioni chimiche); dipende dal tipo di composto e dalle condizioni ambientali;
- **Immissione:** contatto con il recettore preso in considerazione e gli effetti che ha su di esso (accumulo, concentrazione in aria). (Mejer & Krause, 1985)

Considerati questi aspetti, si può procedere con l'elenco dei composti inquinanti principali.

CO<sub>2</sub>, ANIDRIDE CARBONICA: inquinante sia antropico che naturale proveniente da combustioni. È uno dei principali gas serra ed è l'unità base per la scala del Global Warming Potential GWP, ovvero la capacità dell'inquinante di dare origine all'effetto serra. Esso è preso come riferimento anche per il *Carbon Footprint*, ovvero il totale delle emissioni di gas serra (che vengono poi espresse nella corrispondente CO<sub>2</sub>) legate direttamente o indirettamente ad un servizio. (Ministero dell'Ambiente, 2015)

CH<sub>4</sub>, METANO: tra i gas serra troviamo anche il metano che ha un GWP pari a 28 volte quello di riferimento a 100 anni. Esso è un gas inodore e incolore proveniente principalmente da allevamenti di bestiame e perdite durante lo stoccaggio e la distribuzione. (EPA, 2017)

N<sub>2</sub>O, PROTOSSIDO DI AZOTO: è uno degli inquinanti più pericolosi in quanto il suo GWP è di 265 volte maggiore (con riferimento a 100 anni) della CO<sub>2</sub>. Inoltre, è anche molto più stabile del metano, dato che il GWP del metano (si veda tabella sottostante) con riferimento a 20 anni diminuisce significativamente rispetto a quello a 100 anni, mentre il protossido di azoto rimane circa costante. La sua fonte è da cercarsi principalmente durante la fase di denitrificazione, ovvero il passaggio da nitriti e nitrati ad azoto gas (N<sub>2</sub>). All'aumentare della velocità di denitrificazione, diminuisce la produzione di N<sub>2</sub>O. Tale trasformazione avviene in agricoltura, negli impianti di depurazione acque reflue e anche in alcuni processi industriali. (EPA, 2017)

Tabella 2 Estratto che indica il GWP dei principali gas serra (Bréon, et al., 2013)

Acronym, Common Name or Chemical Name	Chemical Formula	Lifetime (Years)	GWP 20-year	GWP 100-year
Carbon dioxide	CO <sub>2</sub>	see*	1	1
Methane	CH <sub>4</sub>	12.4 <sup>†</sup>	84	28
Fossil methane†	CH <sub>4</sub>	12.4 <sup>†</sup>	85	30
Nitrous Oxide	N <sub>2</sub> O	121 <sup>†</sup>	264	265

PM, PARTICULATE MATTER: il particolato è un insieme di particelle solide e liquide di diametro variabile fra 1 nm e 1 mm. Il pedice indica la dimensione massima che ha, ovvero PM<sub>10</sub> considera tutte le particelle che hanno una dimensione inferiore a 10 µm, 2,5 µm per PM<sub>2,5</sub> e 1 µm per le PM<sub>1</sub>. Le PM maggiori di 10 µm sono in genere polveri derivanti da processi industriali ed erosivi. Nell'intorno dei 5 µm si hanno particelle che costituiscono i fumi e le nebbie. (APAT, 2003)

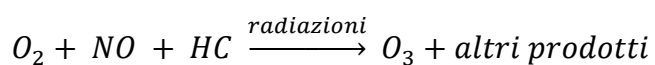
Ovviamente più la dimensione è piccola e più il composto è facilmente respirabile, quindi potrebbe penetrare addirittura nel sistema cardiovascolare e portare a conseguenze negative per la salute degli esseri viventi.

COV, COMPOSTI ORGANICI VOLATILI: essi comprendono idrocarburi saturi e insaturi e giocano un ruolo fondamentale nella chimica atmosferica influenzando la produzione di O<sub>3</sub>. L'origine dei COV è sia antropica che naturale, ma quest'ultima è la parte predominante grazie alla presenza di vegetazione. La durata in atmosfera va da alcuni minuti ad alcuni mesi. (Helmig, et al., 2009)

Tra i composti organici volatili si annoverano i composti organici volatili non metanici COVNM che sono alcuni dei precursori dell'ozono (paragrafo 1.2.4). Nel 2016, si è osservato che le emissioni di COVNM provengono per il 34,3% dall'uso di solventi, per il 21,7% dalla combustione non industriale, per il 13,5% dal trasporto su strada, per il 3% da altre sorgenti mobili e, infine, l'agricoltura rappresenta il 14,5% delle emissioni totali. Rispetto al 1990, sono state registrate riduzioni del 48,6% delle emissioni derivanti dai solventi, dell'84,4% quelle del trasporto su strada, del 79,4% le emissioni provenienti da altre sorgenti mobili e del 14,5% le emissioni agricole; in aumento del 91,3%, invece, quelle della combustione non industriale. (ISPRA, 2018)

SMOG FOTOCHIMICO: è prodotto dalle reazioni chimiche di alcuni inquinanti primari e secondari tra cui gli NO<sub>x</sub>, gli idrocarburi reattivi HC e l'ozono che è l'indicatore della presenza di smog. Le combinazioni chimiche di questi composti causano problemi all'apparato respiratorio, irritazione degli occhi e in alte concentrazioni può danneggiare anche la vegetazione.

Le reazioni fotochimiche non sono ben definite, ma approssimativamente si possono ricondurre alla seguente formula:



(Tiao, et al., 2012)

Per gli inquinanti presi in considerazione in questa elaborazione dati, vengono dedicati singoli paragrafi.

### 1.2.1. SO<sub>x</sub>: OSSIDI DI ZOLFO - SO<sub>2</sub>: ANIDRIDE SOLFOROSA

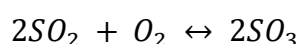
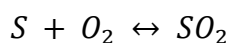
Il diossido di zolfo, SO<sub>2</sub>, è un gas che ha una vita breve in atmosfera ed è prodotto sia da fonti naturali che antropiche. In particolare, è generato da: vulcani, centrali elettriche, raffinerie, combustione di metalli e combustibili fossili. Se l'SO<sub>2</sub> rimane vicino la superficie terrestre è tossico, può causare piogge acide e peggiora la qualità dell'aria; se, invece, si trova nella troposfera libera, forma aerosols (sospensione colloidale in cui il diametro delle particelle oscilla tra 0,01 µm a 100 µm (Alemán, et al., 2007)) che possono alterare la riflessione delle nuvole e le precipitazioni. Nella stratosfera, il diossido di zolfo proveniente dai vulcani si trasforma in solfato, con tempi di residenza molto lungo, contribuendo quindi al *climate change*.

Oggi le emissioni sono principalmente naturali in quanto i combustibili vengono desolforati. Gli unici combustibili che non sono stati totalmente desolforati sono quelli utilizzati dalle navi che, però, dal 1° gennaio 2020 dovranno avere un contenuto massimo di zolfo pari allo 0,5% come previsto dall'International Maritime Organization (IMO, 2018)

Gli SO<sub>x</sub> sono tra i principali agenti del processo di acidificazione dell'atmosfera, insieme all'ammoniaca NH<sub>3</sub> e ai nitrati NO<sub>2</sub>. Rispetto alle altre due sostanze acidificanti, nel 2016 gli ossidi di zolfo antropici avevano un peso pari a 8,5% rispetto al totale, con una riduzione del 93,5% rispetto al 1990. Tale riduzione è imputabile sicuramente anche

ai vincoli introdotti sul tenore di zolfo nei combustibili. In particolare, si osserva un calo del 99,7% nel settore dei trasporti stradali.

I composti principali dello zolfo nell'inquinamento atmosferico sono  $SO_2$  e  $SO_3$  e le loro caratteristiche organolettiche sono l'assenza di colore e l'odore pungente, in particolare  $SO_3$  è molto reattivo. Semplificando le reazioni, si può scrivere come avviene la formazione chimica degli ossidi di zolfo:



(APAT, 2003)

L'esposizione prolungata all'anidride solforosa determina effetti dannosi all'apparato respiratorio come tracheiti, polmoniti e bronchiti. Inoltre, contribuisce all'acidificazione delle precipitazioni con conseguente corrosione di diversi materiali e acidificazione dei corpi idrici; ha effetti tossici sui vegetali che ne rallentano la crescita fino a portarle alla morte. (ARPAUMBRIA, s.d.)

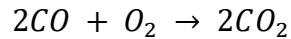
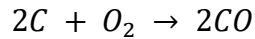
### 1.2.2. CO: MONOSSIDO DI CARBONIO

Il monossido di carbonio deriva principalmente da combustioni non perfette che, piuttosto che portare alla formazione della  $CO_2$ , producono CO. Attualmente le combustioni sono tutte ad eccesso di ossigeno per evitare questo, ma può accadere che un malfunzionamento di stufe e simili possa portare all'emissione di questo gas altamente dannoso.

Il monossido di carbonio è un inquinante incolore, inodore e insapore, gassoso a temperature superiori a  $-192^\circ C$ . La formazione di CO può avvenire grazie a tre processi:

1. *Combustione incompleta di carbonio o di composti che lo contengono.* Le reazioni chimiche coinvolte sono le seguenti:



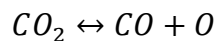


La prima è circa 10 volte più veloce della seconda e ciò comporta una maggiore probabilità di ottenere monossido nel caso in cui l'O<sub>2</sub> non sia sufficiente o sufficientemente miscelato con il combustibile. Tali combustioni non sono molto verificate, come è stato detto prima, perché sono ad eccesso di ossigeno. Un surplus di ossigeno nella combustione non è però positivo per tutto il processo di combustione, in quanto, come vedremo successivamente, la formazione di ossidi di azoto è favorita dalla presenza di ossigeni superflui.

2. *Reazione a elevata temperatura tra anidride carbonica e composti contenenti carbonio:*



3. *Dissociazione di CO<sub>2</sub> in CO e O ad elevate temperature:*



(Finzi & Brusasca, 1991)

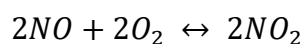
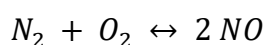
Le emissioni antropiche di monossido di carbonio derivano principalmente dalle combustioni non industriali e dagli autoveicoli e, in quantità minore, da altri settori come: industria (impianti siderurgici e raffinerie di petrolio), trattamento e smaltimento rifiuti, processi produttivi e, infine, centrali termoelettriche.

In Italia, dal 1990 al 2016 si sono verificate condizioni per cui le sorgenti emissive hanno diminuito il loro apporto di CO. Nel settore del trasporto stradale, le emissioni si sono ridotte del 91,1%, portando ad una diminuzione di CO del 68%. Contrariamente, le emissioni derivanti da combustioni non industriali sono aumentate del 78,8%, tanto da rappresentare nel 2016 il 61,6% delle emissioni totali. I trasporti diversi da quello

stradale e i processi di combustione in ambito industriale hanno contribuito per il 5,8% e il 4,4% rispettivamente, fino a ridursi del 72,1% e del 66,9% nel 2016. (ISPRA, 2018)

### 1.2.3. NO<sub>x</sub>: OSSIDI DI AZOTO – NO<sub>2</sub>: NITRITO

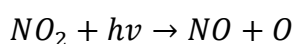
Gli ossidi di azoto che destano più preoccupazione sono l'NO e l'NO<sub>2</sub> provenienti dalla reazione tra l'azoto e l'ossigeno ad elevate temperature (più di 1210°C) secondo le seguenti relazioni stechiometriche:



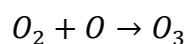
La quantità di NO prodotta dipende dalla temperatura di combustione, dal tempo di permanenza dei gas e dalla quantità di ossigeno libero contenuto nella fiamma. Infatti, come si preannunciava precedentemente, proprio per questo motivo, combustioni ad eccesso di ossigeno limitano la produzione di CO, ma favoriscono quella di ossido di azoto. La formazione di NO<sub>2</sub>, invece, aumenta con il diminuire della temperatura, ed è direttamente proporzionale alla concentrazione di O<sub>2</sub> ed al quadrato della concentrazione di NO. Durante il raffreddamento la concentrazione di O<sub>2</sub> aumenta, ma quella di NO diminuisce, quindi l'effetto globale è una produzione di NO<sub>2</sub> pari circa al 10% dell'NO presente nei fumi. Tanto che gli NO<sub>x</sub> vengono a volte considerati inquinanti secondari derivanti dall'ossidazione del precursore NO. (APAT, 2003)

Quando l'NO viene emesso in atmosfera, si converte parzialmente in NO<sub>2</sub> dando origine alla formazione di ozono. Tutto il ciclo di reazioni che porta alla trasformazione di NO in NO<sub>2</sub> è detto *ciclo fotolitico* e può essere schematizzato nel modo seguente.

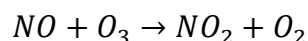
Le molecole di NO<sub>2</sub> assorbono energia dalla radiazione ultravioletta (fotoni  $h\nu$  di lunghezza d'onda inferiore a 430 nm) proveniente dal sole. Il nitrito viene così scisso in NO e atomi di ossigeno altamente reattivi.



Gli atomi di ossigeno, essendo altamente reattivi, si combinano con le molecole di O<sub>2</sub> presenti in aria e generano ozono:



L'O<sub>3</sub>, essendo anch'esso particolarmente reattivo (si veda paragrafo 1.2.4) reagisce con l'NO emesso per formare di nuovo NO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> e chiudere il ciclo.



Questa descrizione rappresenta, però, solo una porzione ridotta di tutti i processi chimici che hanno luogo nella parte bassa dell'atmosfera. Infatti, se fosse così semplice, l'NO<sub>2</sub> si convertirebbe in NO per convertirsi nuovamente in NO<sub>2</sub>, mantenendo costanti i rapporti tra NO<sub>2</sub> e NO. Ma gli idrocarburi presenti in aria interferiscono nel ciclo, e fanno sì che l'NO si converta più velocemente in NO<sub>2</sub> di quanto l'NO<sub>2</sub> venga dissociato in NO e ossigeno atomico, con conseguente accumulo di NO<sub>2</sub> e O<sub>3</sub>. Il tempo di permanenza medio degli NO<sub>x</sub> nell'atmosfera è di circa tre giorni per i nitriti e di circa quattro per il monossido di azoto dato che si trasformano, grazie all'umidità atmosferica, in acido nitrico HNO<sub>3</sub>. Questo, successivamente, viene depositato al suolo tramite le piogge o sottoforma di particolato. (ARPALAZIO, s.d.)

Il biossido di azoto (NO<sub>2</sub>) è un gas di colore bruno-rossastro, tossico, dall'odore forte e pungente e non molto solubile in acqua. La principale fonte di emissione degli NO<sub>x</sub> è il traffico veicolare; le altre fonti sono gli impianti di riscaldamento, molti processi industriali e le centrali per la produzione di energia.

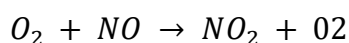
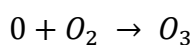
Nel 2016 si è osservata una diminuzione delle emissioni di NO<sub>x</sub> del 60,3% rispetto al 1990. Le modalità di trasporto diverse da quello stradale hanno rappresentato la seconda fonte di emissione a livello nazionale (16,5% del totale). Dalla combustione non industriale proveniva l'11,5% delle emissioni; dalla combustione industriale l'8,5%; da quella nel settore della produzione di energia e dell'industria di trasformazione il 6,3% del totale emesso in Italia.

Il nitrito, insieme al monossido di azoto, contribuisce alla formazione di smog fotochimico essendo il precursore dell'ozono e del particolato fine secondario e delle piogge acide; inoltre provoca eutrofizzazione dei corpi idrici. (ISPRA, 2018)

#### 1.2.4. O<sub>3</sub>: OZONO

L'ozono è una molecola formata da tre atomi di ossigeno ed è un gas particolarmente tossico. Esso ha un colore azzurrognolo e un odore pungente e irritante (Treccani, 2006). L'ozono è altamente reattivo in quanto la configurazione elettronica dell'ossigeno permette l'equilibrio tramite la condivisione di 2 elettroni e la presenza di un terzo elettrone reca instabilità all'insieme. Esso è un inquinante secondario i cui precursori sono gli NO<sub>x</sub> e i composti organici volatili non metanici COVNM.

L'ozono, avendo un elevato potere ossidante, provoca effetti dannosi alla popolazione, all'ecosistema e ai beni storico - artistici. Le cause principali della formazione di O<sub>3</sub> corrispondono a quelli dei suoi precursori ovvero il trasporto, i processi di combustione e l'uso di solventi per quanto riguarda i COVNM. Fondamentale è la presenza di radiazione solare come si può osservare dalle seguenti reazioni. (ISPRA, 2018)



(APAT, 2003)

Non è detto, però che ridurre le emissioni di NO<sub>x</sub>, favorisca la diminuzione di O<sub>3</sub>. Infatti, i precursori dell'ozono sono gli stessi composti che provocano la sua distruzione. In particolare, è stato preso il caso studio riguardante una città belga nella quale si verificava che nel fine settimana, quando la concentrazione di nitrati diminuiva, la

concentrazione di ozono aumentava (Dumont, 1996) e, pertanto, questo fenomeno è stato definito “effetto fine-settimana”.

Tra il 1990 e il 2016, le emissioni dei precursori dell’ozono hanno avuto una marcata riduzione (63,2% per NO<sub>x</sub> e 54,7% per COVNM), legata soprattutto alla diminuzione delle emissioni dei trasporti (si veda il paragrafo 1.2.3) (ISPRA, 2018).

## 2. MATERIALI E METODI

Nel presente lavoro sono stati presi come riferimento i dati satellitari. Nei prossimi paragrafi verrà introdotto il satellite e, in particolare, i sensori ad esso collegati.

### 2.1. TELERILEVAMENTO

Il telerilevamento sfrutta le radiazioni elettromagnetiche per acquisire informazioni indirettamente, ovvero senza il contatto diretto con l'inquinante considerato. Pertanto, i satelliti permettono di ridurre le incertezze sulla distribuzione degli inquinanti e i processi chimici che avvengono in atmosfera. (Martin, 2008)

Gli elementi fondamentali del telerilevamento sono i seguenti:

- piattaforma in grado di sostenere lo strumento;
- oggetto da osservare;
- sensore per l'osservazione;
- informazioni ottenute dai dati dell'immagine e in che modo esse vengono utilizzate e salvate.

Nel caso in questione, la piattaforma è data dal satellite e l'oggetto da osservare è la superficie della Terra. (European Space Agency, 2010)

In generale, un satellite è un qualsiasi corpo che orbita intorno ad un pianeta o ad una stella. Pertanto, si possono definire satelliti naturali sia la Luna che la Terra; il primo perché ruota attorno al nostro pianeta e il secondo perché ruota attorno al Sole.

Di solito, il termine *satellite* è utilizzato per indicare uno strumento artificiale lanciato nello spazio che ruota attorno ad uno specifico corpo, in questo caso la Terra. In particolare, essi vengono lanciati nello spazio su dei razzi e possono orbitare attorno al pianeta quando si raggiunge un equilibrio tra la velocità del satellite e la rotazione del pianeta. Si può osservare che

$$F = m * \frac{v^2}{R + h}$$

è la forza centripeta del satellite, ovvero la forza necessaria affinché il satellite resti in moto seguendo un'orbita approssimata a circolare. Dove  $R$  è il raggio del pianeta e  $h$  è la distanza del satellite dalla superficie del pianeta. Mentre

$$F = G * \frac{m * M}{(R + h)^2}$$

è la forza gravitazionale che il pianeta esercita sul satellite.

Uguagliando le due forze, si ottiene la velocità necessaria al satellite per rimanere in orbita.

$$v = \sqrt{\frac{G * M}{R + h}}$$

Attorno all'orbita terrestre sono presenti un centinaio di satelliti artificiali che ruotano a diverse altezze, a diverse velocità e lungo percorsi diversi. Essi, tramite l'acquisizione di immagini, permettono ai meteorologi di prevedere il tempo e agli scienziati di studiare il Sole, i buchi neri, le galassie lontane e, in generale, il sistema solare e l'universo. Inoltre, forniscono misure dei gas in atmosfera e la quantità di energia che la Terra assorbe ed emette.

Esistono altri satelliti che hanno compiti diversi. Ad esempio, alcuni sono predisposti alla comunicazione come i segnali TV e le chiamate telefoniche; altri costituiscono il Global Positioning System (GPS), sistema che centra la posizione esatta (a meno dell'incertezza) di un punto sulla superficie terrestre. (NASA, 2014)

Inoltre, è possibile identificare alcune tipologie di orbite:

- **orbita geostazionaria:** spesso definita orbita GEO, si trova sopra l'equatore e prosegue da ovest a est ad un'altezza di 36000 km. Mentre segue la rotazione terrestre, che richiede 23 ore 56 minuti e 4 secondi, i satelliti in un'orbita GEO sembrano "stazionari" su una posizione fissa. La loro velocità è di circa 3 km al secondo.

Dato che i satelliti in orbita geostazionaria coprono continuamente gran parte della Terra, essa è considerata un'orbita ideale per le telecomunicazioni o per il monitoraggio dei modelli meteorologici e delle condizioni ambientali in tutto il continente. Solo 3 satelliti equidistanti possono fornire una copertura completa della Terra, ad eccezione delle regioni polari.

- Orbite **terrestri basse**: si trovano normalmente a un'altitudine inferiore a 1000 km e potrebbero arrivare fino a 160 km di distanza dalla Terra. I satelliti in questa orbita circolare viaggiano ad una velocità di circa 7,8 km al secondo. A questa velocità, un satellite impiega circa 90 minuti per girare intorno alla Terra.

In generale, queste orbite vengono utilizzate per il telerilevamento, per scopi militari e per il volo spaziale umano. La Stazione Spaziale Internazionale (International Space Station, ISS) si trova in quest'orbita.

- Orbite **polari**: attraversano le regioni polari della Terra (fino ad un massimo di 20-30 gradi dai poli) da nord a sud. Queste orbite si trovano principalmente a basse altitudini tra 200 e 1000 km. Essi possono passare più volte al giorno sui poli nord e sud. Se un satellite si trova in orbita polare a un'altitudine di 800 km, viaggerà a una velocità di circa 7,5 km al secondo.
- Orbita **sincrona solare**: un satellite in un'orbita sincrona solare di solito si trova ad un'altitudine compresa tra 600 e 800 km. Generalmente queste orbite vengono utilizzate per l'osservazione della Terra, le previsioni meteorologiche e la ricognizione, quest'ultima poiché l'osservazione del suolo è migliore se la superficie è sempre illuminata dal Sole con la stessa angolazione. (European Space Agency, s.d.)

