



Progetto PULVIRUS

OBIETTIVO 4

VALUTAZIONE DELL'IMPATTO DELLA
RIDUZIONE DELLE EMISSIONI SUI GAS
CLIMALTERANTI.

ATTIVITÀ 4.1

ANALISI DELLA SERIE TEMPORALE
DELLE MISURE DI CO₂ E CO DELLA
STAZIONE DI OSSERVAZIONI
CLIMATICHE DI LAMPEDUSA

Data: 30/06/2022



GRUPPO DI LAVORO

ENEA

F. Anello¹, G. Cinelli¹, M. Conte², T. Di Iorio², A. di Sarra³, D. Meloni², F. Monteleone², G. Pace²,
S. Piacentino¹, D.M. Sferlazzo⁴

¹ *ENEA, SSPT-PROTER-OEM, Piazza Ignazio Florio 24, 90139 Palermo*

² *ENEA, SSPT-PROTER-OEM, Via Anguillarese 301, 00123 Roma*

³ *ENEA, SSPT-PROTER-OEM, Via Enrico Fermi 45, 00044 Frascati*

⁴ *ENEA, SSPT-PROTER-OEM, Località Capo Grecale, 92010 Lampedusa*



SOMMARIO

1 INTRODUZIONE	4
2 ANALISI DELLE SERIE TEMPORALI DI CO ₂ E DI CO A LAMPEDUSA	
2.1 ANALISI DELLE SERIE TEMPORALI 2014-2020	5
2.1.1 Serie temporali della concentrazione atmosferica di CO ₂	5
2.1.2 Serie temporali della concentrazione atmosferica di CO	14
2.2 VARIAZIONE DELLE CONCENTRAZIONI ATMOSFERICHE DI CO ₂ E CO NEL PERIODO DEL LOCK DOWN 2020	17
2.2.1 Variabilità media	17
2.2.2 Variabilità giornaliera	20
3 CONCLUSIONI	28
4 BIBLIOGRAFIA	31
5 RINGRAZIAMENTI	32



1. INTRODUZIONE

L'obiettivo 4 del progetto PULVIRUS mira a valutare quanto le misure di contenimento del coronavirus SARS-CoV-2 abbiano contribuito a livello nazionale alla riduzione delle emissioni antropiche. In particolare, l'attività 4.1.4 ha come finalità la valutazione dell'impatto della riduzione delle emissioni sulle concentrazioni ambientali di gas serra. A tale scopo, sono state utilizzate le misure di concentrazione di gas serra nella Stazione di Osservazioni Climatiche ENEA di Lampedusa (35.52° N, 12.63° E; www.lampedusa.enea.it), che rappresenta un così detto sito di fondo, ovvero non direttamente influenzato da specifiche sorgenti antropiche e le cui misure forniscano risultati geograficamente e spazialmente rappresentativi di una vasta regione, in questo caso il Mediterraneo Centrale.

Nell'ambito dell'obiettivo 4, sono stati analizzati gli andamenti delle concentrazioni di biossido di carbonio (anche detto, con una vecchia nomenclatura, anidride carbonica, CO₂) e di monossido di carbonio (CO) negli anni di riferimento 2014-2020. I dati sono accessibili sia sulla banca dati del World Data Center for Greenhouse Gases della *World Meteorological Organization* (WMO), sia sul portale della infrastruttura di ricerca Europea Integrated Carbon Observation System (ICOS; www.icos-cp.eu), entrambi raggiungibili dal sito web di Lampedusa.

Lo studio ha preso in esame i dati delle concentrazioni atmosferiche di CO₂ e CO con lo scopo di verificare se fosse possibile rilevare un possibile effetto delle restrizioni attuate durante il periodo dell'emergenza COVID-19 rispetto a quanto avviene in condizioni normali, ossia in assenza delle limitazioni legate alla pandemia. Il periodo di studio considerato va dal 1 gennaio al 31 dicembre 2020; le concentrazioni di CO₂ e CO di questo periodo sono state analizzate e confrontate con quelle misurate nello stesso periodo degli anni che vanno dal 2014 al 2019.