Essi hanno varie forme e dimensioni, ma ogni satellite deve avere un'antenna e un'alimentazione. La prima serve per inviare e ricevere informazioni, la seconda può essere una fonte di energia rinnovabile, come un pannello solare o può essere una batteria più semplice. (NASA, 2014)

Il telerilevamento della bassa atmosfera è generalmente suddiviso in tre categorie:



- misura indiretta del backscatter solare (<4mm);
- misura indiretta dell'emissione infrarossa termica (4-50mm);
- misura diretta del backscatter.

Per “backscatter” si intende la riflessione diffusa delle onde nella direzione da cui provengono. Di solito è dovuta allo scattering ovvero dalla luce che rimbalza su un oggetto in varie direzioni.

La maggior parte degli strumenti impiega tecniche passive, quindi quelle che comprendono i primi due punti, ma molto recentemente sono stati impiegati anche strumenti attivi.

Il rilevamento di gas include sia il backscatter solare che l'emissione di infrarossi termici. Nel caso del telerilevamento con backscatter, viene sfruttata la riduzione dell'intensità della radiazione che attraversa un mezzo. Questa attenuazione è comunemente espressa come la legge di Beer:

$$I_{\lambda} = I_{\lambda,0}e^{-\sigma_{\lambda}\Omega_s}$$

Dove  $I_{\lambda}$  è l'intensità di backscatter osservata da un satellite ad una lunghezza d'onda  $\lambda$ ;  $I_{\lambda,0}$  è l'intensità che verrebbe misurata in mancanza di assorbimento;  $\sigma_{\lambda}$  è la sezione trasversale di assorbimento del gas; infine  $\Omega_s$  è usualmente definita come “slant column”. (Martin, 2008)

Per quanto riguarda il  *sensore*, invece, esso è lo strumento utilizzato per acquisire immagini. Il sensore registra non solo radiazioni nel campo del visibile, ma anche quelle nel resto dello spettro elettromagnetico. Infatti, nel telerilevamento, si usano numerosi sensori dotati di varie sensibilità a diverse lunghezze d'onda. (European Space Agency, 2010)

## 2.2. SENSORI

Entrando nel dettaglio, un sensore è un dispositivo che riceve degli stimoli e risponde attraverso segnali elettrici. Per “**stimolo**” si intende la quantità, la proprietà o la condizione dell’oggetto osservato che viene acquisito e convertito in segnale elettrico.

Ogni sensore è un convertitore di energia: il processo di acquisizione dati è un caso particolare di trasferimento di informazione che richiede una trasmissione di energia. Essendo una trasmissione di energia, essa può fluire da una parte all’altra (dal sensore all’oggetto e viceversa) indistintamente. Ciò viene convenzionalmente definito positivo o negativo in base al verso di percorrenza.

Per esempio, un sensore con radiazione infrarossa termopila produrrà un voltaggio positivo quando l’oggetto è più caldo del sensore perché il flusso di infrarossi viaggerà verso il sensore; viceversa nel caso in cui il sensore sia più caldo dell’oggetto. Se entrambi hanno la stessa temperatura, il flusso di energia infrarossa sarà nullo e il voltaggio in output zero, quindi basta conoscere la temperatura del sensore per sapere quella dell’oggetto.

Un’importante distinzione da fare è tra il sensore e il trasduttore. Mentre il primo converte soltanto un tipo di energia in un altro, il secondo converte ogni tipo di energia in elettrica, quindi un sensore è un particolare tipo di trasduttore. Ciò significa che un trasduttore è un dispositivo che, nel convertire una forma di energia in un’altra, produce un segnale in uscita; un sensore, invece è un trasduttore in grado di ricevere e rispondere ad un segnale o ad una stimolazione con un segnale elettrico. I trasduttori possono far parte di un sensore complesso come mostra la figura seguente.

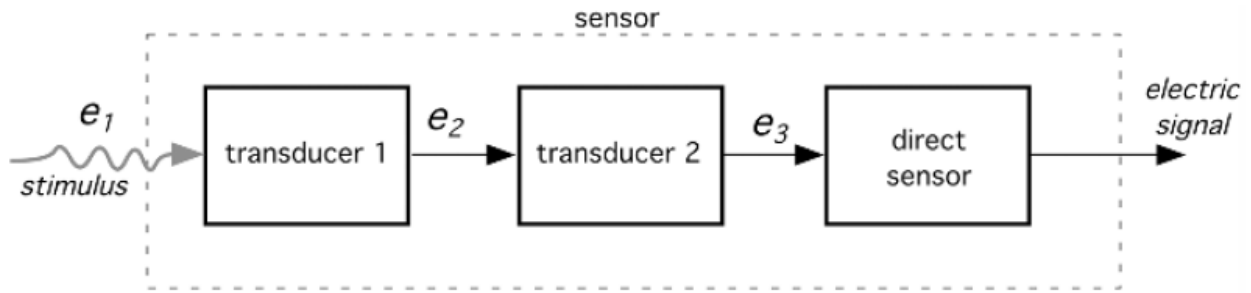


Figura 2 Un sensore può incorporare più trasduttori e quindi più tipi di energia. Si noti che l'ultima parte è un sensore diretto (Fraden, 2004)

Per esempio, un sensore chimico è un sensore complesso in quanto ha una parte che converte l'energia di una reazione chimica in calore (trasduttore) e un'altra parte, termopila, che converte questo calore in un segnale elettrico. Quindi, combinando due trasduttori, da una reazione chimica si arriva ad un output elettrico.

Come indicato nella descrizione della Figura 2, molti sensori incorporano un sensore diretto e alcuni trasduttori.

Un sensore non è mai uno strumento indipendente, fa sempre parte di un sistema di acquisizione dati.

Per meglio comprendere la posizione del sensore in un sistema più grande, si può fare riferimento alla Figura 3 che mostra un diagramma a blocchi di un sistema di acquisizione e controllo dati. Per "object", oggetto, si intende qualsiasi cosa che deve essere misurato. I dati sono raccolti da 5 sensori in questo caso. I sensori 2, 3, 4 sono posizionati direttamente nell'oggetto da misurare. Il sensore 1 rileva le informazioni senza un contatto fisico diretto e, pertanto, viene definito *noncontact sensor*.

Il sensore 5 monitora le condizioni interne del sistema stesso. I sensori 1 e 3, invece, non possono essere collegati direttamente ai circuiti elettrici perché non hanno un segnale in output idoneo, pertanto richiedono l'uso di dispositivi di interfaccia, i *signal conditioners*.

I sensori 1, 2, 3 e 5 sono passivi, mentre il sensore 4 è attivo. Nel paragrafo 2.2.1 verranno esposte le differenze tra le due tipologie.

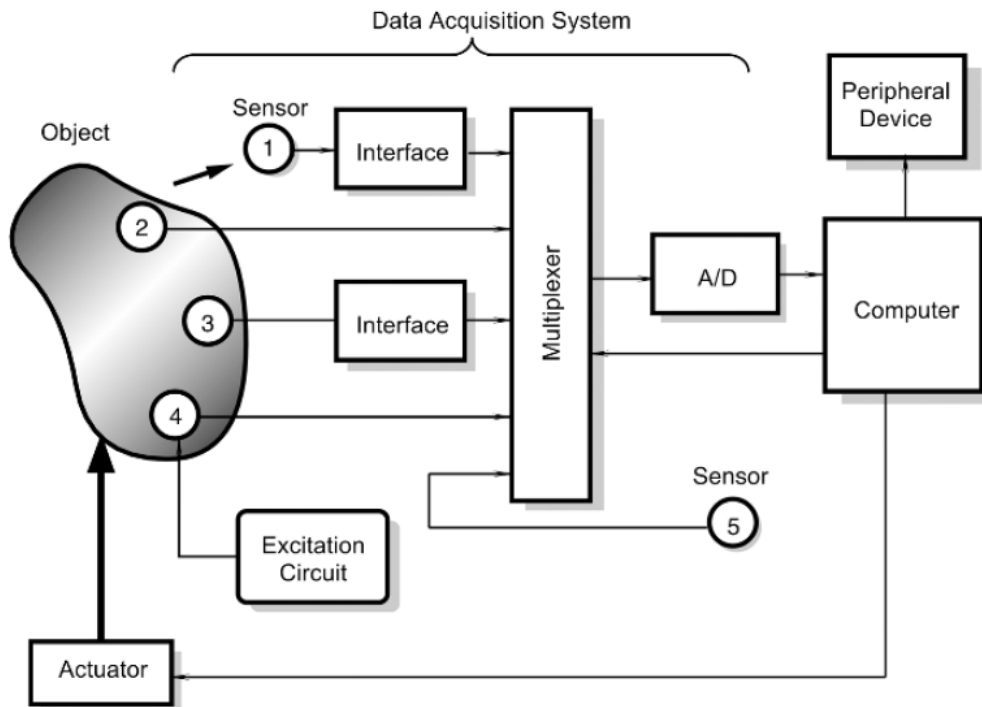


Figura 3 Posizione dei sensori in un sistema di acquisizione dati. (Fraden, 2004)

(Fraden, 2004) (dalla Costa, et al., 2006)

È molto importante tenere in considerazione il fatto che dal segnale in input a quello in output intercorrono alcune conversioni nel sensore. Queste fanno sì che il dato misurato non sia esattamente quello reale.

### 2.2.1. CLASSIFICAZIONE DEI SENSORI

Numerose sono le classificazioni in cui è possibile distinguere i vari tipi di sensori, in base al tipo di esigenza che si ha. Di seguito sono state elencate quelle più comuni.

I sensori possono essere classificati in **attivi** e **passivi**. I sensori attivi hanno bisogno di una potenza esterna per operare, chiamata *segnale di eccitazione* (excitation signal). I sensori passivi, invece, generano direttamente un segnale elettrico in risposta ad uno stimolo esterno, cioè la conversione dell'energia di input in quella di output è effettuata senza il bisogno di fonti di energia addizionali.

Un altro modo di suddividere i sensori è in base al riferimento che si adotta. Un sensore **assoluto** rileva uno stimolo in riferimento a una scala fisica assoluta, quindi indipendente dalle condizioni di misurazione; un sensore **relativo**, invece, produce un segnale in riferimento ad un determinato elemento.

Inoltre, i sensori possono essere anche classificati in **diretti** e **complessi**. Un sensore diretto converte direttamente uno stimolo energetico in un impulso elettrico, mentre un sensore complesso necessita di uno o più trasduttori di energia prima che un sensore diretto possa essere usato per generare un output elettrico.

Un altro modo di analizzare i sensori è quello di considerare tutte le proprietà: cosa misurano, ovvero qual è lo stimolo che ricevono; quali sono i fenomeni fisici ai quali sono sensibili; i materiali con cui sono stati realizzati; quali sono i campi di applicazione a cui rispondono.

In particolare, i sensori che interessano particolarmente questo studio sono quelli chimici. I sensori chimici rispondono agli stimoli prodotti dalle varie specie chimiche o dalle reazioni chimiche. L'obiettivo di questi strumenti è quello di identificare e quantificare le sostanze captate.

Nell'ambito scientifico e della ricerca, i sensori chimici sono utilizzati in molti campi: dal monitoraggio atmosferico degli inquinanti al rilevamento di esplosivi. Inoltre, questo tipo di sensori viene utilizzato per caratterizzare campioni di gas provenienti da esperimenti di laboratorio e per tracciare la migrazione di eventuali fuoriuscite di sostanze chimiche pericolose nei suoli.

Nell'industria, i sensori chimici vengono utilizzati per il controllo di processo e di qualità durante la produzione di materie plastiche e nella produzione di metalli di fonderia in cui la quantità di gas diffusi può influire sulle caratteristiche dei metalli. Sono utilizzati per il monitoraggio ambientale dei lavoratori per controllare la loro esposizione a pericoli e limitare i rischi per la salute.

(Fraden, 2004)

### 2.2.2. COMPONENTI DEI SENSORI

Si possono descrivere alcuni componenti dei sensori in base alla tipologia a cui appartengono, ovvero se sono attivi o passivi.

La maggior parte dei *sensori attivi* lavora nella banda del microonde dello spettro elettromagnetico (10 cm – 1 mm), ciò li rende in grado di penetrare nell'atmosfera nella maggior parte delle condizioni. Essi sono costituiti da:

- **Altimetro laser:** uno strumento che utilizza LIDAR per misurare l'altezza della piattaforma (spacecraft o aerei) dalla superficie terrestre media. Questa viene utilizzata per determinare la topografia della superficie sottostante.
- **LIDAR:** rileva la luce e il *ranging sensor* attraverso un radar laser che trasmette un impulso luminoso e un ricevitore sensibile misura la luce in backscatter o riflessa. La distanza dall'oggetto viene determinata registrando il tempo tra impulsi trasmessi e utilizzando la velocità della luce per calcolare la distanza percorsa.
- **Radar:** determina le onde radio e il *ranging sensor* che emette impulsi di radiazioni a microonde tramite un'antenna. Quando l'energia raggiunge l'obiettivo, parte dell'energia viene riflessa verso il sensore. Questa radiazione backscatter a microonde viene rilevata e misurata. Il tempo necessario affinché l'energia viaggi verso il bersaglio e torni indietro al sensore determina la distanza. Registrando l'energia riflessa da tutti i bersagli mentre il satellite passa, è possibile produrre un'immagine bidimensionale della superficie.
- **Ranging Instrument:** un dispositivo che misura la distanza tra lo strumento e un oggetto.
- **Scatterometer:** un radar a microonde ad alta frequenza progettato specificamente per misurare le radiazioni backscatter.

- **Sounder:** uno strumento che misura la distribuzione verticale delle precipitazioni e altre caratteristiche atmosferiche come la temperatura, l'umidità e la composizione delle nuvole.

Per quanto riguarda i *sensori passivi*, essi includono diversi tipi di radiometri e spettrometri. La maggior parte dei sistemi passivi utilizzati nelle applicazioni di telerilevamento lavora nell'intervallo del visibile, infrarosso, infrarosso termico e microonde. I componenti sono i seguenti:

- **Accelerometro:** misura l'accelerazione. Esistono due tipi di accelerometri: uno misura le accelerazioni traslazionali (variazioni dei movimenti lineari) e l'altro misura le accelerazioni angolari (variazioni della velocità di rotazione nel tempo).
- **Radiometro iperspettrale:** è un sensore multispettrale ad altissima risoluzione che rileva centinaia di bande spettrali molto vicine tra loro in tutte le parti visibili, nel vicino infrarosso e nel medio infrarosso.
- **Imaging radiometer:** un radiometro che può scannerizzare una matrice bidimensionale di pixel da cui può essere prodotta un'immagine. La scansione può essere eseguita meccanicamente o elettronicamente utilizzando una serie di rivelatori.
- **Radiometro:** uno strumento che misura quantitativamente l'intensità della radiazione elettromagnetica in alcune bande dello spettro. Di solito, un radiometro viene ulteriormente identificato dalla porzione di spettro che copre, ad esempio visibile, infrarosso o microonde.
- **Sounder;**
- **Spettrometro:** un dispositivo progettato per rilevare, misurare e analizzare il contenuto spettrale della radiazione elettromagnetica incidente. Gli spettrometri convenzionali usano reticoli o prismi per disperdere la radiazione per la discriminazione spettrale.
- **Spettroradiometro:** è un radiometro multispettrale cioè misura l'intensità della radiazione in più bande di lunghezze d'onda. Molte volte le bande sono

ad alta risoluzione spettrale per il rilevamento remoto di specifici parametri geofisici.

(NASA, 2019)



### 2.3. STORIA DEI SATELLITI

Il primo satellite lanciato nello spazio è stato Sputnik 1, nel 1957, di proprietà dell'Unione Sovietica. Nel '58 fu inviato il primo della NASA, Explorer 1 il cui strumento principale a bordo era un sensore che misurava i raggi cosmici. Nel 1959, fu registrata la prima immagine satellitare della Terra grazie all'Esploratore 6 della NASA. TIROS-1 lo seguì nel 1960 con la prima immagine TV della Terra dallo spazio. (NASA, 2014)

L'8 aprile 1970 il satellite Nimbus-4 fu lanciato in un'orbita polare circolare sincrona del Sole ad un'altitudine di 1100 chilometri. Inoltre, l'esperimento Backscatter Ultraviolet (BUV) fu messo in orbita a bordo del satellite. Questo strumento con doppio monocromatore misurava la radiazione ultravioletta terrestre nell'intervallo delle lunghezze d'onda di 2550 Å e 3400 Å (considerando la conversione al SI, 1 Å= 0,1 nm, quindi la fascia di spettrometro misurata è compresa tra 255nm e 340nm).

L'esperimento BUV è stato progettato per misurare l'irraggiamento solare nella parte superiore dell'atmosfera e la radiazione atmosferica nella direzione del nadir satellitare, fornendo così dati per la determinazione di profili di ozono ad un alto livello e l'ozono totale su base globale, con una risoluzione spaziale di 230km. (Heat, et al., 1973)

La storia del telerilevamento per il monitoraggio dei gas inizia negli anni '70. Nel 1976 Walter A. Lyons della COMPUMET, Minneapolis, e Rudolf Husar della Washinton University presentarono un'immagine del satellite GOES che mostrava una vasta area di foschia che copriva gli Stati Uniti occidentali (Lyons & Husar, 1976). Nel 1979 William Todd della Technicolor Graphic Services et al. sfruttarono le informazioni sul suolo provenienti dal satellite Landsat integrate con monitor a terra per determinare l'esposizione della popolazione all'inquinamento atmosferico (Todd, et al., 1979). Robert Fraser del Laboratory for Atmospheric Sciences (NASA/Goddard Space Flight Center) et al., nel 1984, utilizzarono le osservazioni GOES per valutare l'aerosol optical depth e, successivamente, per esaminare un evento di foschia negli Stati Uniti orientali (Fraser, et al., 1984). Nel 1987 Jack Fishman dell'Atmospheric Science Division (NASA Langley Research Center) et al. utilizzarono i dati colonnari di ozono misurate dallo spettrometro

TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) per esaminare l'O<sub>3</sub> di superficie negli Stati Uniti orientali (Fishman, et al., 1987). (Martin, 2008)

Per quanto riguarda l'inquinamento atmosferico, la capacità di misurare l'inquinamento nella troposfera risale al novembre 1981, quando venne effettuata la prima misurazione del monossido di carbonio tramite lo space shuttle *Challenger* (Reichle Jr, et al., 1986).

Da allora, numerosi strumenti satellitari effettuarono importanti misure nella Low Earth Orbit (LEO), ovvero la regione che circonda la Terra sopra i 2000 km di altitudine. (IADC, 2007) (National Research Council, 2008)

Negli ultimi due decenni, sono stati compiuti importanti progressi nella determinazione dell'inquinamento atmosferico dallo spazio. I satelliti lanciati dal 1995 consentirono di osservare un vasto range di specie chimiche incrementando sempre di più la risoluzione. (Streets & et al., 2013)

Inoltre, la trasformazione dei dati satellitari grezzi in informazioni di facile utilizzo è notevolmente migliorata, per cui è possibile applicare le osservazioni satellitari a una vasta gamma di problemi atmosferici. (Xian, 2016)

## 2.4. DESCRIZIONE DEI DATI SATELLITARI

I dati che sono stati utilizzati per l'analisi dell'inquinamento nell'area metropolitana di Roma sono stati scaricati dal web portal GIOVANNI <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/> (NASA, s.d.).

GIOVANNI (Geospatial Interactive Online Visualization ANd aNalysis Infrastructure) è uno strumento online sviluppato dal Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC) che consente agli utenti di accedere, visualizzare e analizzare grandi quantità di dati di telerilevamento senza prima doverli scaricare. Le interfacce Web sono progettate per essere chiare e intuitive, facilitando l'analisi di dati globali e regionali che coprono la dinamica e la chimica dell'atmosfera, l'idrologia, la meteorologia, le precipitazioni e i dati oceanografici. (NASA, 2019)

### 2.4.1. Earth Observing System Data and Information System (EOSDIS)

L'EOSDIS è una banca dati del sistema di osservazione della terra della NASA ed è alla base del programma ESDS (Earth Science Data Systems). Gestisce dati provenienti da varie fonti: satelliti, aeromobili, misurazioni sul campo ecc. In particolare, per le missioni satellitari EOS, EOSDIS fornisce il comando, il controllo, la programmazione, l'acquisizione dati e l'elaborazione iniziale (livello 0). Queste capacità, che costituiscono le operazioni di missione EOSDIS, sono controllate dal progetto ESMO (Earth Science Mission Operations) della NASA.

Le restanti operazioni di EOSDIS costituiscono le EOSDIS Science operations, gestite dal progetto ESDIS (Earth Science Data and Information System). Esse includono: dati scientifici di livello superiore (livelli 1-4) per le missioni EOS; archiviazione e distribuzione di dati da EOS e da altre missioni satellitari, nonché campagne di misurazione via aerea e in campo. Le operazioni scientifiche di EOSDIS vengono eseguite all'interno di un sistema distribuito chiamato Science Systems-Investigator-driven Processing Systems (SIPS) e vengono distribuite tramite il Distributed Active Archive Centers (DAAC).

(NASA, 2019)

## 2.4.2. Livelli di elaborazione dati

Nel paragrafo precedente si è parlato di livelli di elaborazione dati, o data processing, che vanno da 0 a 4. In effetti, i dati dell'EODIS vengono processati in base a determinati livelli. I prodotti del livello 0 sono dati grezzi provenienti dalla massima risoluzione dello strumento; ai livelli più alti i dati vengono convertiti in parametri e formati più utili. Tutti gli strumenti dell'EOS devono avere un livello minimo pari a 1, infatti la maggior parte hanno un livello 2 o 3 e molti arrivano al livello massimo. Nella seguente tabella, è presente la classificazione in modo dettagliato.

LIVELLO 0	Dati alla massima risoluzione non elaborati, con tutti gli artefatti di comunicazione (ad es. frame di sincronizzazione, intestazioni di comunicazione, dati duplicati) rimossi. Nella maggior parte dei casi, l'EOS Data and Operations System della NASA (EDOS) fornisce questi dati ai Distributed Active Archive Centers (DAAC) come set di dati di produzione per l'elaborazione da parte dello Science Data Processing Segment (SDPS) o da uno dei Science Investigator-led Processing System (SIPS) per produrre prodotti di livello superiore.
LIVELLO 1A	Dati dello strumento alla massima risoluzione, non elaborati, tempo referenziati, con alcune informazioni accessorie tra cui i coefficienti di calibrazione radiometrica e geometrica e parametri di georeferenziazione calcolati.
LIVELLO 1B	Dati di livello 1A che sono stati elaborati in sensor units.
LIVELLO 2	Variabili geofisiche derivate con la stessa risoluzione e posizione dei dati sorgente di livello 1.
LIVELLO 3	Variabili mappate su uniform space-time grid scales, di solito con una certa completezza e coerenza.
LIVELLO 4	Output del modello o risultati delle analisi di dati di livello inferiore.

(NASA, 2019)

### 2.4.3. Earth Observing System (EOS)

Il sistema di osservazione della Terra (EOS) della NASA è una serie coordinata di satelliti a orbita polare (capitolo 2.1) e bassa inclinazione per osservazioni globali a lungo termine della superficie terrestre, della biosfera, dell'atmosfera e degli oceani. Come componente principale della Earth Science Division della Science Mission Directorate della NASA, l'EOS consente una migliore comprensione della Terra come sistema integrato. (NASA, 2019)

Nella seguente immagine è possibile osservare i satelliti facenti parte del programma NASA Earth Science Division Operating Missions e nella quale è possibile osservare alcuni degli elementi che verranno presi in considerazione dei paragrafi successivi.

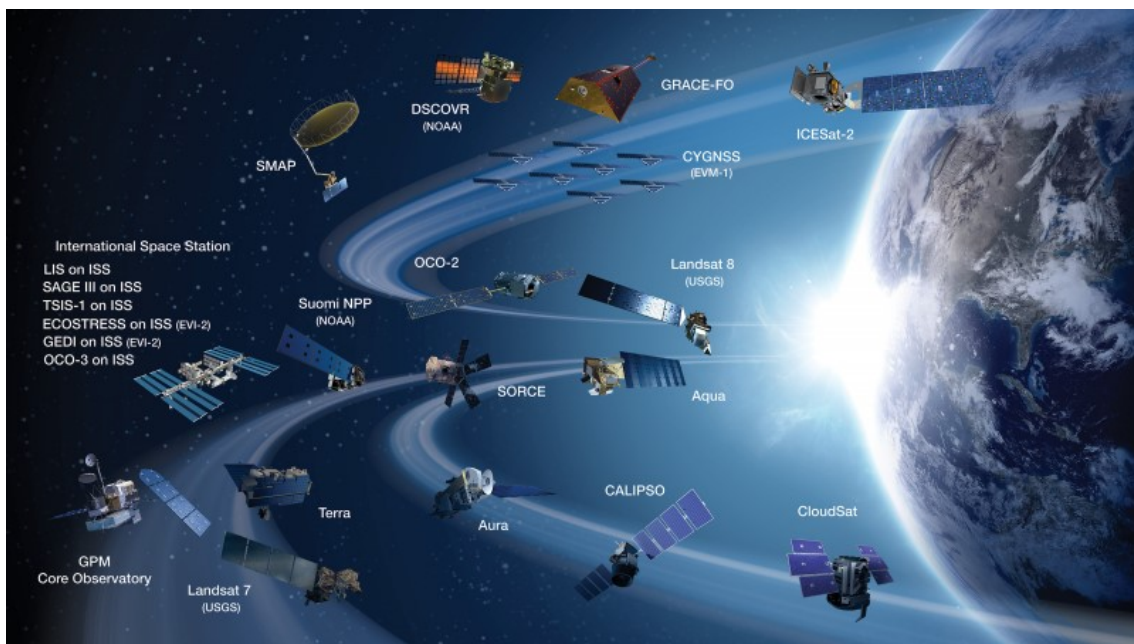


Figura 4 NASA Earth Science Division Operating Missions (NASA, 2019)

#### 2.4.4. AURA

Aura, lanciato il 15 luglio 2004, è un satellite che si occupa, attraverso i 4 sensori a bordo, di osservare la chimica atmosferica seguendo un'orbita sincrona solare. In particolare, è molto utile per studiare l'ozono (capitolo



Figura 5 Satellite Aura (NASA, s.d.)

1.2.4), le modificazioni della qualità dell'aria e la loro correlazione con i cambiamenti climatici.

Aura è la terza della serie di grandi piattaforme dell'Earth Observing System pilotata dalla NASA con contributi internazionali. Essa, insieme a Terra (lanciato nel dicembre 1999) e Aqua (lanciato nel maggio 2002), offre una visione senza precedenti del sistema globale della Terra. La missione Aura è composta da quattro strumenti su un veicolo spaziale comune. Ogni satellite ha una missione indipendente, ma combinando le misure degli altri strumenti, si possono ottenere più informazioni. In particolare, l'obiettivo della missione Aura è studiare la chimica e la dinamica dell'atmosfera terrestre, soprattutto della troposfera superiore e della stratosfera inferiore (5–20 km di altitudine).

Tra i 4 sensori a bordo di Aura, HIRDLS (High Resolution Dynamics Limb), MLS (Microwave Limb Sounder), OMI (Ozone Monitoring Instrument), TES (Tropospheric Emission

Spectrometer), quello più rilevante ai fini dell'analisi dei dati di questo studio, è OMI. (NASA, 2006)

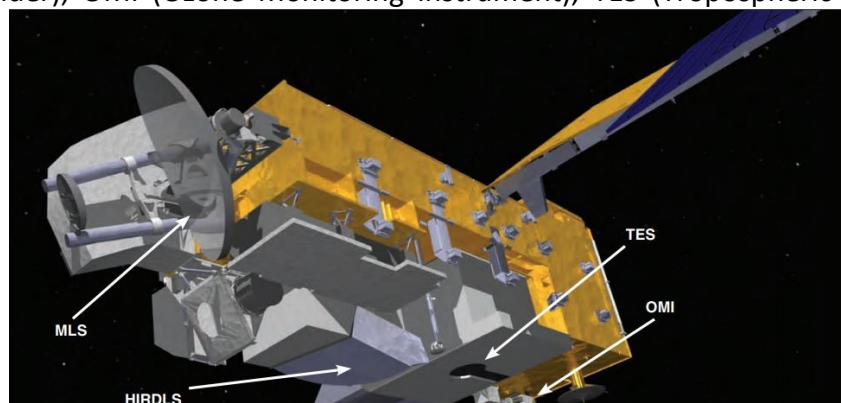


Figura 6 Satellite Aura e i suoi componenti (NASA, s.d.)

#### 2.4.5. OMI

OMI, Ozone Monitoring Instrument, è stato costruito da Dutch Space e TNO TPD nei Paesi Bassi in collaborazione con Finnish VTT e Patria Advanced Solutions Ltd. Esso è un *nadir-viewing wide-field imaging spectroradiometer* che si occupa della misura dell'ozono.

L'OMI contiene due spettrometri: uno misura i raggi UV nell'intervallo di lunghezze d'onda di 270–380 nm, mentre l'altro misura il visibile nell'intervallo di 350–500nm.

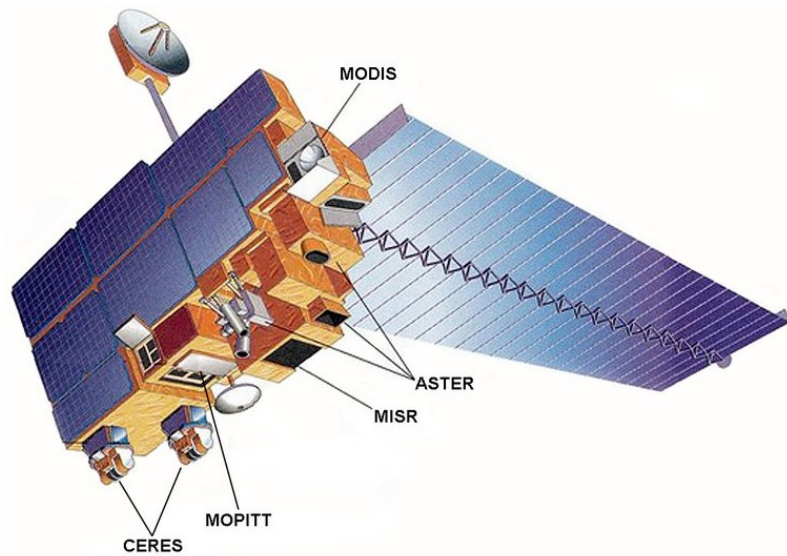
Questo sensore è lo strumento principale di Aura per tracciare l'evoluzione globale dell'ozono e continua le misurazioni colonnari di ozono iniziate nel 1970 dal BUV Nimbus-4 (capitolo 2.3).

Dato che l'OMI ha un intervallo di lunghezze d'onda più ampio e una migliore risoluzione spettrale rispetto agli strumenti precedenti (la risoluzione orizzontale dell'OMI è circa quattro volte maggiore rispetto a quella dei TOMS), l'OMI può anche misurare quantità di colonne di tracce di gas importanti per la chimica dell'ozono e la qualità dell'aria. I dati dell'OMI possono essere utilizzati per mappare gli aerosol e stimare le radiazioni ultraviolette che raggiungono la superficie terrestre.

(NASA, 2006)

#### 2.4.6. TERRA

Il satellite Terra (precedentemente chiamato EOS AM-1) è la prima piattaforma EOS e fornisce dati globali sullo stato dell'atmosfera, della terra e degli oceani, nonché sulle loro interazioni con le radiazioni solari.



*Figura 7 Il Satellite Terra e i suoi componenti (NASA, 2017)*

Terra, insieme ad altri veicoli spaziali EOS (Landsat 7, Aqua e ICESat) acquisisce molte delle informazioni necessarie per sviluppare la comprensione del sistema terrestre. Terra vola in un'orbita quasi polare e sincrona solare che scende al mattino lungo l'equatore.

L'orbita di Terra segue il sistema di riferimento mondiale, così come le orbite di Landsat 7 (USGS), Earth Observing-1 (EO-1, NASA) e Satellite de Aplicaciones Cientificas-C (SAC-C, Argentina Comisión Nacional para el Ahorro de Energia, CONAE), attraversando l'equatore entro 30 minuti l'uno dall'altro. Questi quattro satelliti compongono la "Morning Constellation", un programma che facilita l'uso di tutti i dati registrati.

Terra ha cinque strumenti scientifici complementari: ASTER per studi ravvicinati; CERES per il monitoraggio delle short e long waves; MOPITT per studi sull'inquinamento; MISR per studi sulla riflessione bidirezionale delle nuvole, aerosol e sulle caratteristiche del suolo e MODIS per l'analisi globale delle proprietà della terra, dell'oceano e dell'atmosfera e delle loro interazioni. (NASA, 2006)



#### 2.4.7. MOPITT

L'acronimo sta per Measurements of Pollution in The Troposphere, cioè questo sensore si occupa delle misurazioni dell'inquinamento nella troposfera. È formato da un radiometro denominato "8-channel cross-track-scanning gas correlation radiometer" operante a tre lunghezze d'onda (2,2, 2,3 e 4,7  $\mu\text{m}$ ), progettato per misurare il monossido di carbonio e il metano nell'atmosfera. Questo consente di poter studiare la distribuzione spaziale e temporale che sono alla base del bilancio energetico. Inoltre, dato che questi due inquinanti sono frutto principalmente dell'attività antropica, consente di comprendere gli effetti antropogenici sull'ambiente.

Questo sensore utilizza la modulazione della pressione e della lunghezza per ottenere concentrazioni di monossido di carbonio (CO) con tre informazioni indipendenti rappresentate da valori su sette livelli di pressione, così come colonne di CO e metano (CH<sub>4</sub>). MOPITT misura la radiazione infrarossa emessa e riflessa in una colonna di atmosfera che, una volta analizzata, consente il recupero di profili troposferici di CO e quantità colonnari (*total column amounts*) di monossido di carbonio e metano. Questo sensore opera secondo il principio della spettroscopia di correlazione, vale a dire la selezione spettrale da parte di un gas dell'emissione o dell'assorbimento di radiazioni, utilizzando un campione dello stesso gas come filtro. Lo strumento modula la densità del gas campione modificando la lunghezza o la pressione del campione stesso nel percorso ottico dello strumento. Questa modulazione modifica il profilo di assorbimento nelle linee spettrali del gas nella cella. Il campione di gas modulato funge da filtro ottico che seleziona le parti delle linee di assorbimento atmosferico di quel gas nell'atmosfera. Il segnale captato dal rilevatore è quindi fortemente correlato con la presenza del gas campione in atmosfera.

MOPITT è stato lanciato sul veicolo spaziale Terra il 18 dicembre 1999 ed è stato attivato nel marzo 2000. Le prestazioni a maggio 2001 sono state eccellenti, a quel punto un problema con il sistema di raffreddamento del rivelatore ha degradato le prestazioni dello strumento che, fortunatamente, non sono state alterate gravemente.

(NASA, 2006)

## 2.5. GIOVANNI

Per scaricare i dati dal web portal GIOVANNI è necessario eseguire alcune operazioni. Innanzitutto, bisogna scegliere il tipo di mappa che si vuole visualizzare, in questo caso “Time Averaged Map”, ovvero una mappa che media nel tempo dei dati che ha nel database. Il tempo di mediazione viene scelto dall’utente (medie giornaliere, mensili, annuali, decennali, ecc). Il successivo step è quello di scegliere una porzione intorno all’area di interesse che, in questo caso, è Roma. Una volta inserite tutte le condizioni, basta scegliere la misura che interessa, come ad esempio gli inquinanti descritti nel dettaglio nel capitolo 1 e poi scaricare i dati in formato netCDF selezionando il sensore opportuno.

## 2.6. PANOPLY

Una volta scaricati i dati in formato netCDF (.nc), è necessario elaborarli attraverso il programma Panoply (netCDF, HDF and GRIB Data Viewer) di NASA GISS (Goddard Institute for Space Studies).

Panoply è un'applicazione Java che consente all'utente di tracciare immagini raster (immagini in formato digitale) di dati geo-referenziati in formato netCDF. A seconda del tipo di dati disponibili, Panoply può essere utilizzato per creare mappe in vari modi:

- tracciare i dati di latitudine e longitudine come mappe globali o medie zonali, utilizzando una delle oltre 40 proiezioni di mappe globali;
- sovrapporre i confini o le maschere dei continenti o semplicemente plottare una regione specifica;

Panoply funge anche da strumento per l'analisi grafica e non dei dati, consentendo all'utente di:

- combinare due matrici in un grafico con la possibilità di fare la somma, differenza o la media ed il merging;

- utilizzare una delle 30 barre dei colori della scala fornite (in base alle tabelle dei colori PAL, ACT o CWC) o aggiungere una barra dei colori personalizzata;

- salvare i grafici come immagini PNG o GIF o PDF.

(Schmunk, s.d.)

In questo progetto, come primo step, si è localizzata l'area metropolitana di Roma attraverso coordinate di latitudine ( $42,0^{\circ}\text{N}$ ) e longitudine ( $12,0^{\circ}\text{E}$ ) ed impostando i valori della visualizzazione ad una larghezza (longitudine) di  $6,0^{\circ}$  e una altezza (latitudine) di  $4,0^{\circ}$ . Successivamente si sono presi come riferimento i valori massimi e minimi per ogni inquinante studiato. Una volta stabilito il range nel quale i dati oscillavano, si sono posti i limiti nella palette dei colori. Infine, i file scaricati da GIOVANNI sono stati plottati in base a queste condizioni.

### 3. RISULTATI E DISCUSSIONE

I dati che sono stati elaborati tramite Panoply, quindi le mappe ottenute, vengono di seguito riportate. I dati scelti sono stati quelli mediati annualmente nel range temporale 1° gennaio 2008 - 31 dicembre 2017 degli inquinanti SO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>. Nelle serie temporali verranno riportate anche le medie mensili e le medie decennali. Per ogni inquinante la scala scelta è la medesima per poter porre a confronto i dati ottenuti.

Le unità di misura utilizzate sono: le Dobson Unit (DU) per l'SO<sub>2</sub> e l'O<sub>3</sub>; mol/cm<sup>2</sup> per il CO; mentre per l'NO<sub>2</sub>, 1/cm<sup>2</sup>. La DU è l'unità più comune per misurare la concentrazione di ozono. Un'unità Dobson è il numero di molecole di ozono che sarebbero necessarie per creare uno strato di 0,01 mm di spessore di ozono puro ad una temperatura di 0°C e ad una pressione di 1 atmosfera. Esprimendo questo concetto in un altro modo, una colonna d'aria con una concentrazione di ozono di 1 DU conterrebbe circa  $2,69 \times 10^{16}$  molecole di O<sub>3</sub> per ogni centimetro quadrato di area alla base della colonna. Sulla superficie terrestre, lo spessore medio dello strato di ozono è di circa 300 DU o uno strato spesso 3 millimetri.

L'ozono nell'atmosfera non è tutto contenuto in un singolo strato così come l'ozonosfera è una regione in cui l'ozono è più presente di quanto non lo sia ad altre altitudini. I sensori satellitari e altri dispositivi di misurazione dell'ozono misurano la concentrazione totale di ozono per un'intera colonna dell'atmosfera. La Dobson Unit è un modo per descrivere la quantità di ozono che ci sarebbe nella colonna se fosse tutta compressa in un singolo strato. Infatti, il cosiddetto "buco dell'ozono" antartico è un'area in cui la concentrazione di ozono scende a una media di circa 100 DU che formerebbero uno strato spesso solo 1 millimetro, quindi 1/3 rispetto allo spessore tipico.

(NASA, 2018)

Di seguito vengono rapportate le DU ad unità più utilizzate nel quotidiano:

- $2.6867 \times 10^{20}$  molecole/m<sup>2</sup>

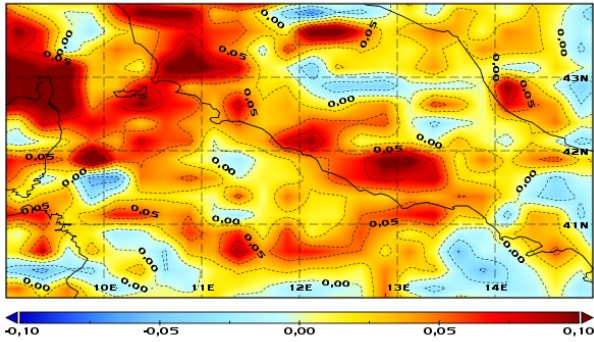
- $4.4615 \times 10^{-4} \text{ mol/m}^2$
- $2.1415 \times 10^{-5} \text{ kg[O}_3\text{]}/\text{m}_2$  (SACS, 2011).

### 3.1. Mappe 2D georeferenziate

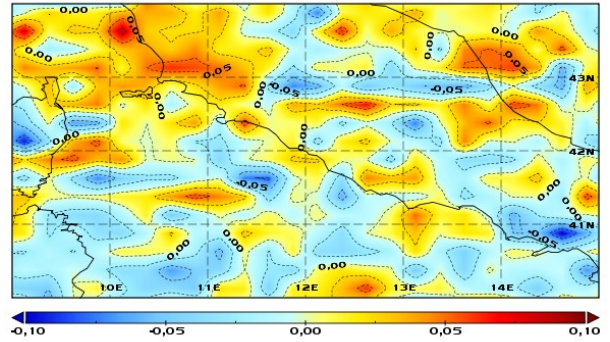
In questo paragrafo verranno mostrate le mappe georeferenziate dell'Italia Centrale che sono il risultato della lettura dei file netCDF da parte di Panoply. Sotto ogni immagine viene precisata l'unità di misura e l'eventuale costante moltiplicativa. Le curve di *isoconcentrazione* sono tratteggiate. Non è stato utilizzato un passo unico tra le curve per tutti gli inquinanti perché non è stato possibile omogeneizzare tutti i dati dato che i valori non hanno né la stessa unità di misura né lo stesso ordine di grandezza. Sono state scelte gradazioni di colore che vanno dal blu al rosso cioè da una concentrazione minore ad una maggiore.

### 3.1.1. SO<sub>2</sub>

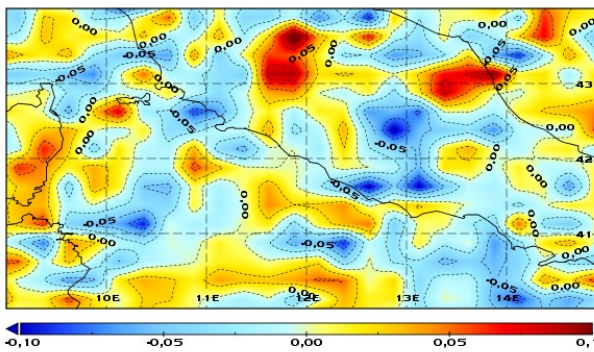
Il primo inquinante che andiamo ad analizzare è il diossido di zolfo. Il satellite in grado di rilevare le tracce di questo gas è l'AURA, in particolare il sensore chimico è l'OMI.