Per raggiungere l'obiettivo, l'analisi si è svolta in tre parti finalizzate a valutare:

- ✓ l'evoluzione temporale delle concentrazioni di CO₂ e CO nel periodo di riferimento 2014-2020;
- ✓ la variabilità annuale di CO₂ e CO nel periodo di riferimento 2014-2020;
- ✓ l'origine delle masse d'aria arrivate a Lampedusa nel periodo di studio mediante l'utilizzo di retro-traiettorie ottenute dal Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model (HYSPLIT), per valutare quali sorgenti delle regioni geografiche limitrofe abbiano maggiormente influenzato le masse d'aria prima di arrivare a Lampedusa.



2. ANALISI DELLE CONCENTRAZIONI DI CO₂ E DI CO A LAMPEDUSA

2.1 ANALISI DELLE SERIE TEMPORALI NEL PERIODO 2014-2020

Le serie temporali della concentrazione atmosferica di CO₂ e CO misurate a Lampedusa sono state analizzate nel periodo gennaio 2014 - dicembre 2020 partendo da dati orari. Le misure effettuate a Lampedusa nel periodo indicato sono state effettuate con strumenti che usano la tecnica *Cavity Ring Down Spectroscopy* (CRDS); questa tecnica si basa sulla misura del tempo di decadimento del segnale laser in una cavità risonante nella quale viene fatta passare aria ambiente. Il laser viene sintonizzato progressivamente su lunghezze d'onda appartenenti ad una riga di assorbimento della specie da misurare in modo da ricavare una scansione spettrale della riga stessa. Nelle misure effettuate a Lampedusa vengono poi utilizzati standard di riferimento di concentrazione tracciabili alla scala globale della *World Meteorological Organization* (WMO). Nella misura viene anche utilizzato un sistema criogenico per rimuovere il vapor d'acqua dall'aria ambiente, in modo da ridurre l'effetto di interferenza di quest'ultimo e migliorare ulteriormente l'accuratezza della misura. La tecnica CRDS, con questi accorgimenti, consente di ottenere misure orarie estremamente accurate, ben al di sotto dei requisiti fissati dal WMO per le stazioni di fondo (WMO, 2020): incertezza minore di 0.1 ppm per le misure di CO₂, e minore di 2 ppb per le misure di CO. Queste misure sono inoltre comparabili a livello internazionale, perché sono riferite alla stessa scala fissata dal WMO; grazie alla alta accuratezza e tracciabilità delle misure, il sito di Lampedusa ha ottenuto la certificazione come sito atmosferico della Infrastruttura di Ricerca Europea Integrated Carbon Observation System, oltre a contribuire alla rete regionale WMO *Global Atmosphere Watch*.

2.1.1 Serie temporali della concentrazione atmosferica di CO₂

La serie temporale della concentrazione di CO₂ è mostrata in figura 1.