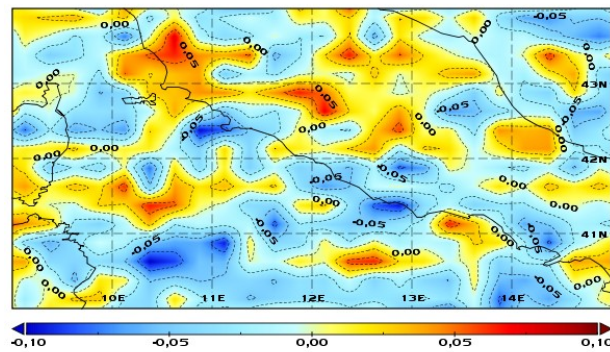
a) SO<sub>2</sub> Column Amount 2008 in DU



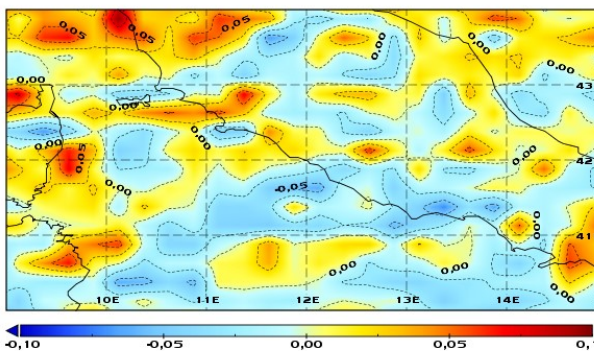
b) SO<sub>2</sub> Column Amount 2009 in DU



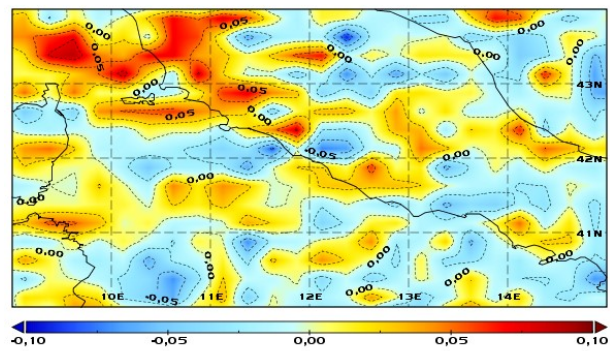
c) SO<sub>2</sub> Column Amount 2010 in DU



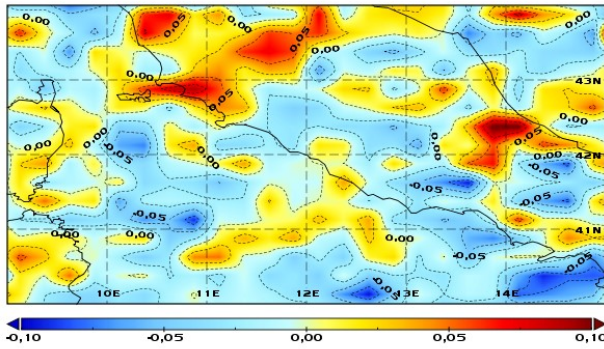
d) SO<sub>2</sub> Column Amount 2011 in DU



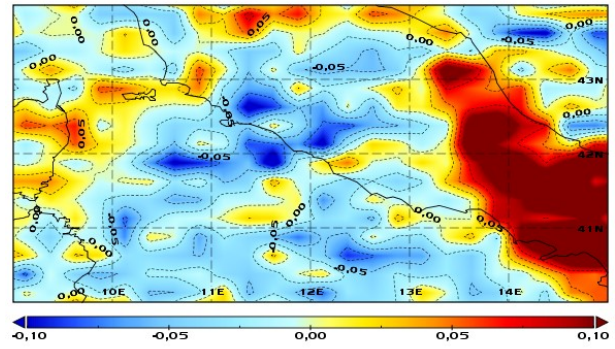
e) SO<sub>2</sub> Column Amount 2012 in DU



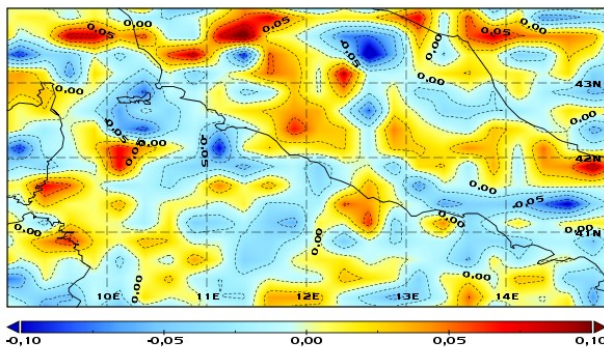
f) SO<sub>2</sub> Column Amount 2013 in DU



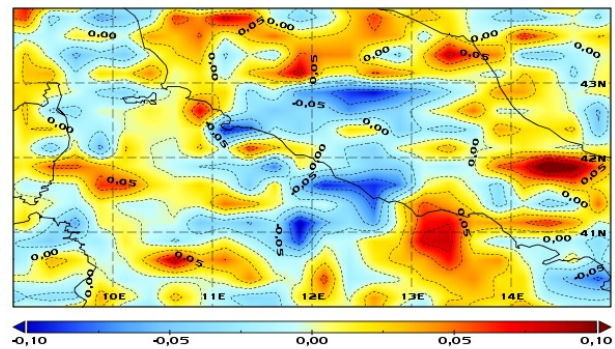
g)  $SO_2$  Column Amount 2014 in DU



h)  $SO_2$  Column Amount 2015 in DU



i)  $SO_2$  Column Amount 2016 in DU



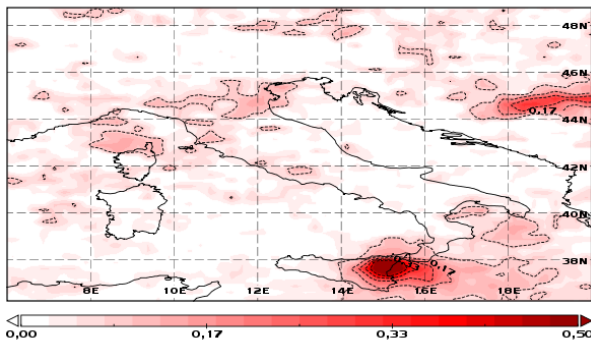
j)  $SO_2$  Column Amount 2017 in DU

Analizzando i valori presenti sulla mappa, è evidente che i valori sono molto bassi a parte nell'anno 2015 che verrà analizzato successivamente. In particolare, il range oscilla con valori negativi. Il significato fisico di un dato negativo non esiste, quindi deve per forza esserci una imprecisione sull'algoritmo di elaborazione del dato satellitare.

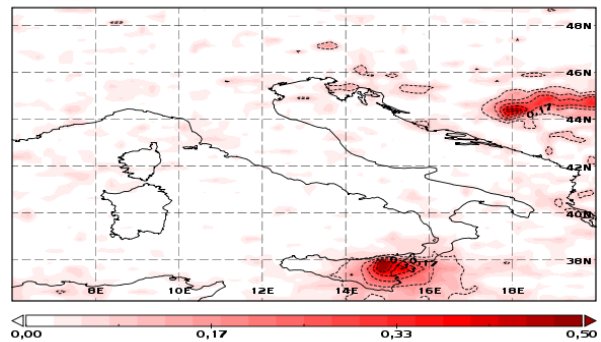
La prima ipotesi è che i valori registrati ricadono nella **dead band**, ovvero l'insensibilità del sensore ad uno specifico range di valori del segnale di entrata. In questo range il segnale di output rimane vicino ad un determinato valore (spesso pari a 0) in una zona definita dead band (Fraden, 2004).

Un'altra spiegazione potrebbe essere data dall'algoritmo del sensore che utilizza il metodo PSA di analisi dei componenti principali. I valori del diossido di zolfo sono spesso bassi, quindi il *retrieval algorithm* fornisce dei valori molto bassi sia negativi che positivi che, mediati, tenderanno a raggiungere lo zero. I valori negativi ottenuti non vengono rimossi per non alterare i dati (Acker, 2016).

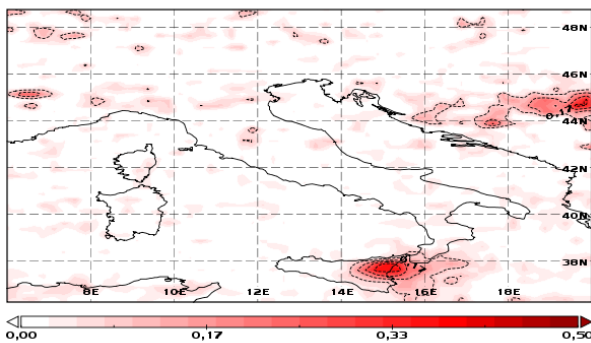
A parte queste considerazioni, è chiaro che i valori di SO<sub>2</sub> sono molto bassi. Probabilmente è dovuto, come già anticipato nel primo capitolo, al fatto che la produzione degli ossidi di zolfo è causata principalmente dalle eruzioni vulcaniche o dal carburante delle navi, condizioni non presenti nell'area metropolitana di Roma. Infatti, se si analizzano le mappe georeferenziate dell'Italia intera, si evince un'elevata presenza di composti di zolfo nell'intorno dei vulcani Etna e Stromboli in Sicilia. Soltanto in questo caso è stata cambiata la palette dei colori per rendere più visibile la distribuzione dell'inquinante.



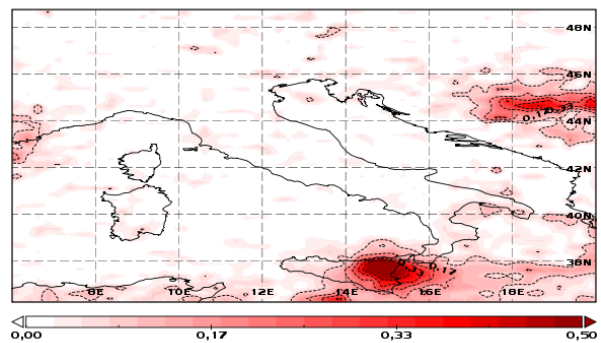
a) SO<sub>2</sub> Column Amount in DU 2008



b) SO<sub>2</sub> Column Amount in DU 2009

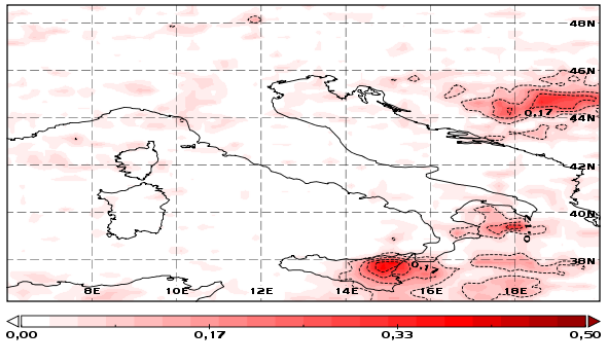


c) SO<sub>2</sub> Column Amount in DU 2010

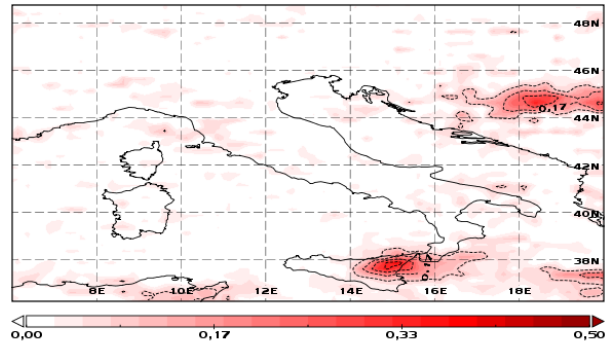


d) SO<sub>2</sub> Column Amount in DU 2011

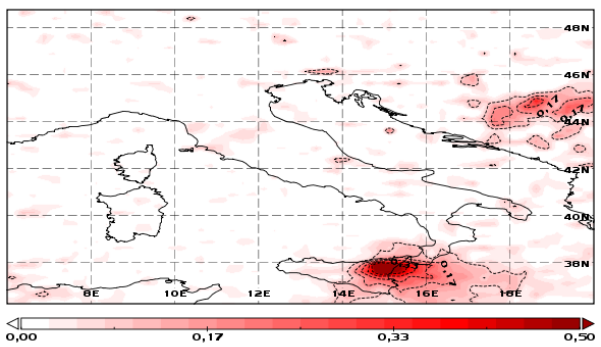




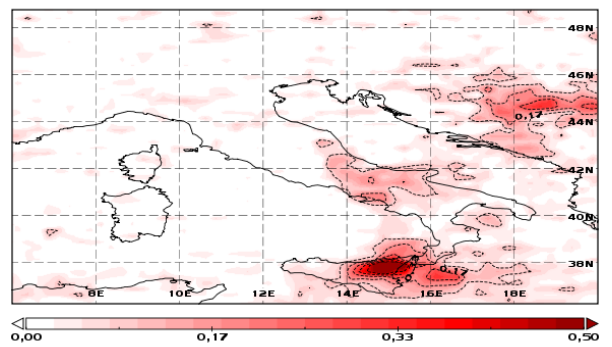
e)  $SO_2$  Column Amount in DU 2012



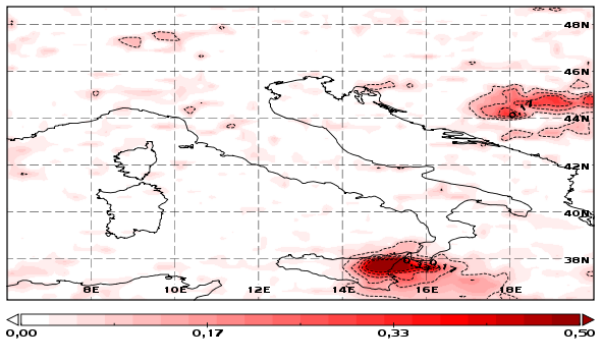
f)  $SO_2$  Column Amount in DU 2013



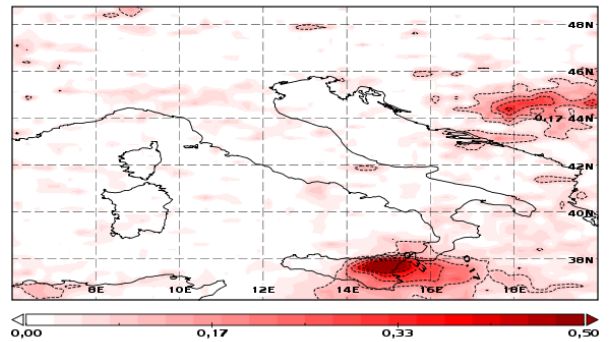
g)  $SO_2$  Column Amount in DU 2014



h)  $SO_2$  Column Amount in DU 2015



i)  $SO_2$  Column Amount in DU 2016

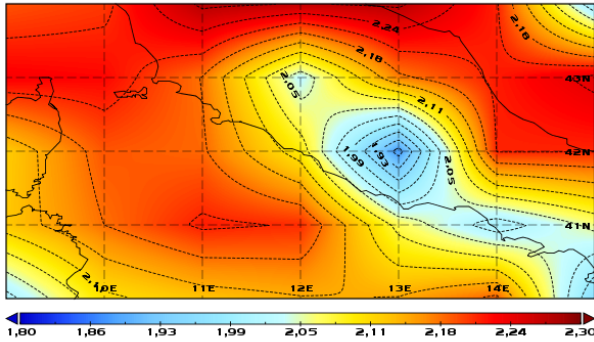


j)  $SO_2$  Column Amount in DU 2017

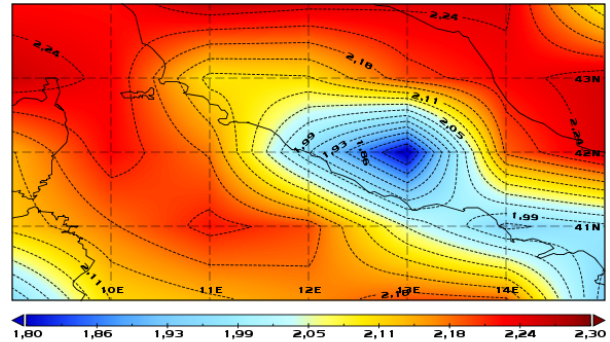
L'attività vulcanica ovviamente non dipende da fattori ambientali, ma soltanto da elementi geologici, quindi le concentrazioni sono circa le stesse per ogni anno con un'attività minore nel 2010, 2012 e 2013 e un'attività maggiore negli anni 2008, 2009, 2015, 2016, 2017. Si può facilmente ricostruire l'origine delle concentrazioni più elevate provenienti dal sud Italia nella mappa dell'Italia centrale del 2015, in quanto c'è stata l'eruzione dell'Etna in quell'anno.

### 3.1.2. CO

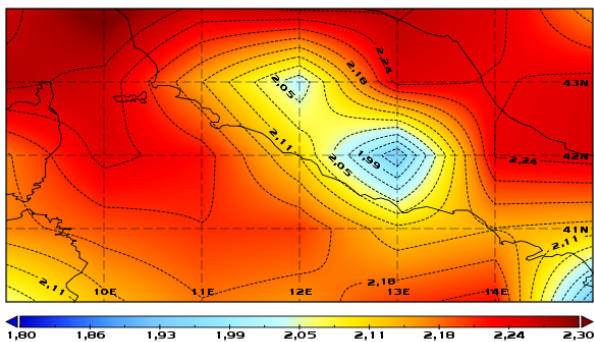
Analogamente per l'SO<sub>2</sub>, le figure seguenti illustrano l'andamento delle concentrazioni del monossido di carbonio. Il satellite a cui si fa riferimento è Terra e il sensore è MOPITT.



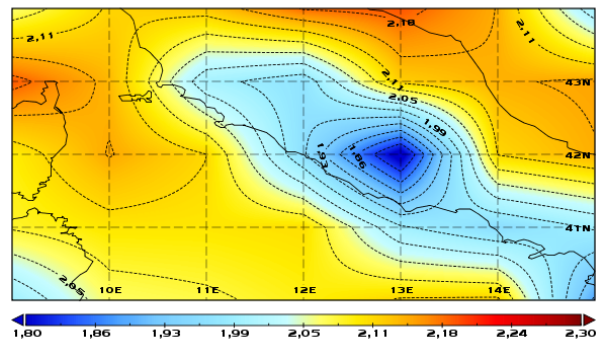
a) CO Total Column per 10<sup>18</sup>mol/cm<sup>2</sup> 2008



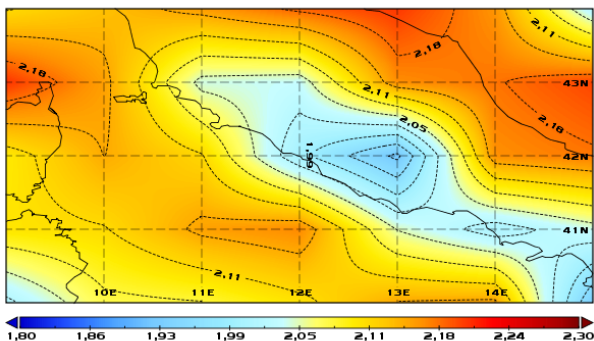
b) CO Total Column per 10<sup>18</sup>mol/cm<sup>2</sup> 2009



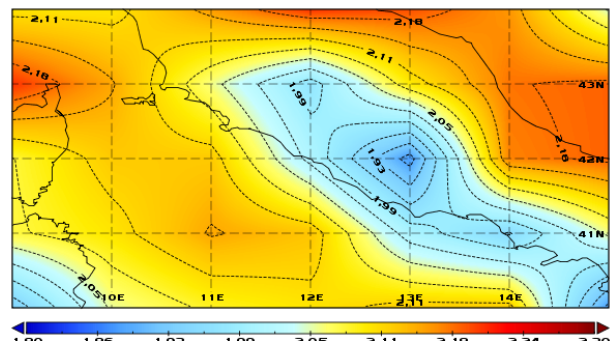
c) CO Total Column per 10<sup>18</sup>mol/cm<sup>2</sup> 2010



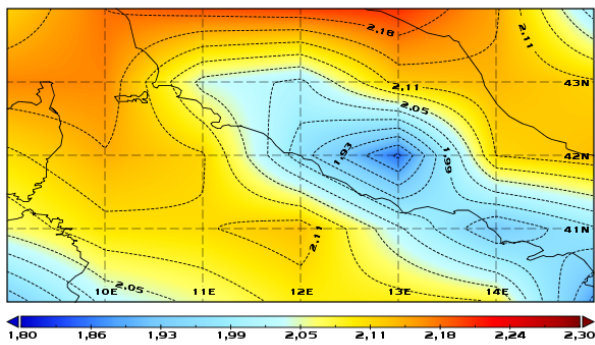
d) CO Total Column per 10<sup>18</sup>mol/cm<sup>2</sup> 2011



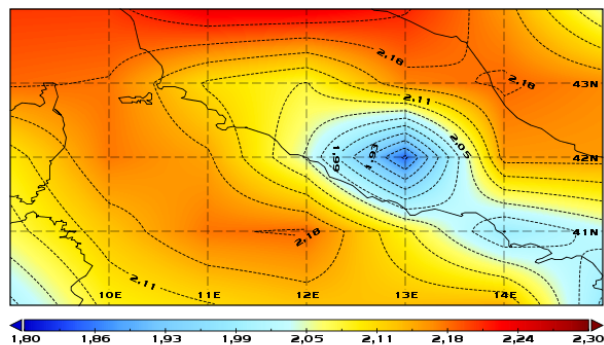
e) CO Total Column per 10<sup>18</sup>mol/cm<sup>2</sup> 2012



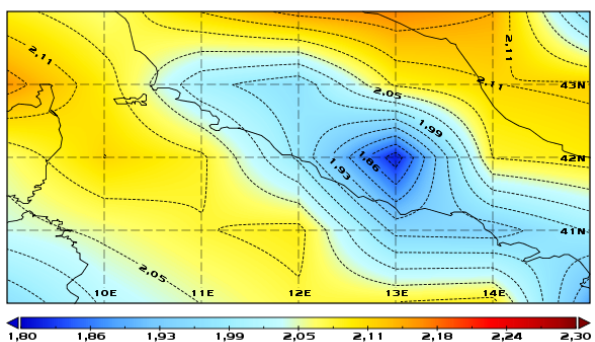
f) CO Total Column per 10<sup>18</sup>mol/cm<sup>2</sup> 2013



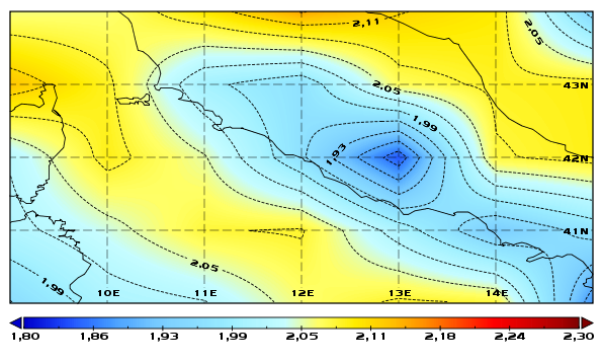
g) CO Total Column per  $10^{18}\text{mol}/\text{cm}^2$  2014



h) CO Total Column per  $10^{18}\text{mol}/\text{cm}^2$  2015



i) CO Total Column per  $10^{18}\text{mol}/\text{cm}^2$  2016

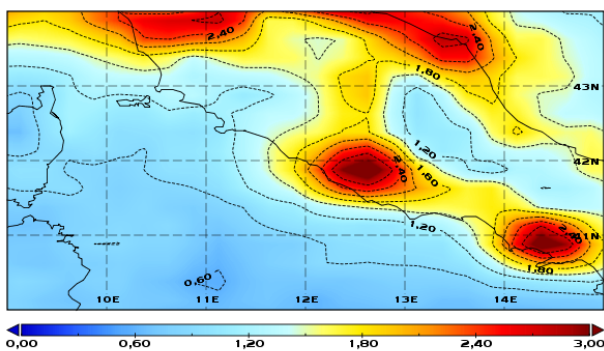


j) CO Total Column per  $10^{18}\text{mol}/\text{cm}^2$  2017

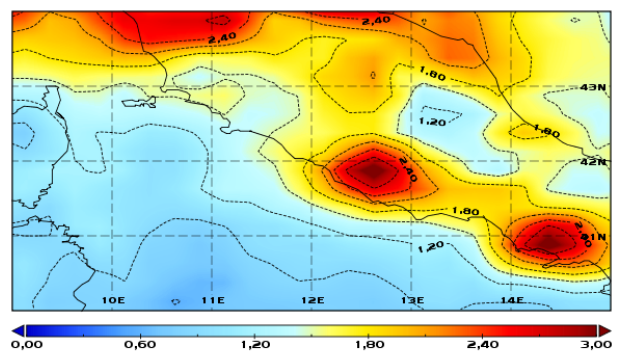
Nell'area appenninica i valori sono sensibilmente più bassi rispetto alle zone adiacenti. In particolare, i valori più alti si rilevano negli anni 2008 e 2010 nella parte settentrionale, il picco viene presumibilmente raggiunto in quest'ultimo anno. Le mappe 2D mostrano un trend a diminuire nel corso degli anni.