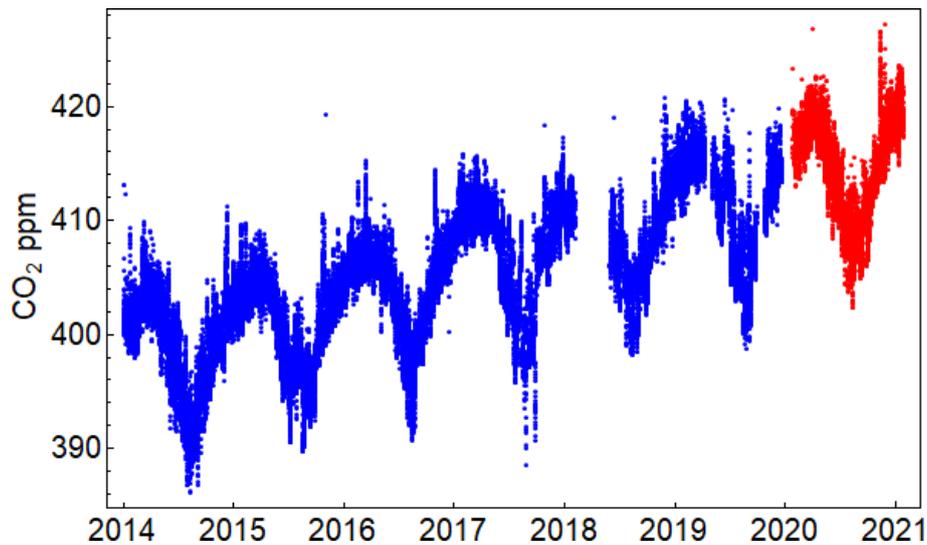


Figura 1. Evoluzione della concentrazione atmosferica oraria di CO₂ misurata a Lampedusa. I dati sono aggiornati al 25 gennaio 2021. La curva blu rappresenta gli anni 2014-2019, mentre la curva rossa rappresenta l'anno 2020 e gennaio 2021.

La curva presenta le caratteristiche generali della serie trentennale delle misure acquisite a Lampedusa [Chamard et al., 2003; Artuso et al., 2009]:

1. un trend di crescita che riflette l'aumento del contenuto di biossido di carbonio nell'atmosfera dovuto principalmente all'utilizzo di combustibili fossili;
2. un ciclo annuale, che presenta un massimo all'inizio della primavera ed un minimo estivo, imputabile principalmente ai processi fotosintetici della vegetazione e alle variazioni delle emissioni antropiche;
3. la presenza di fluttuazioni a breve termine e interannuali che si sovrappongono a quelle annuali che dipendono principalmente dalla diversa origine delle masse d'aria che raggiungono Lampedusa.

L'andamento temporale delle concentrazioni è stato simulato attraverso due componenti, una "lineare" e una "non lineare" [Huang et al., 1997], ovvero è stato applicato un processo di fit alle misure sperimentali attraverso una funzione del tipo:

$$x(t) = c_1 + c_2 t + A \sin [2\pi (t + \phi_1) / T_1] + B \sin [2\pi (t + \phi_2) / T_2] \quad (2.1)$$

in cui c_1 , c_2 , ϕ_1 , ϕ_2 , A e B sono costanti che si ricavano con il metodo dei minimi quadrati, t è il tempo espresso in ore (h), T_1 e T_2 corrispondono rispettivamente ad 1 anno e 6 mesi, mentre $x(t)$ è la concentrazione di CO₂ ricavata dal fit.

La funzione 2.1 è stata utilizzata per la ricostruzione della variabilità della CO₂ da Chamard et al. [2003], Artuso et al. [2009], e Trisolino et al. [2021] e rappresenta un incremento lineare nel tempo ($c_1 + c_2 t$) delle osservabili analizzate nel lungo periodo, a cui si sovrappone un andamento non lineare che descrive l'oscillazione attorno alla retta, dovuto alle variazioni stagionali dominate da una componente annuale ed una semi-annuale (figura 2).

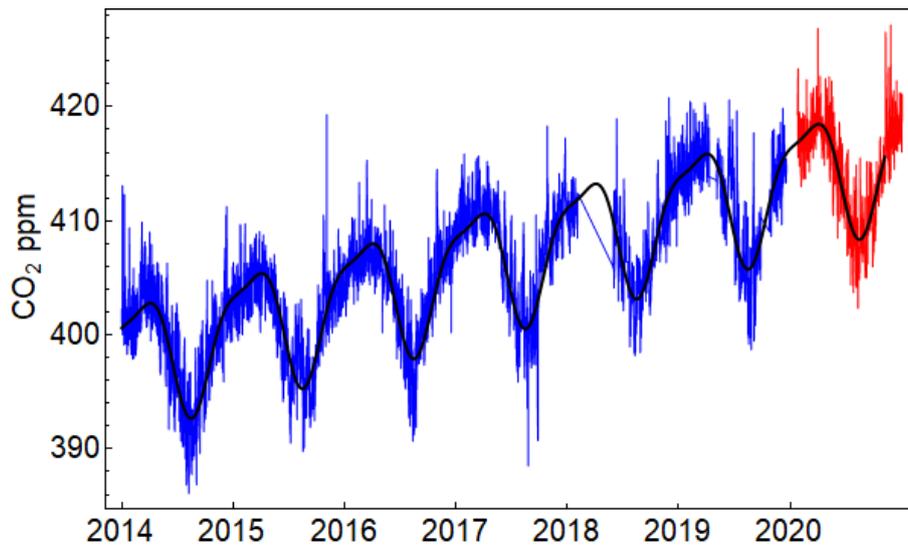


Figura 2. Evoluzione temporale della concentrazione di CO₂; la curva nera mostra l'andamento della funzione data dall'equazione 2.1 .

Questo tipo di rappresentazione descrive in modo sufficientemente accurato l'evoluzione di CO₂ in un sito di fondo come quello di Lampedusa [Chamard et al., 2003; Artuso et al, 2009]. I valori delle costanti ottenuti dal best fit con l'equazione 2.1 sono riportati di seguito:

Parametri	Valori
A	5.23 ppm
B	1.51 ppm
ϕ_1	908 h
ϕ_2	10828 h
c1	398 ppm
c2	2.9×10^{-4} ppm/h



I parametri della curva di fit producono una crescita annuale media di 2.61 ppm, valore in accordo con quelli riscontrati in altri siti. Il doppio del valore di A rappresenta l'ampiezza del ciclo annuale, che a Lampedusa è di circa 10.5 ppm nel periodo temporale di riferimento oggetto di questo studio (2014-2020), mentre era di circa 8.7 ppm nel periodo 1992-2007 [Artuso et al., 2009]. Analogamente, l'ampiezza del ciclo semi-annuale è di 3.0 ppm.

Come si può vedere, la variabilità delle misure attorno alla curva di fit è relativamente ampia ed è legata principalmente all'influenza di fenomeni sinottici, con l'alternarsi di masse d'aria influenzate da regioni in cui pesano diversamente sorgenti e pozzi di CO₂ e le cui caratteristiche variano nel corso delle stagioni [Artuso et al. 2009].

Studi precedenti [Chamard et al, 2003; Artuso et al., 2009; Trisolino et al., 2021] hanno mostrato che il ciclo diurno a Lampedusa è estremamente ridotto a causa della ridotta influenza di sorgenti e pozzi locali.

Come appare in figura 1 e 2, è presente una notevole variabilità interannuale. Questa variabilità è generalmente attribuita a variazioni dei flussi scambiati tra atmosfera, oceano e vegetazione, ed in misura minore delle emissioni antropiche e naturali, ed è influenzata da fenomeni sia sinottici che su larga scala, come ad esempio El Niño.

Per valutare la variabilità interannuale del tasso di crescita della concentrazione di CO₂, l'equazione 2.1 è stata ripetutamente usata per simulare periodi di 12 mesi, partendo dall'inizio del periodo utilizzato nel 2014 e spostando progressivamente la finestra annuale del fit a passi di un mese, fino alla fine del periodo preso in esame. La sequenza di fit su finestre annuali così generata produce una sequenza temporale di "best fit", ed in questo modo si ottiene una serie temporale dei parametri del fit. Questi parametri sono stati smussati valutando le medie mobili su 12 mesi, per rimuovere la variabilità dovuta alle variazioni dei periodi considerati rispetto al ciclo annuale dominante (figura 3). In questo modo si è ottenuto il *tasso di crescita* (GR) della concentrazione atmosferica di CO₂ a livello mensile: l'aumento del tasso di crescita che si nota nel 2016 è avvenuto in corrispondenza con il forte evento di El-Niño verificatosi in quell'anno.