### 3.1.3. NO<sub>2</sub>

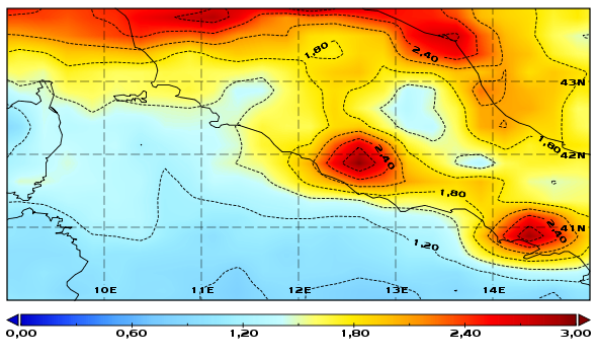
Anche in questo paragrafo vengono elencati i risultati dei plottaggi del programma Panoply. In particolare, si ricorda che il sensore utilizzato per il rilevamento e la registrazione dei dati è l'OMI. Essendo un inquinante prodotto principalmente dall'attività antropica, in particolar modo dal traffico veicolare, ci si aspetta una concentrazione rilevante delle zone ad alta urbanizzazione.



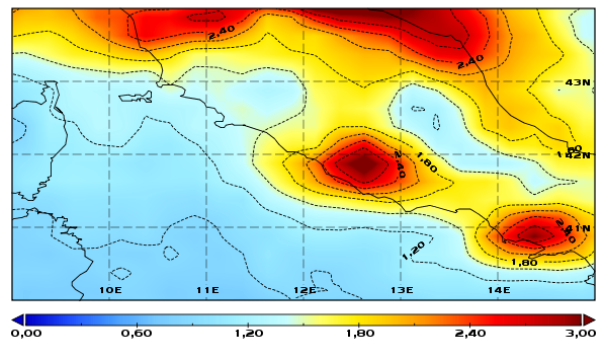
a) *NO<sub>2</sub> Tropospheric Column per 10<sup>15</sup>/cm<sup>2</sup> 2008*



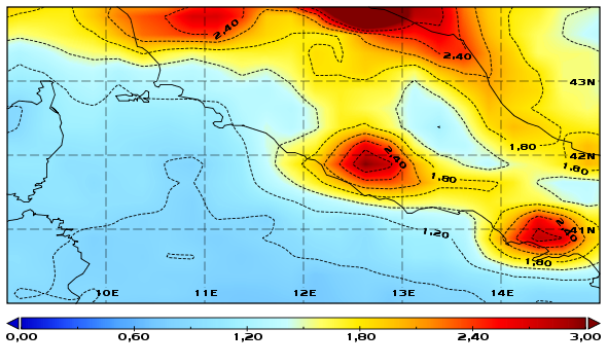
b) *NO<sub>2</sub> Tropospheric Column per 10<sup>15</sup>/cm<sup>2</sup> 2009*



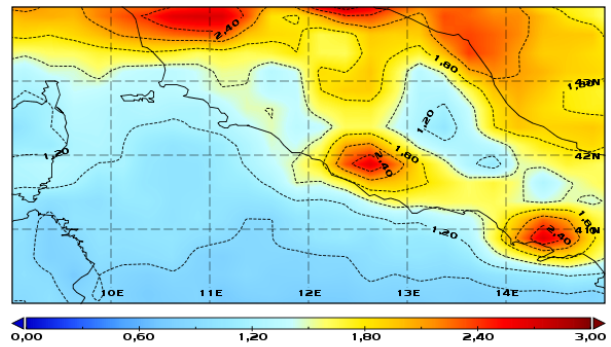
c) *NO<sub>2</sub> Tropospheric Column per 10<sup>15</sup>/cm<sup>2</sup> 2010*



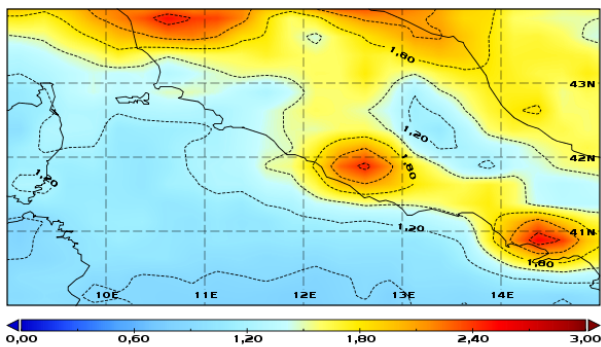
d) *NO<sub>2</sub> Tropospheric Column per 10<sup>15</sup>/cm<sup>2</sup> 2011*



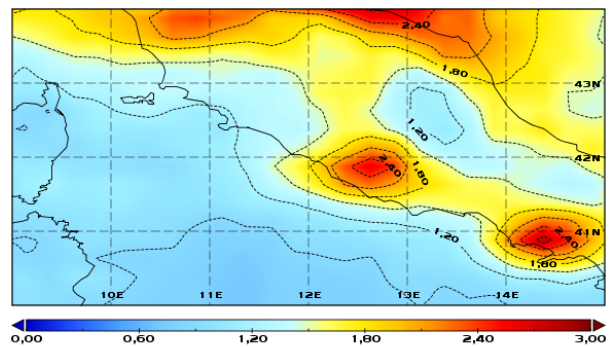
e)  $\text{NO}_2$  Tropospheric Column per  $10^{15}/\text{cm}^2$   
2012



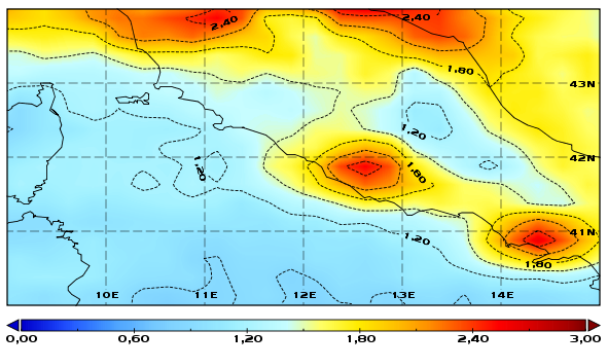
f)  $\text{NO}_2$  Tropospheric Column per  $10^{15}/\text{cm}^2$   
2013



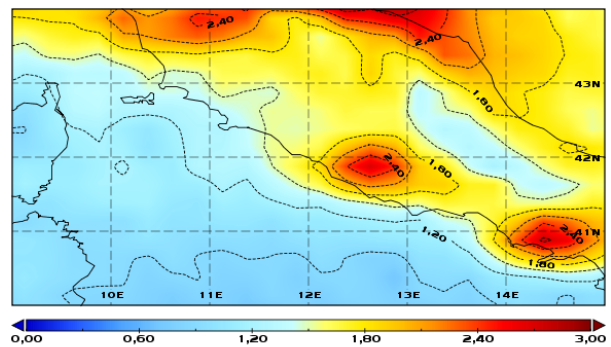
g)  $\text{NO}_2$  Tropospheric Column per  $10^{15}/\text{cm}^2$   
2014



h)  $\text{NO}_2$  Tropospheric Column per  $10^{15}/\text{cm}^2$   
2015



i)  $\text{NO}_2$  Tropospheric Column per  $10^{15}/\text{cm}^2$   
2016



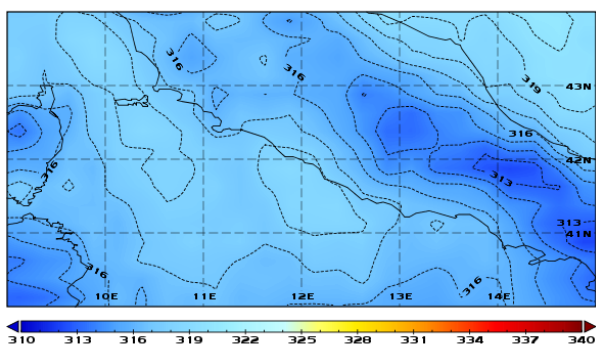
j)  $\text{NO}_2$  Tropospheric Column per  $10^{15}/\text{cm}^2$   
2017

Dalle mappe si deducono valori alti di  $\text{NO}_2$  nelle aree metropolitane di Roma, Napoli e, parzialmente, nella pianura Padana (non mostrata). Nell'area di Roma non si evince una particolare differenza tra le distribuzioni di  $\text{NO}_2$  nei vari anni. Le concentrazioni massime vengono rilevate nel 2009 e nel 2011, mentre le minime nel 2013.

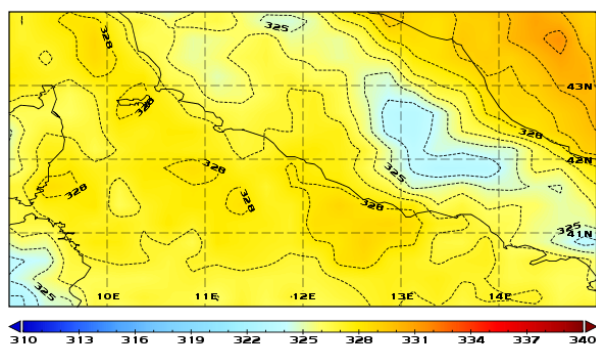
### 3.1.4. $O_3$

Le ultime mappe mostrate riguardano l'inquinante più reattivo, l'ozono. Data la sua capacità di reagire con tutto ciò che permette lo scambio dell'atomo in più di ossigeno, l' $O_3$  risulta essere un inquinante molto pericoloso. Esso viene registrato del sensore OMI.

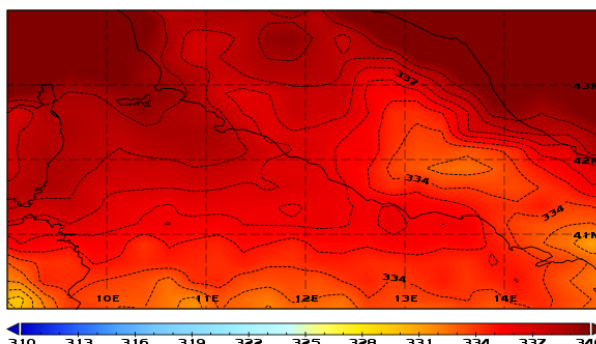
Per l'ozono l'intervallo dei valori considerati non è ottimale per la visualizzazione delle gradazioni della palette dei colori nei singoli anni, ma utilizzando un'unica scala è possibile stimare le variazioni nei singoli anni. Inoltre, considerando che 300 DU sono le unità minime presenti in atmosfera (date dall'ozonosfera), le concentrazioni oscillano tra le 10 DU e le 40 DU in più rispetto alle quantità presenti soltanto nello strato suddetto. È intuitivo pensare che le quantità "eccedenti" si trovino nella troposfera, che è soggetta alla presenza dei precursori e dell'irraggiamento solare/termico.



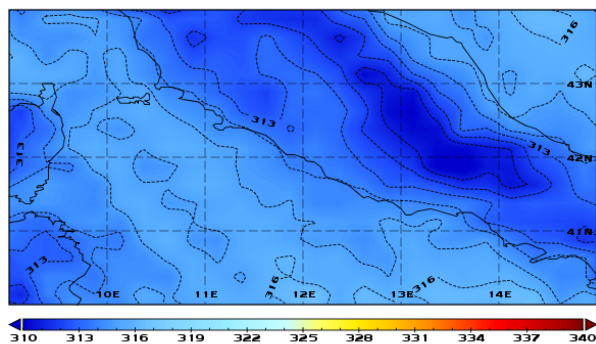
a)  $O_3$  Ozone Total Column (DOAS) in DU 2008



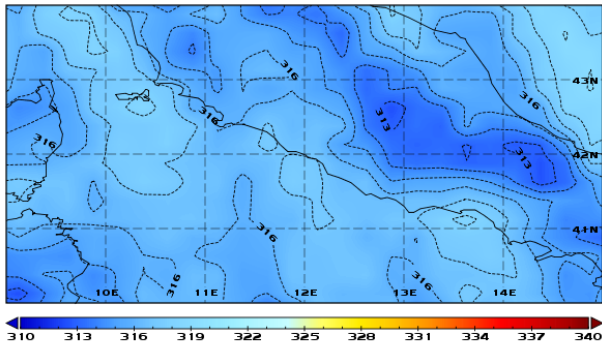
b)  $O_3$  Ozone Total Column (DOAS) in DU 2009



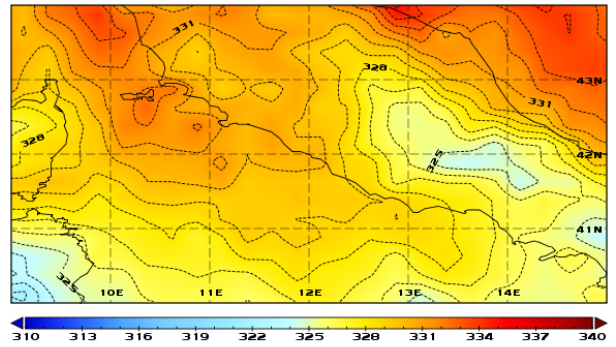
c)  $O_3$  Ozone Total Column (DOAS) in DU 2010



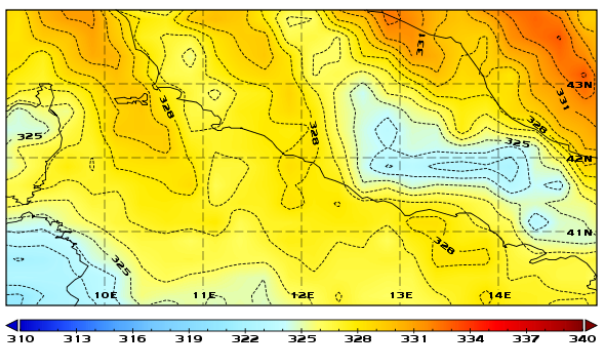
d)  $O_3$  Ozone Total Column (DOAS) in DU 2011



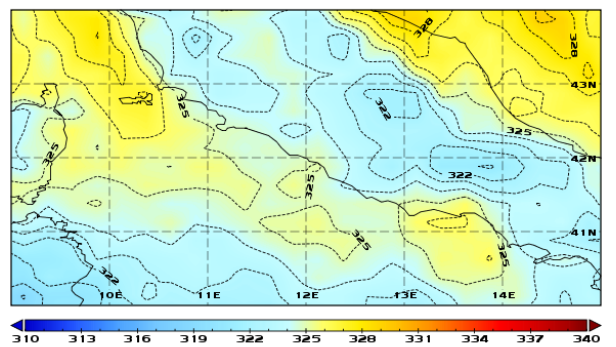
e)  $O_3$  Ozone Total Column (DOAS) in DU  
2012



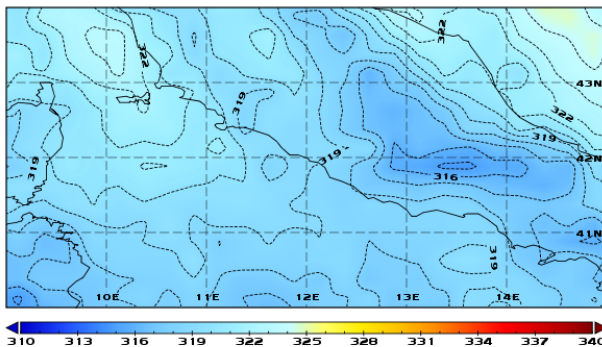
f)  $O_3$  Ozone Total Column (DOAS) in DU  
2013



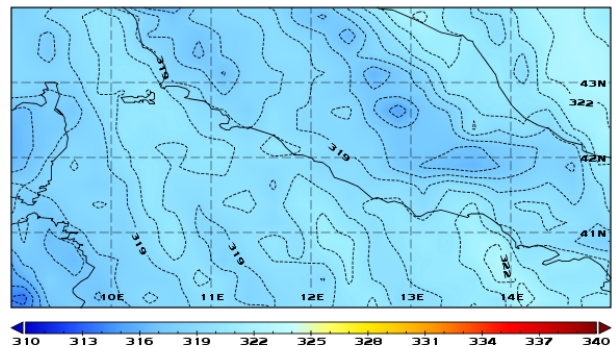
g)  $O_3$  Ozone Total Column (DOAS) in DU  
2014



h)  $O_3$  Ozone Total Column (DOAS) in DU  
2015



i)  $O_3$  Ozone Total Column (DOAS) in DU  
2016



j)  $O_3$  Ozone Total Column (DOAS) in DU  
2017

Risulta evidente la differenza tra i dati del 2010 e quelli del 2011. Questa differenza verrà analizzata più nel dettaglio nel capitolo delle serie temporali. Per quanto riguarda gli altri anni, si hanno concentrazioni più basse nel 2008 e nel 2012 e concentrazioni medie negli altri anni.

### 3.2. Serie temporali

Dai dati netCDF estratti con il programma Panoply, sono stati considerati i valori corrispondenti al punto di coordinate 41,5° di latitudine e 12,3° di longitudine. Quindi, a differenza delle mappe mostrate nel capitolo precedente, i dati relativi alle serie temporali sono puntuali con riferimento all'area metropolitana di Roma. I dati puntuali focalizzano l'attenzione su una zona in particolare, andando a fare un distinguo non possibile per le mappe georeferenziate, se non a livello approssimativo.

Vengono riportati grafici dove in ascissa c'è il tempo (mesi o anni) e in ordinata le concentrazioni con le opportune unità di misura. La linea rossa continua è la media annuale nei primi dieci grafici di ogni inquinante, mentre rappresenta la media decennale nell'ultimo grafico di ogni capitolo. Analizzare la media in un lasso di tempo maggiore aiuta a focalizzare l'attenzione sugli eventi di maggior rilevanza dal punto di vista di impatto ambientale.

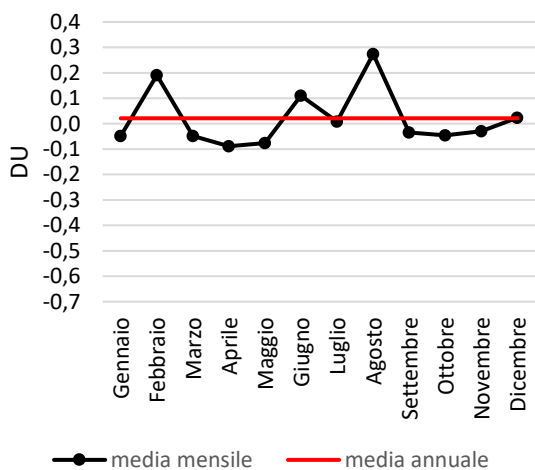
In aggiunta ai grafici suddetti, sono stati elaborati anche grafici riassuntivi che uniscono i dati del decennio di riferimento, in modo da evidenziare un andamento confrontabile nei singoli periodi.



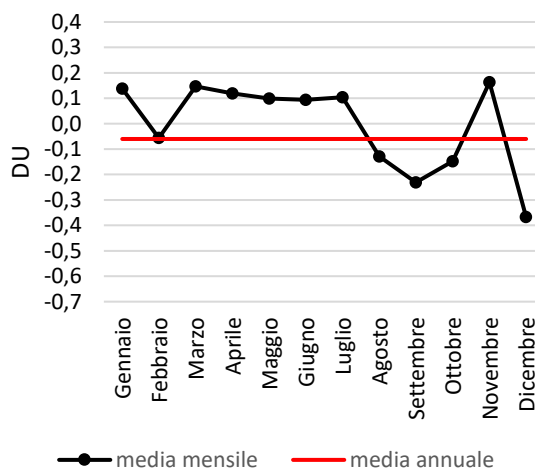
### 3.2.1. SO<sub>2</sub>

I seguenti grafici mostrano l'andamento della concentrazione dell'SO<sub>2</sub> su Roma. Avendo osservato le mappe georeferenziate, ci si aspetta di avere dei valori prossimi allo zero o, comunque, la media annuale dovrebbe avvicinarsi molto al valore nullo.