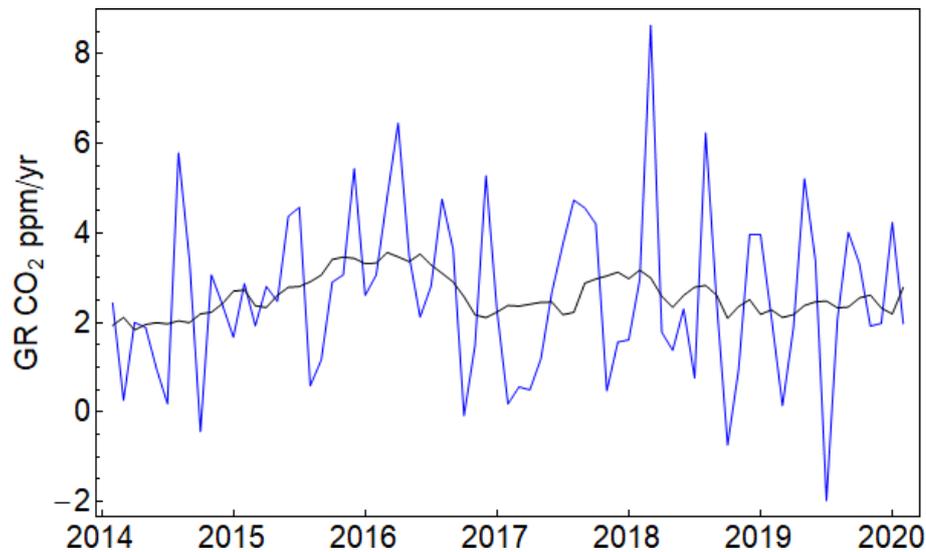


Figura 3. Evoluzione temporale del tasso di crescita della concentrazione atmosferica di CO₂ (GR) calcolato su finestre temporali di 12 mesi per l'intero set di dati sperimentali; la curva blu mostra i valori di GR ottenuti dai singoli fit, quella nera la media mobile a 12 mesi dei dati precedenti.

Dalle analisi effettuate appare evidente come Lampedusa costituisca un sito caratterizzato da una variabilità molto ridotta, così come ci si aspetta da un vero sito di fondo [Trisolino et al., 2021]. Per meglio evidenziare queste caratteristiche, si mostrano a titolo di esempio gli andamenti di due siti di fondo e di un sito influenzato dalla vicinanza di sorgenti antropogeniche, tutti appartenenti alla rete europea ICOS.

Gli andamenti di CO₂ atmosferica misurata alla stazione di Jungfraujoch (46.55°N, 7.99°E, 3580 m. s. l. m.), stazione di alta montagna in Svizzera, e di Zeppelin ((78.9° N, 11.8° E, 474 m s. l. m.), una stazione posta nelle isole Svalbard nel Mar Glaciale Artico, sono mostrati rispettivamente in figura 4 e figura 5. Questi siti sono tra quelli più remoti e con minore variabilità legata alle sorgenti antropiche nella rete Europea e mostrano variabilità confrontabile con quelle di Lampedusa (figura 6), che conferma di essere un ottimo sito di fondo per le concentrazioni di CO₂. Si noti la diversa ampiezza del ciclo annuale, molto maggiore nel sito artico che in quello alpino, che si trova ben al sopra dei bassi strati atmosferici maggiormente influenzati dalle emissioni e dal ciclo vegetativo.