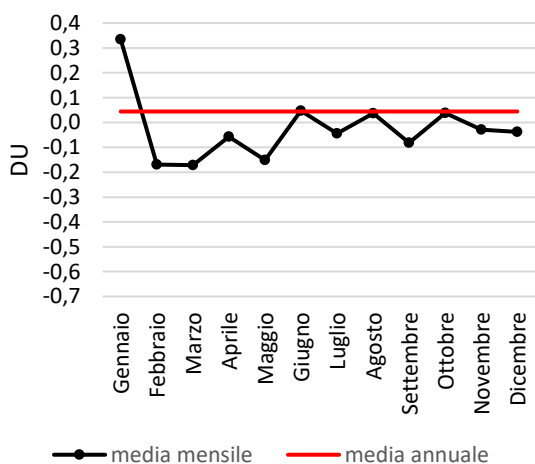
a) Serie temporale SO<sub>2</sub> 2008



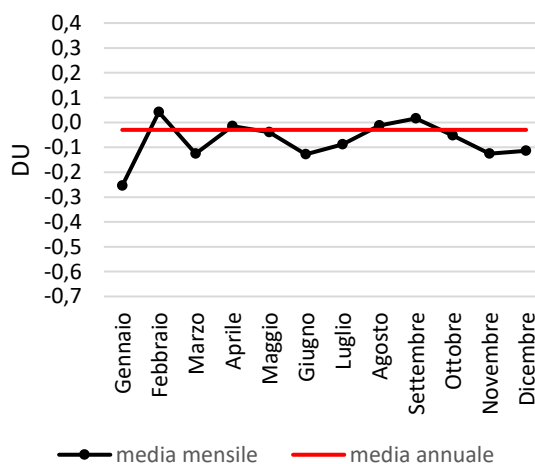
b) Serie temporale SO<sub>2</sub> 2009



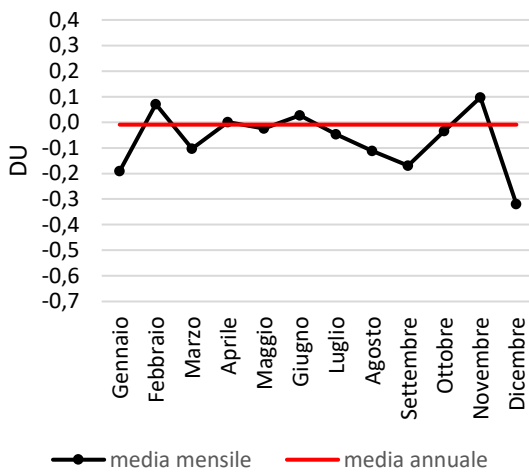
c) Serie temporale SO<sub>2</sub> 2010



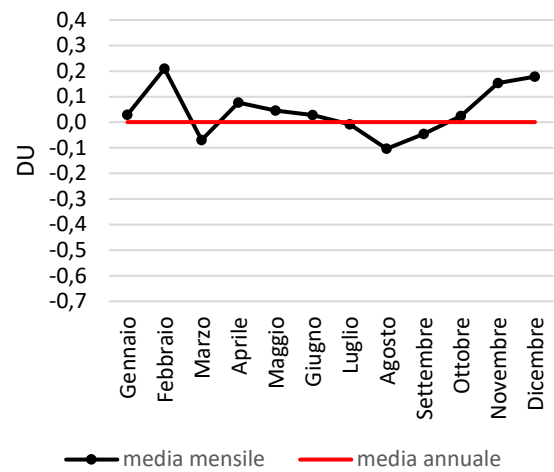
d) Serie temporale SO<sub>2</sub> 2011



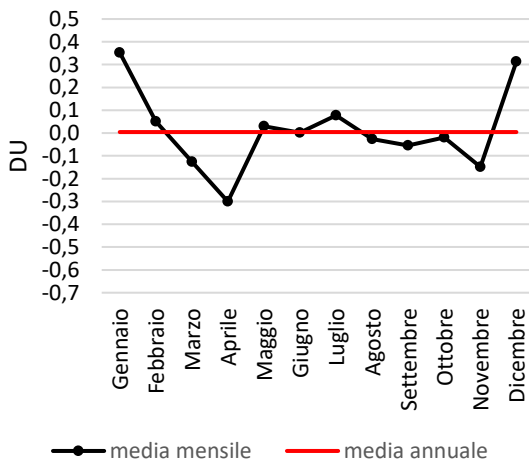
e) Serie temporale SO<sub>2</sub> 2012



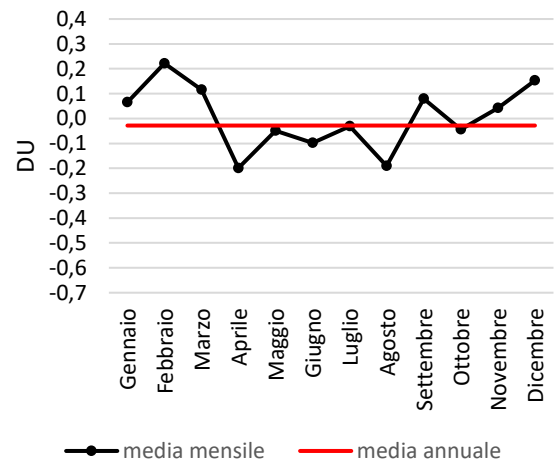
f) Serie temporale SO<sub>2</sub> 2013



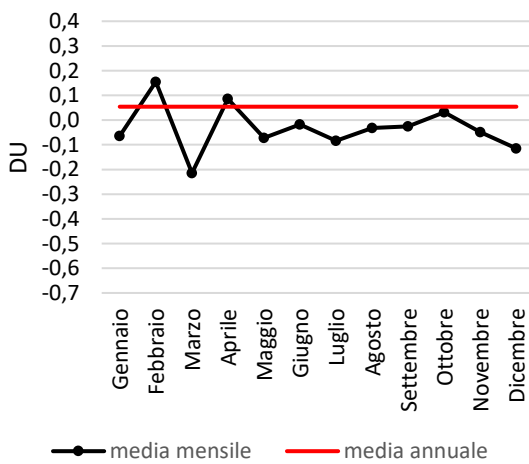
g) Serie temporale SO<sub>2</sub> 2014



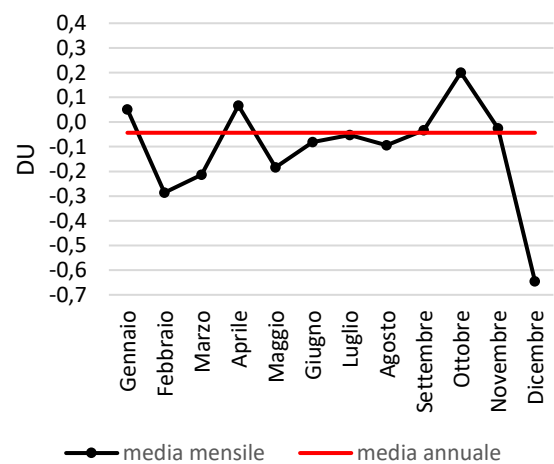
h) Serie temporale SO<sub>2</sub> 2015



i) Serie temporale SO<sub>2</sub> 2016

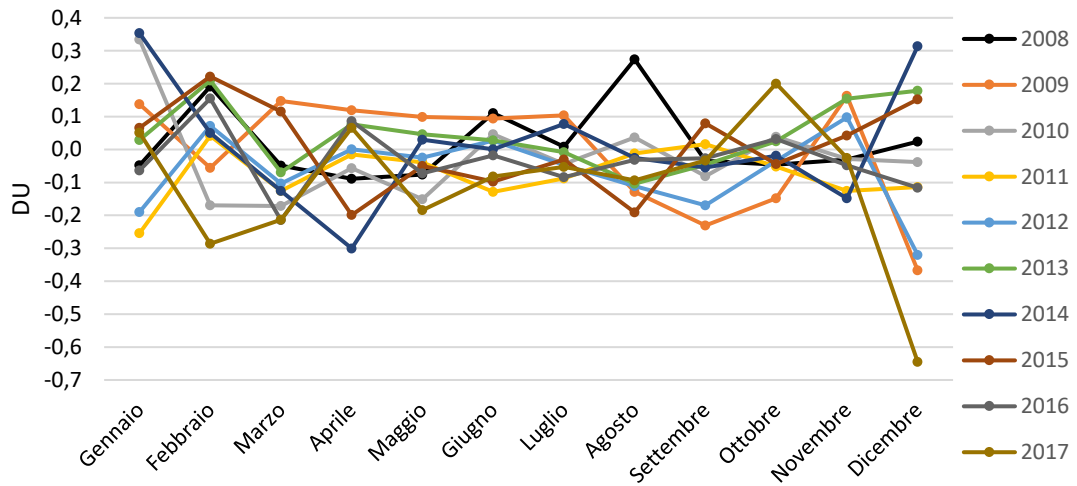


l) Serie temporale SO<sub>2</sub> 2017



Dato che non sono evidenti similitudini tra le varie medie mensili, queste ultime sono state raggruppate in un unico grafico:

m) Serie temporale mensile SO<sub>2</sub> 2008-2017

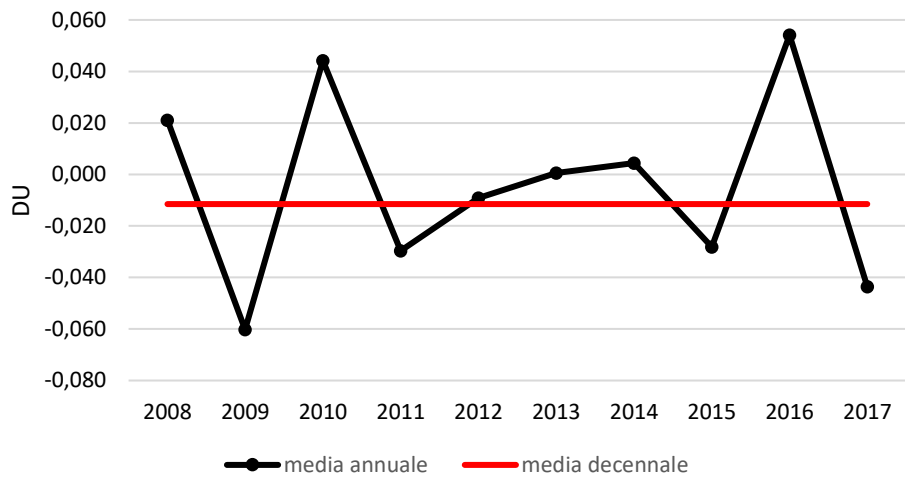


Osservando l'insieme dei grafici nel decennio 2008-2017, risultano evidenti i picchi massimi ad agosto 2008, gennaio 2010, gennaio e dicembre 2014. Probabilmente essi sono stati causati da un evento singolare quale, per esempio, un'eruzione vulcanica.

Effettivamente, non è possibile evidenziare un comportamento simile tra gli anni. Questo, come precedentemente ipotizzato, potrebbe essere dovuto all'elaborazione dell'algoritmo.

Raggruppando tutte medie annuali in un solo grafico e facendo quindi la media decennale, il risultato ottenuto è il seguente dove si osservano valori trascurabili.

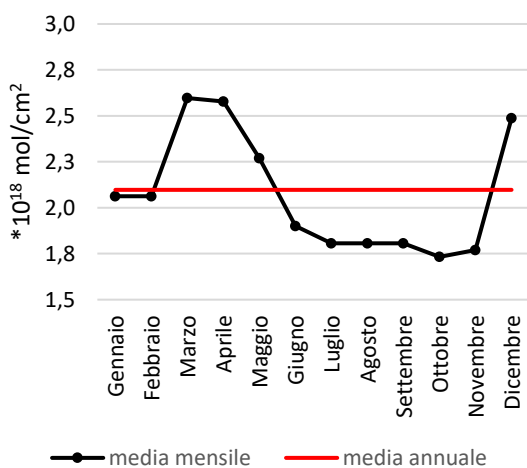
n) Serie temporale annuale SO<sub>2</sub> 2008-2017



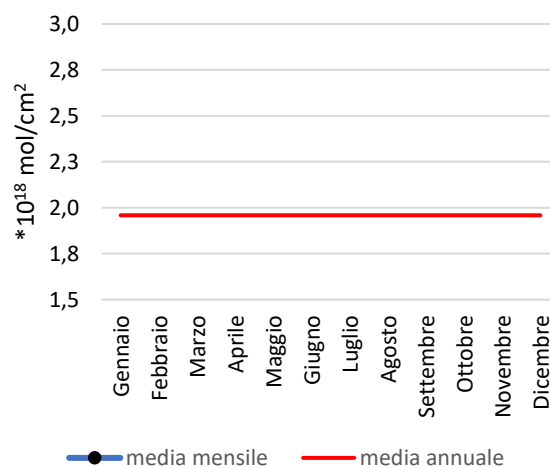
### 3.2.2. CO

Le prossime serie temporali riguardano il CO. Alcuni dati sono palesemente errati (- $9999,99 \cdot 10^{18}$  mol/cm<sup>2</sup>) quindi sono stati depennati dall'analisi. Nell'anno 2009 mancano le informazioni mensili, mentre è presente soltanto la media annuale.

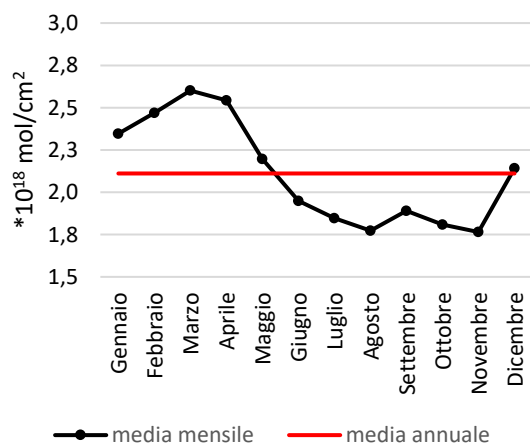
a) Serie temporale CO 2008



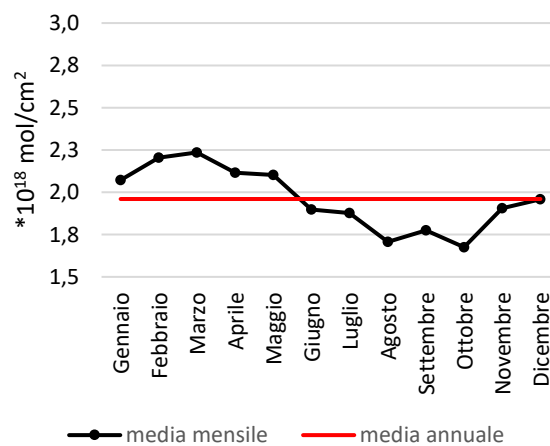
b) Serie temporale CO 2009



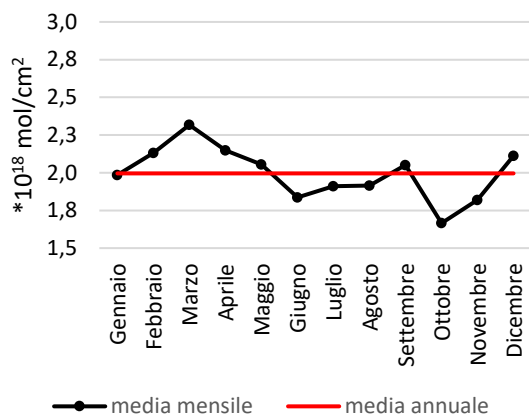
c) Serie temporale CO 2010



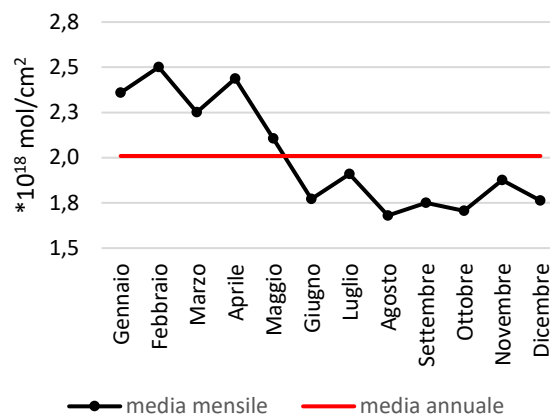
d) Serie temporale CO 2011



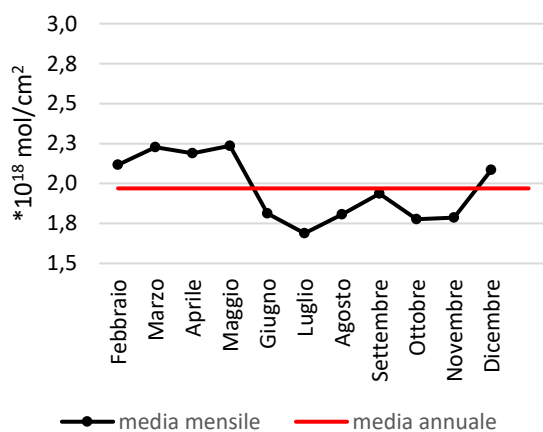
e) Serie temporale CO 2012



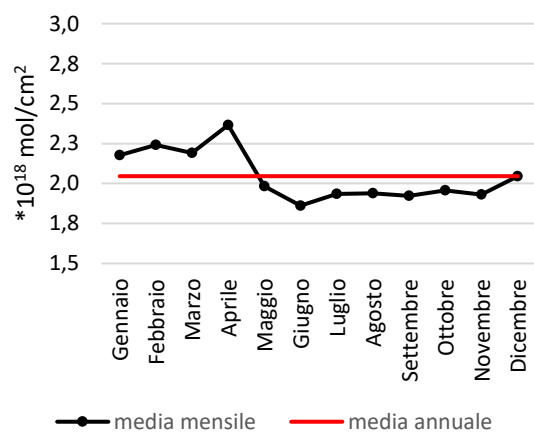
f) Serie temporale CO 2013



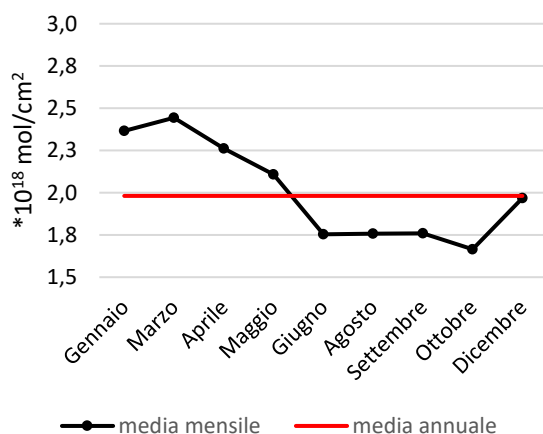
g) Serie temporale CO 2014



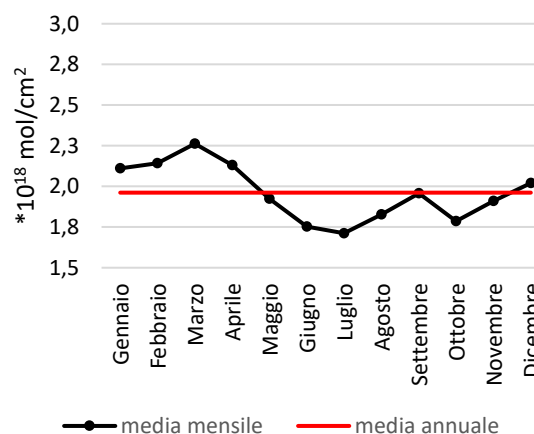
h) Serie temporale CO 2015



i) Serie temporale CO 2016

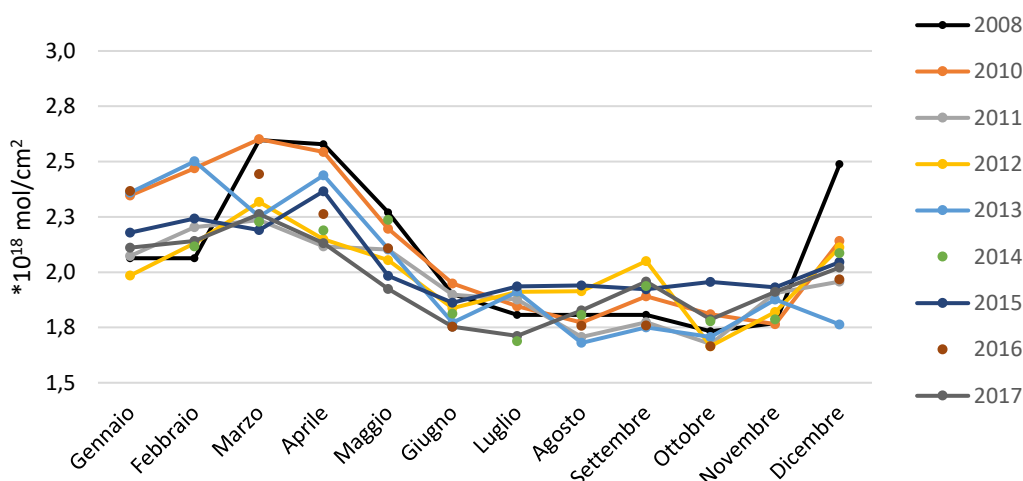


l) Serie temporale CO 2017



Nel seguente grafico riassuntivo, negli anni in cui i dati raccolti non sono completi, sono stati inseriti i valori noti come punti singoli.

m) Serie temporale mensile CO 2008-2017

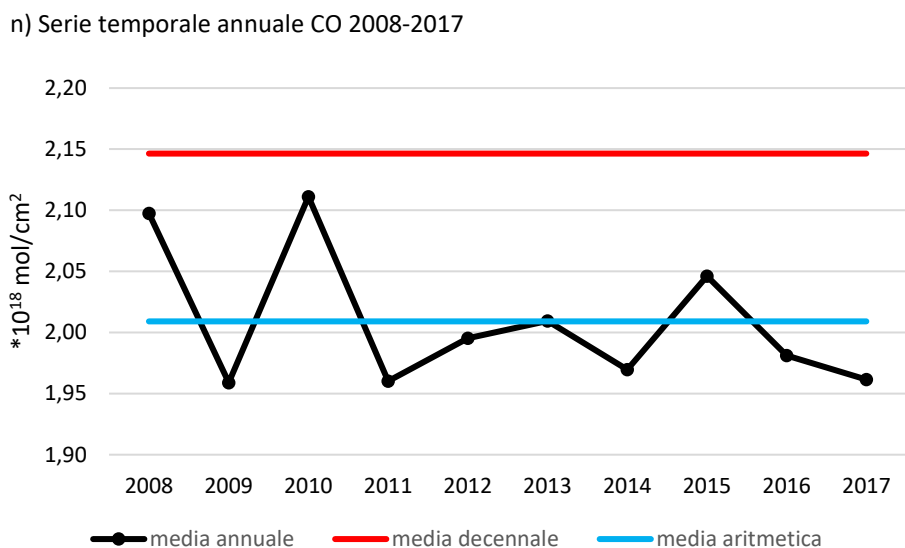


I valori di massimo sono presenti prevalentemente nei mesi primaverili (marzo, aprile), mentre i picchi minimi durante i mesi estivi- autunnali (luglio-ottobre).

È interessante osservare parallelamente un caso studio che può essere una linea guida per l'analisi in questione. Yao Tè della Sorbonne Universités ha analizzato l'andamento della CO colonnare nelle città di Parigi, Jungfrauoch (Svizzera) e Wollongong (Nuovo Galles del Sud, Australia) cercando di trovare una correlazione tra la distribuzione verticale del monossido di carbonio e le cause delle emissioni. Si ha una notevole similitudine dei nostri dati su Roma con quelli dei siti dell'emisfero Nord. Infatti, in questa review si osserva il massimo tra marzo e aprile e il minimo tra settembre e ottobre. Oltre alle misure colnari, sono stati presi in considerazione i dati sulla superficie. Il time lag tra le misure di superficie e quelle verticali della seasonal di concentrazione è di 2 mesi. Al fine di interpretare queste variazioni, è stato utilizzato il modello GEOS-Chem (Goddard Earth Observing System chemical transport model) che ha dato come risultato il fatto che le concentrazioni superficiali sono dovute principalmente a fattori antropogenici, mentre quelle colnari al trasporto di masse d'aria da sorgenti lontane. Lo scostamento dei dati superficiali di due mesi, fa sì che il massimo si verifichi tra gennaio e febbraio, proprio quando si ha un frequente utilizzo dei riscaldamenti e il PBL ha uno spessore più piccolo. Viceversa, il minimo tra luglio e settembre si verifica proprio quando si ha un irraggiamento solare maggiore. (Té, et al., 2016)

Per avvalorare questa ipotesi sarebbe stato utile analizzare i dati superficiali del CO registrati dal sensore MERRA2, ma, essendo un'analisi molto più lunga e non conforme con l'obiettivo primario di questa tesi, si è deciso di non proseguire l'indagine.

La media decennale, invece, è la seguente:



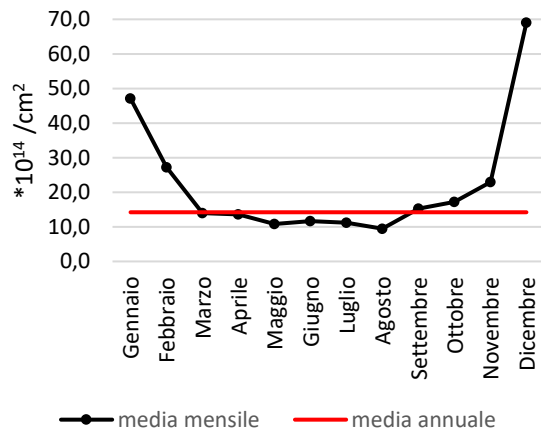
La media decennale dell'ultimo grafico non è esatta. In questo caso è possibile vedere la media calcolata aritmeticamente in azzurro. I minimi di concentrazione si sono verificati nel 2009, 2011 e 2017, mentre i massimi nel 2008 e 2010. Si osserva un avvicinamento alla media decennale dal 2011 in poi.



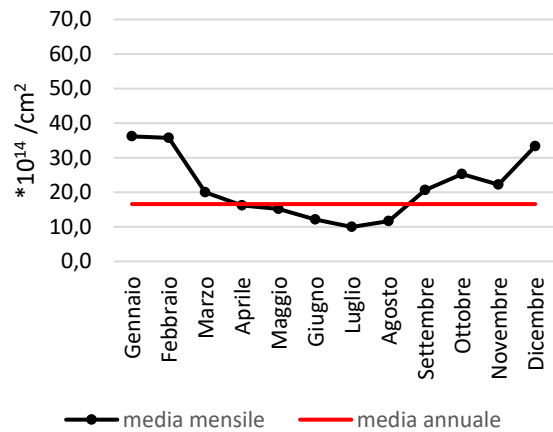
### 3.2.3. NO<sub>2</sub>

I seguenti grafici rappresentano le serie temporali delle concentrazioni dell'NO<sub>2</sub> dal 2008 al 2017.

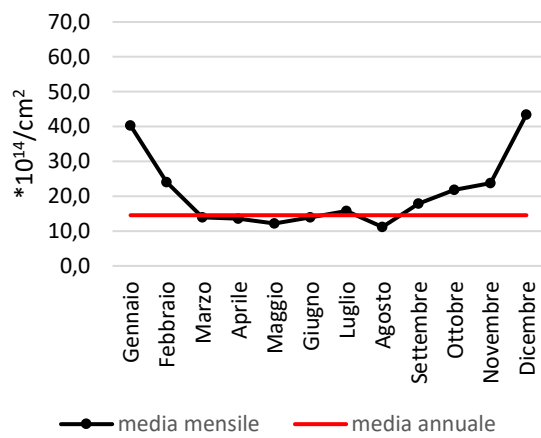
a) Serie temporale NO<sub>2</sub> 2008



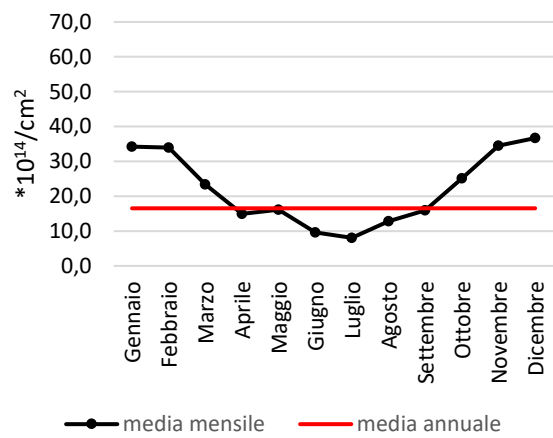
b) Serie temporale NO<sub>2</sub> 2009



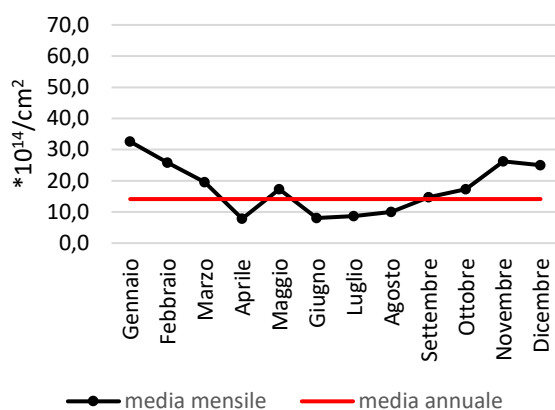
c) Serie temporale NO<sub>2</sub> 2010



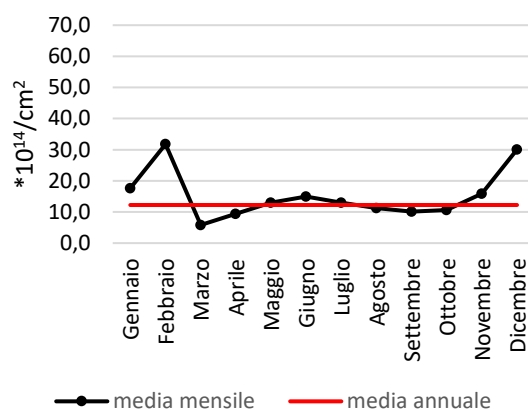
d) Serie temporale NO<sub>2</sub> 2011



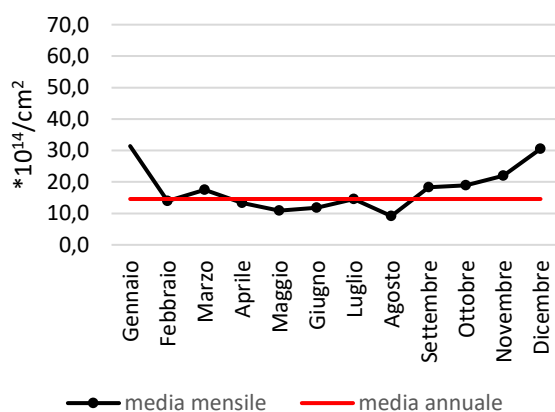
e) Serie temporale NO<sub>2</sub> 2012



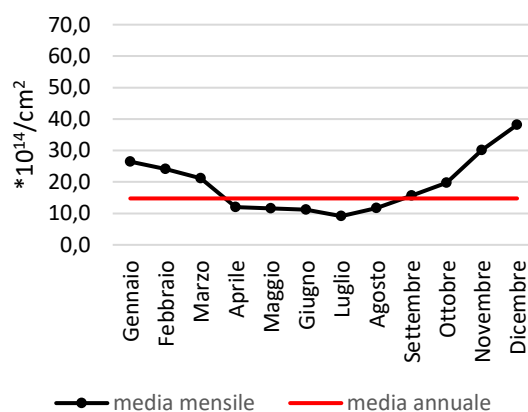
f) Serie temporale NO<sub>2</sub> 2013



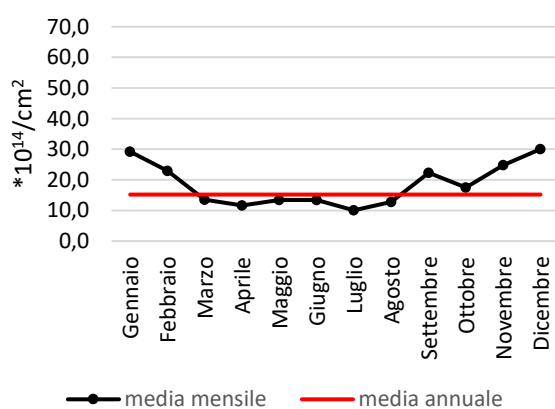
g) Serie temporale NO<sub>2</sub> 2014



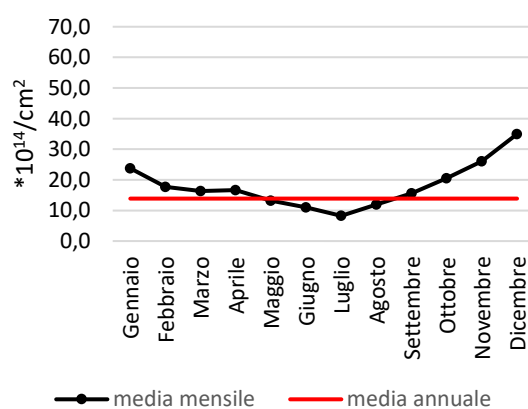
h) Serie temporale NO<sub>2</sub> 2015



i) Serie temporale NO<sub>2</sub> 2016

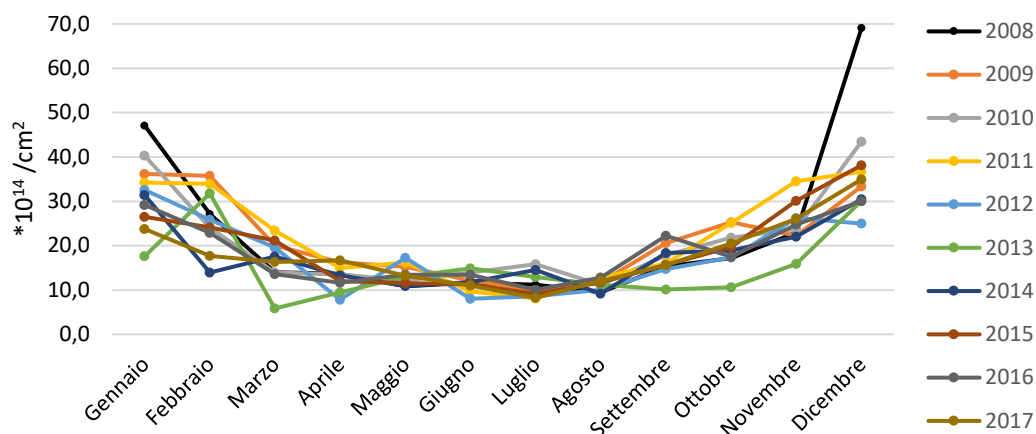


l) Serie temporale NO<sub>2</sub> 2017



Come nei casi precedenti, vengono incorporate tutte le informazioni mensili nel seguente grafico.

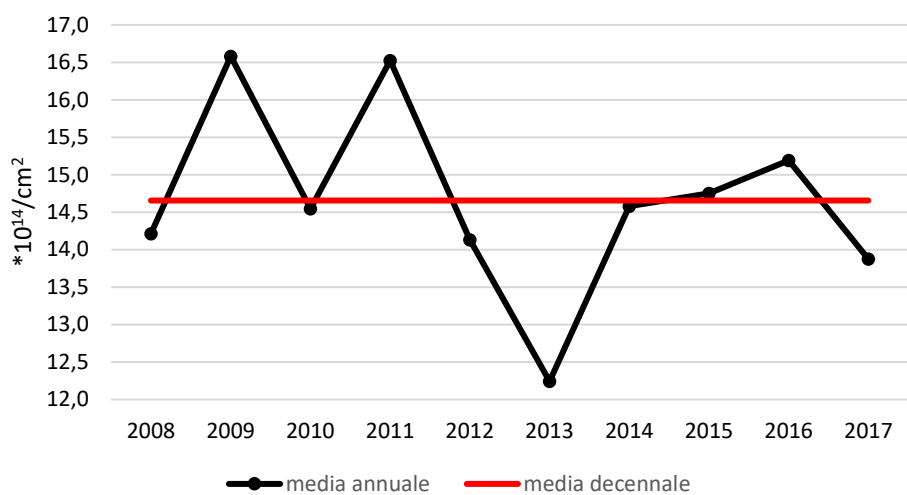
m) Serie temporale mensile NO<sub>2</sub> 2008-2017



L'andamento dell'inquinante nel decennio 2008-2017 è abbastanza concordante nei singoli anni. In effetti si osservano i picchi di massimo nel periodo invernale (dicembre-gennaio) e i minimi durante l'estate (giugno luglio). Inoltre, da febbraio fino a giugno/luglio l'andamento è decrescente, poi inizia ad essere crescente fino a raggiungere il massimo a dicembre. Questa distribuzione coincide con il fatto che in inverno si ha un utilizzo maggiore dei riscaldamenti e il PBL ha uno spessore ridotto, quindi la concentrazione aumenta; viceversa per l'estate nella quale l'irraggiamento favorisce il rimescolamento degli inquinanti.

Le medie delle medie annuali e quella decennale sono rappresentate nel seguente grafico.

n) Serie temporale annuale NO<sub>2</sub> 2008-2017

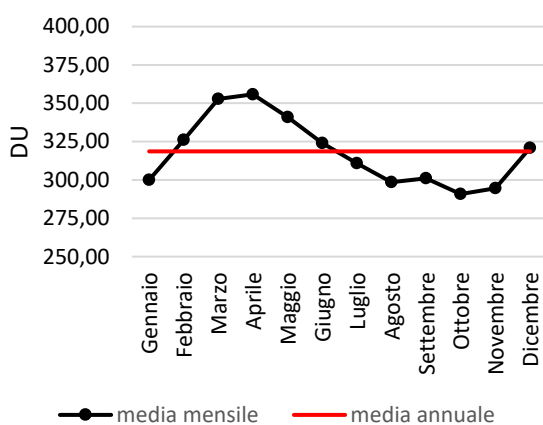


Le medie annuali non si discostano enormemente dalla media e si possono osservare i massimi negli anni 2009 e 2011 e il minimo nel 2013. Dal 2014 in poi l'andamento si avvicina molto alla media decennale.

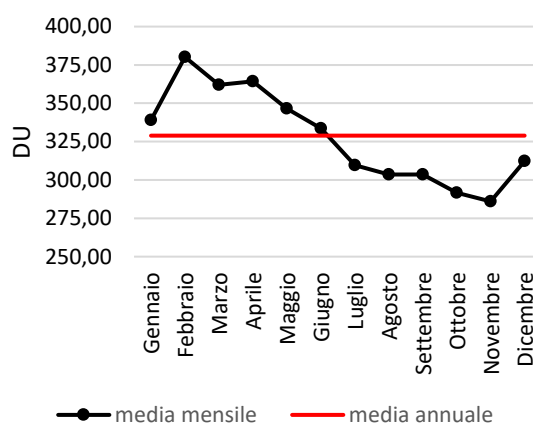
### 3.2.4. O<sub>3</sub>

I grafici seguenti mostrano le serie temporali dell'ozono nelle quali si presterà particolare attenzione nell'anno 2010 in cui si verifica il picco massimo già visto nelle mappe georeferenziate e, apparentemente, non giustificato in quanto l'anno successivo è stato registrato il valore minimo del decennio 2008-2017.

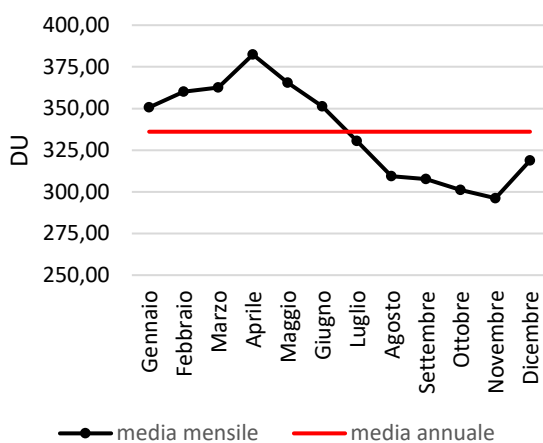
a) Serie temporale O<sub>3</sub> 2008



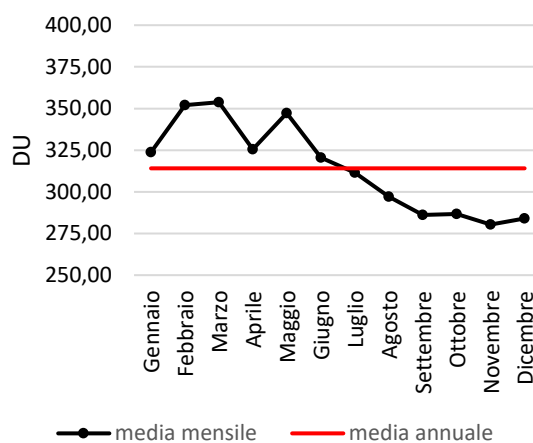
b) Serie temporale O<sub>3</sub> 2009



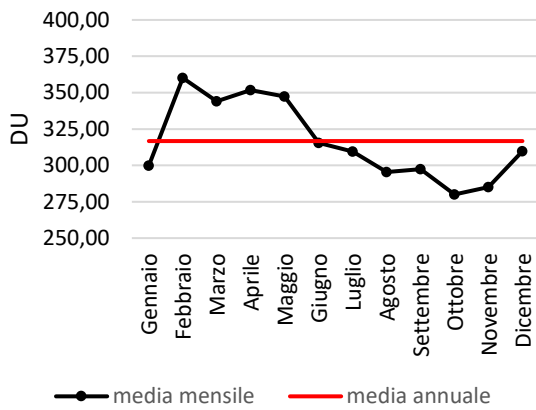
c) Serie temporale O<sub>3</sub> 2010



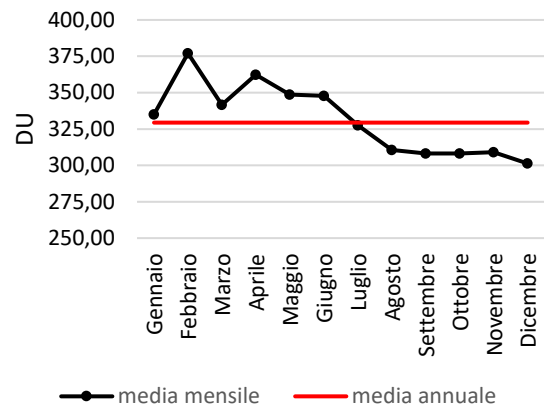
d) Serie temporale O<sub>3</sub> 2011



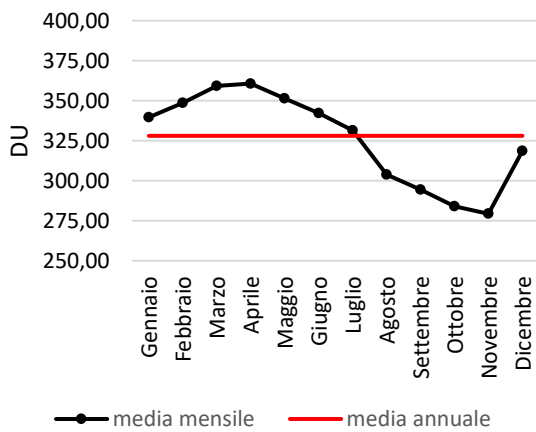
e) Serie temporale O<sub>3</sub> 2012



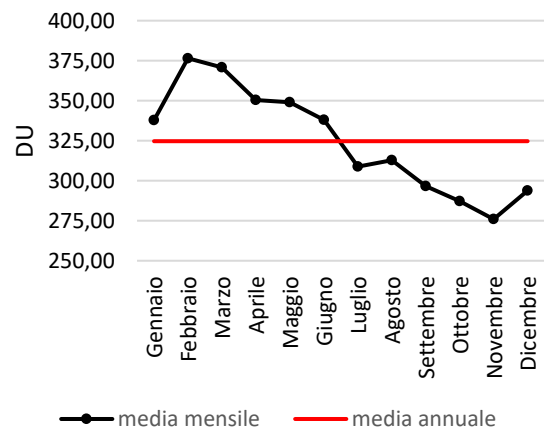
f) Serie temporale O<sub>3</sub> 2013



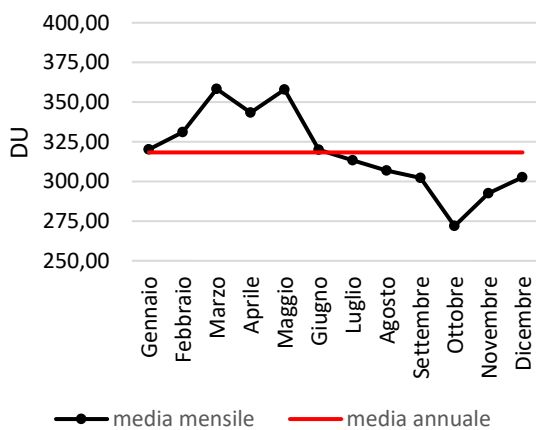
g) Serie temporale O<sub>3</sub> 2014



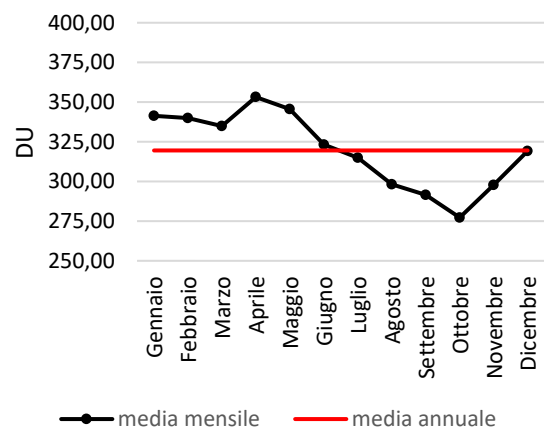
h) Serie temporale O<sub>3</sub> 2015



i) Serie temporale O<sub>3</sub> 2016

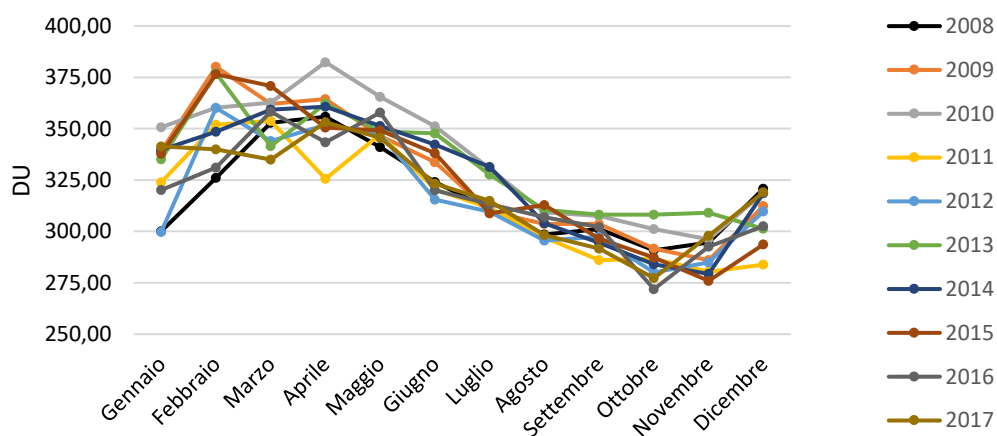


l) Serie temporale O<sub>3</sub> 2017



Riassumendo tutti i dati mensili raccolti nel decennio di riferimento:

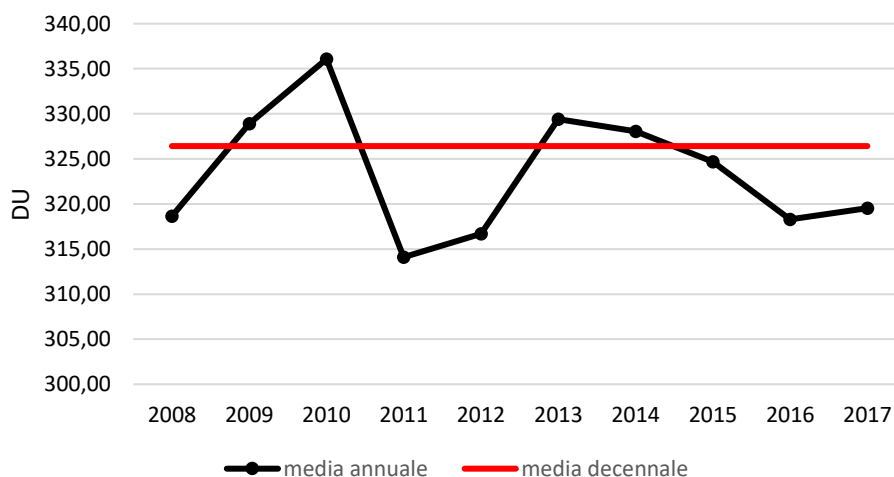
m) Serie temporale mensile O<sub>3</sub> 2008-2017



I massimi sono presenti soprattutto nel periodo primaverile (marzo, aprile, maggio), poi i valori decrescono fino a raggiungere il minimo tra ottobre e novembre. Ciò è un po' inaspettato in quanto, di solito, le concentrazioni maggiori di ozono si hanno in estate, quando l'irraggiamento è maggiore e favorisce le reazioni di produzione dell'inquinante.

Infine, la media decennale:

n) Serie temporale annuale O<sub>3</sub> 2008-2017



Come già visto nelle mappe georeferenziate, il massimo si ha nel 2010 e il minimo nel 2011. Non è usuale che tra un anno e il successivo si hanno i valori minimi e massimi di un decennio. È possibile che ci sia stato un evento particolare che ha causato un picco nel 2010, in particolare nel mese di aprile. Controllando gli eventi catastrofici accaduti

in quell'intorno temporale, sia locali che globali, ce n'è uno in particolare che potrebbe aver causato il massimo in questione. Il 14 aprile 2010 il vulcano islandese Eyjafjöll ha eruttato e la nube di inquinanti si è estesa fino a Roma.

L'ipotesi è plausibile in quanto i composti vulcanici volatili principali che influenzano le condizioni atmosferiche sono l'anidride carbonica, l'anidride solforosa e gli alogeni (ad esempio cloro e bromo) che svolgono un ruolo importante nella chimica dell'ozono (von Glasow, et al., 2009) (Bobrowski, et al., 2007).

Ovviamente le spiegazioni potrebbero essere molteplici. Ad esempio, si potrebbe valutare la possibilità di un effetto weekend, introdotto nel capitolo 1.2.4, ovvero al diminuire della concentrazione di un precursore dell'ozono (come ad esempio l'NO<sub>2</sub>) si può verificare l'aumento dell'O<sub>3</sub> perché i precursori e i distruttori dell'ozono sono gli stessi. Se ci basiamo soltanto sui dati ottenuti dell'NO<sub>2</sub>, dato che non ci sono particolari diminuzioni nell'aprile 2010 rispetto agli altri anni, si può escludere questa ipotesi. Basarsi soltanto su un precursore è limitante oltre che errato perché l'analisi non è completa, ma è un modo per cercare di avere più ipotesi da valutare.

Una terza strada da percorrere è quella di controllare l'irraggiamento solare nel periodo di massima concentrazione di ozono. Infatti, essendo un componente fondamentale per la produzione dell'inquinante preso in considerazione, se ci fosse stato un particolare irraggiamento, questo potrebbe aver causato un aumento notevole dell'ozono. Per valutare l'irraggiamento è possibile anche analizzare le temperature che sono correlate positivamente con l'irraggiamento solare.

Andando ad analizzare i dati del CO, si nota che a marzo del 2010 si verifica il picco di massimo del CO; un'altra possibilità è quindi quella di correlare l'incremento di monossido di carbonio con quella di ozono.



## 4. CONCLUSIONI

L'analisi dei dati satellitari su Roma è stata utile al fine di capire le problematiche associate a determinati inquinanti. I dati colonnari ottenuti sono, in generale, tipici di un'area metropolitana e, pertanto, sono state proposte alcune deduzioni da integrare, eventualmente con opportuni modelli numerici non oggetto di questa tesi.

Innanzitutto, per quanto concerne l' $\text{SO}_2$ , si può trascurare del tutto il problema su quest'area. In effetti, le fonti emissive di questo inquinante non sono presenti in grande quantità sul territorio considerato. In particolar modo, andando ad esaminare su tutta l'Italia la fonte naturale per eccellenza, quella dei vulcani, si osserva chiaramente che la concentrazione maggiore è situata in Sicilia.

L'analisi del monossido di carbonio ha evidenziato valori massimi agli inizi del decennio considerato ed in generale nei mesi primaverili (marzo, aprile) di ogni anno; i valori minimi sono stati invece registrati durante i mesi estivi e autunnali (luglio-ottobre). Questo può essere messo in relazione con l'aumento dello spessore dello strato di rimescolamento del PBL a causa dell'aumento dell'irraggiamento solare. La media calcolata aritmeticamente evidenzia massimi nel 2008 e 2010. La causa delle emissioni di CO non è attribuibile al traffico in quanto, in Italia, sono state registrate diminuzioni del 68% dal 1990 al 2016 delle emissioni di CO del trasporto su gomma; mentre le emissioni derivanti da combustioni non industriali registrano una crescita tale da rappresentare nel 2016 il 61,6% delle emissioni totali (ISPRA, 2018). Quindi è molto probabile che la causa delle emissioni di monossido di carbonio derivi da combustioni non industriali.

Per quanto riguarda l' $\text{NO}_2$ , si osserva un andamento decrescente dai picchi di massimo intorno a dicembre e gennaio ai minimi tra giugno e luglio. Il massimo si verifica proprio quando si ha un utilizzo più spinto dei riscaldamenti e il PBL ha uno spessore più piccolo; mentre il minimo coincide con il periodo in cui si ha un irraggiamento solare maggiore. Le medie annuali non sono particolarmente diverse dalla media decennale, ma sono stati registrati dei massimi nel 2009 e nel 2011. La sorgente tipica del nitrito è il traffico veicolare, ma, come appena analizzato, altre fonti importanti sono da

ricondursi agli impianti di riscaldamento, a molti processi industriali e alle centrali per la produzione di energia. A conferma di tale supposizione, si può notare come il diossido di azoto abbia concentrazioni rilevanti anche in altre zone metropolitane dove l'attività antropica è elevata.

L'ultimo inquinante analizzato, ovvero l'ozono, è stato quello più interessante in quanto la distribuzione nei mesi dei singoli anni differisce molto da quello che si presumeva. Infatti, i valori maggiori sono stati registrati nel periodo primaverile; in seguito i valori decrescono fino a raggiungere il minimo tra ottobre e novembre. Concentrazioni maggiori in estate sono meno insolite in quanto l'irraggiamento solare è maggiore e favorisce le reazioni di produzione di  $O_3$ . Un altro aspetto interessante riguarda l'andamento della concentrazione media annuale. In particolare, il picco di massimo si ha nell'aprile del 2010 e il minimo nel 2011. Sono state ipotizzate varie cause tra cui si ricorda l'eruzione del vulcano islandese Eyjafjöll ma che rimandano ad un'analisi più approfondita non oggetto di questa tesi.

In conclusione, è evidente che il problema principale deriva dagli inquinanti provenienti da fonti antropiche, ovvero  $CO$ ,  $NO_2$  e  $O_3$ . Si può ipotizzare che la fonte emissiva principale degli ultimi due inquinanti sia dovuta al traffico veicolare e, in particolar modo per il monossido di carbonio, la sorgente emissiva primaria può essere associata a combustioni non industriali. Le dinamiche delle reazioni chimiche in aria, ovvero del trasporto, sono molto complesse. Infatti, nelle combustioni ad eccesso di ossigeno, si ha un'alta formazione di  $NO_x$  e, conseguentemente, una formazione secondaria di ozono, ma allo stesso tempo si ha una bassa produzione di  $CO$  in quanto le combustioni possono essere definite quasi perfette.

Una soluzione all'incremento di emissioni di inquinanti potrebbe essere quella di ridurre l'utilizzo di mezzi privati a favore di quelli pubblici ed incrementare lo spostamento a piedi o con biciclette, anche se in questo ultimo caso l'attività aerobica aumenta il ritmo respiratorio e di conseguenza gli inquinanti respirati. Un altro modo per migliorare la qualità dell'aria è quello di ridurre l'eccessivo utilizzo dei riscaldamenti migliorando la coibentazione negli edifici e quindi la dispersione del calore.

## 5. BIBLIOGRAFIA

Acker, J., 2016. *Earthdata Forums*. [Online]  
Available at: <https://wiki.earthdata.nasa.gov/pages/viewpage.action?pageId=78973074>

Alemán, J. et al., 2007. Definitions of terms relating to the structure and processing of sols, gels, networks and inorganic-organic hybrid materials. *Pure and Applied Chemistry*, 79(10), p. 1801–1829.

APAT, 2003. *La micrometeorologia e la dispersione degli inquinanti in aria*. s.l.:s.n.

ARPALAZIO, s.d. *ARPALAZIO- Ossidi di azoto*. [Online]  
Available at: <http://www.arpalazio.net/main/aria/doc/inquinanti/NOX.php>

ARPAUMBRIA, s.d. *ARPAUMBRIA- Monitoraggi aria- Biossido di zolfo SO2*. [Online]  
Available at: <https://www.arpa.umbria.it/monitoraggi/aria/contenuto.aspx?idpagina=13>

Bobrowski, N. et al., 2007. Reactive halogen chemistry in volcanic plumes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Volume 112.

Bréon, F.-M. et al., 2013. *Anthropogenic and Natural Radiative Forcing*. s.l.:s.n.

Calvert, J. G. et al., 1985. Chemical mechanism of acid generation in the atmosphere. *Nature*, Issue 317, pp. 27-35.

CNR, 2016. *Artico, viaggio interattivo al Polo Nord*. [Online]  
Available at: <http://artico.itd.cnr.it/index.php/sezione-1/gli-strati-dell-atmosfera>

D.P.R. 203, 1988. *D.P.R. 24 maggio 1988, n. 203*. s.l.:s.n.

dalla Costa, S., Di Prinzio, L. & Samarelli, S., 2006. *Assegno di ricerca: Integrazione, trattamento e distribuzione dei dati territorio- ambiente acquisiti da sensori a bordo di piattaforme satellitari, aeree, veicolari e marine*. s.l.:s.n.

Dumont, G., 1996. *Effects of short term measures to reduce ambient ozone concentrations in Brussels and in Belgium*, s.l.: s.n.

Emmons, L. K. et al., 2004. Validation of Measurements of Pollution in the Troposphere (MOPITT) CO retrievals with aircraft in situ profiles. *JGR: Atmospheres*, Volume 109.

EPA, 2017. *EPA-Overview of Greenhouse Gases*. [Online] Available at: <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases#carbon-dioxide>

European Space Agency, 2010. *ESA eduspace*. [Online] Available at: [https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace\\_IT/SEMD6RZRAOG\\_0.html](https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_IT/SEMD6RZRAOG_0.html)

European Space Agency, s.d. *Types of orbits*. [Online] Available at: [https://www.esa.int/Enabling\\_Support/Space\\_Transportation/Types\\_of\\_orbits](https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Transportation/Types_of_orbits)

Finzi, G. & Brusasca, G., 1991. *La Qualità dell'Aria – Modelli previsionali e gestionali*. s.l.:s.n.

Fishman, J., Vukovich, F. M., Cahoon, D. & Shipman, M. C., 1987. The characterization of an air pollution episode using satellite total ozone measurements. *Journal of Applied Meteorology*, Issue 26.

Focus, 2018. *Focus*. [Online] Available at: <https://www.focus.it/scienza/scienze/ozono-ozonosfera>

Fraden, J., 2004. *HANDBOOK OF MODERN SENSORS- Physics, designs and applications*. 3rd a cura di s.l.:s.n.

Fraser, R. S., Kaufman, Y. J. & Mahoney, R. L., 1984. Satellite measurements of aerosol mass and transport. *Atmospheric Environment*, Issue 18.

Ghude, S. D. et al., 2011. Regional CO pollution over the Indian-subcontinent and various transport pathways as observed by MOPITT. *International Journal of Remote Sensing*, Volume 32.

Heat, D. F., Mateer, C. R. & Krueger, A. J., 1973. *The Nimbus-4 backscatter ultraviolet (BUV) atmospheric ozone experiment-two years' operation*. s.l.:s.n.

Helmig, D. et al., 2009. Volatile Organic Compounds in the Global Atmosphere. *EOS, Transactiond, American Geophysical Union*, 90(52), pp. 513-514.

<http://andreaclasse20.blogspot.com/2012/12/una-stuttura-stratificata.html>,  
2012. *Una struttura stratificata*. [Online]  
Available at: <http://andreaclasse20.blogspot.com/2012/12/una-stuttura-stratificata.html>

IADC, 2007. *IADC Space Debris Mitigation Guidelines*. s.l.:s.n.

IMO, 2018. *IMO- International Maritime Organization*. [Online]  
Available at:  
<http://www.imo.org/en/MediaCentre/IMOMediaAccreditation/Pages/MEPC73preview.aspx>

ISPRA, 2018. *Annuario dei dati ambientali 2018- Atmosfera*, s.l.: s.n.

Kar, J. et al., 2004. Evidence of vertical transport of carbon monoxide from Measurements of Pollution in the Troposphere (MOPITT). *Geophysical Research Letters*, Volume 31.

Krotkov, N. A. et al., 2015. Aura OMI observations of regional SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> pollution changes from 2005 to 2015. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Volume 16, p. 4605–4629.

Lyons, W. W. & Husar, R. B., 1976. SMS/GOES visible images detect a synoptic-scale air pollution episode. *Monthly Weather Review*, Issue 104.

Martin, R. . V., 2008. Satellite remote sensing of surface air quality. *Atmospheric Environment*, p. 21.

Mejer, G. J. & Krause, K. H., 1985. DISPERSION MODELS FOR EMISSIONS FROM AGRICULTURAL SOURCES. In: *Odour prevention and control of organic sludge and livestock farming*. DISPERSION MODELS FOR EMISSIONS FROM AGRICULTURAL SOURCES: Nielsen, V. C.; Voorburg, J. H.; L'Ermite, P..

Ministero dell'Ambiente, e. d. t. d. t. e. d. m., 2015. *Ministero dell'Ambiente e della tutela del territorio e del mare- cos'è la <<carbon footprint>>*. [Online] Available at: <https://www.minambiente.it/pagina/cose-la-carbon-footprint>

NASA, 2006. *Earth Science Reference Handbook. A Guide to NASA's Earth Science Program and Earth Observing Satellite Missions*. s.l.:s.n.

NASA, 2014. *What Is a Satellite?*. [Online] Available at: <https://www.nasa.gov/audience/forstudents/5-8/features/nasa-knows/what-is-a-satellite-58.html>

NASA, 2017. *Terra*. [Online] Available at: [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/terra/spacecraft/index.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/terra/spacecraft/index.html)

NASA, 2018. *What is a Dobson Unit?*. [Online] Available at: <https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/facts/dobson.html>

NASA, 2019. *Data Processing Levels*. [Online] Available at: <https://earthdata.nasa.gov/collaborate/open-data-services-and-software/data-information-policy/data-levels>

NASA, 2019. *Earth Observing System Data and Information System (EOSDIS)*. [Online] Available at: <https://earthdata.nasa.gov/eosdis>

NASA, 2019. *EarthData NASA*. [Online] Available at: <https://earthdata.nasa.gov/learn/discipline/atmosphere>

NASA, 2019. *NASA Space Place*. [Online].

NASA, 2019. *NASA's Earth Observing System Project Science Office*. [Online]  
Available at: <https://eospsos.gsfc.nasa.gov/>

NASA, 2019. *Remote sensors*. [Online]  
Available at: <https://earthdata.nasa.gov/learn/remote-sensors>

NASA, s.d. *Discoveries from EOS Aura*. s.l.:s.n.

NASA, s.d. *GIOVANNI*. [Online]  
Available at: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>

National Research Council, 2008. *Earth Observations from Space: The First 50 Years of Scientific Achievements*. National Academy Press, p. 129.

Palve, S. N., Nemade, P. D. & Ghude, S. D., 2018. MOPITT carbon monoxide its source distributions, interannual variability and transport pathways over India during 2005-2015. *International Journal of Remote Sensing*, Volume 39.

Reichle Jr, H. G. et al., 1986. Middle and upper tropospheric carbon monoxide mixing ratios as measured by a satellite-borne remote sensor during November 1981. *Journal of Geophysical Research*.

SACS, S. t. A. C. S., 2011. *What is the Dobson Unit (DU)?*. [Online]  
Available at: <http://sacs.aeronomie.be/info/dobson.php>

Schmunk, R., s.d. *Panoply netCDF Visualization Software, User's Guide to Panoply*. s.l.:s.n.

Singh, A. & Agrawal, M., 2008. Acid rain and its ecological consequences. *Journal of Environmental Biology*.

Streets, D. G. & et al., 2013. Emissions estimation from satellite retrievals: A review of current capability.. *Atmospheric Environment*, Issue 77.

Stull, R. B., 1988. *An introduction to boundary layer meteorology*. s.l.:s.n.

Tanimoto, H. et al., 2008. Diagnosing recent CO emissions and ozone evolution in East Asia using coordinated surface observations, adjoint inverse modeling, and MOPITT satellite data. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Issue 8, p. 3867–3880.

Té, Y. et al., 2016. Seasonal variability of surface and column carbon monoxide over the megacity Paris, high-altitude Jungfraujoch and Southern Hemispheric Wollongong stations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Issue 16, p. 10911–10925.

Tiao, G. C., Box, G. E. P. & Hamming, W. J., 2012. Analysis of Los Angeles Photochemical Smog Data: A Statistical Overview. *Journal of the Air Pollution Control Association*.

Todd, W. J., George, A. J. & Bryant, N. A., 1979. Satellite-aided evaluation of population exposure to air pollution. *Environmental Science & Technology*, Issue 13.

Treccani, 2006. *Treccani*. [Online] Available at: [http://www.treccani.it/enciclopedia/ozono\\_\(Enciclopedia-dei-ragazzi\)/](http://www.treccani.it/enciclopedia/ozono_(Enciclopedia-dei-ragazzi)/)

Van der Hoven, I., 1957. *Power spectrum of horizontal wind speed in the frequency range from 0.0007 to 900 cycles per hour*. s.l.:s.n.

Vinken, G. C. M., Boersma, K. F., Donkelaar, A. v. & Zhang, L., 2014. Constraints on ship NO<sub>x</sub> emissions in Europe using GEOS-Chem and OMI satellite NO<sub>2</sub> observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Volume 14, p. 1353–1369.

von Glasow, R., Bobrowski, N. & Kern, C., 2009. The effects of volcanic eruptions on atmospheric chemistry. *Chemical Geology*, Issue 263, p. 131–142.

Wallace, J. M. & Hobbs, P. V., 2006. *Atmospheric Science, An Introductory Survey*. s.l.:s.n.

Xian, G. Z., 2016. *Remote Sensing Applications for the Urban Environment*. s.l.:s.n.



Zhang, Y. et al., 2017. Continuation of long-term global SO<sub>2</sub> pollution monitoring from OMI to OMPS. *Atmospheric Measurement Techniques*, Volume 10, p. 1495–1509.