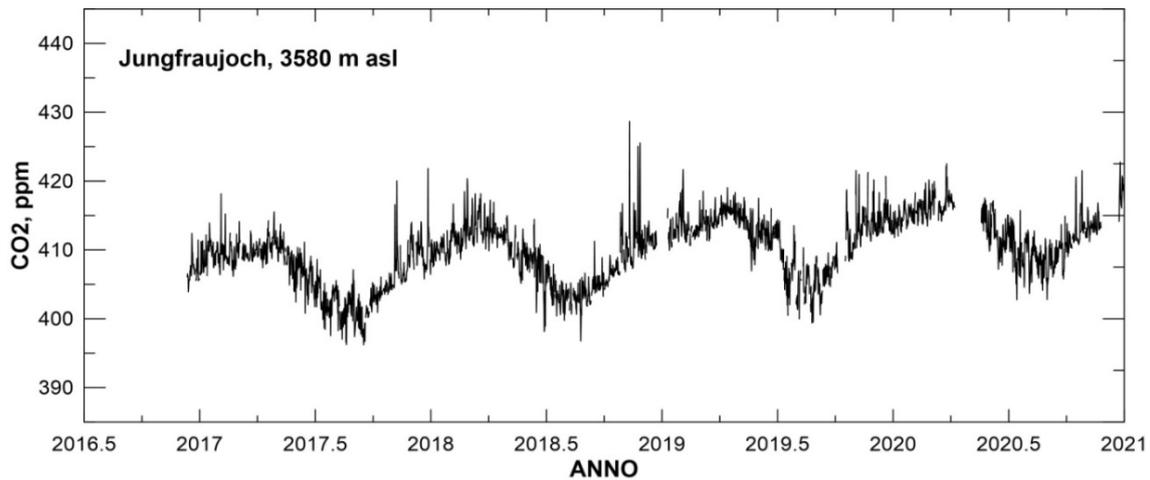


Figura 4. Andamento della concentrazione atmosferica di CO₂ atmosferica a Jungfraujoch, sito di alta montagna nelle Alpi Svizzere (46.5° N, 7.9° E).

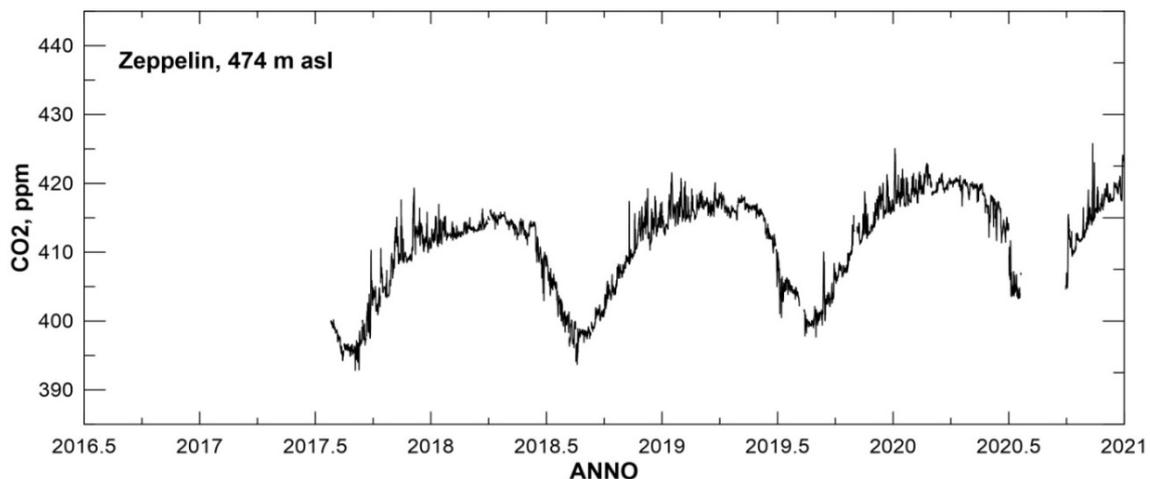


Figura 5. Andamento della concentrazione atmosferica di CO₂ atmosferica a Zeppelin, un remoto sito nelle isole Svalbard nell'Artico (78.9° N, 11.8° E)

Per confronto si mostra in figura 7 l'andamento delle concentrazioni di un sito continentale (Gartow, 53.07°N, 12.44°E, 70 m s. l. m.) in Germania; in questo caso le misure sono effettuate ad un'altezza di 341 m sulla superficie. Questo grafico mostra la variabilità tipica di un sito continentale direttamente influenzato da diverse sorgenti naturali ed antropiche, le quali, a seconda della provenienza della massa d'aria, producono una modulazione delle concentrazioni ed una alta variabilità temporale delle misure orarie.

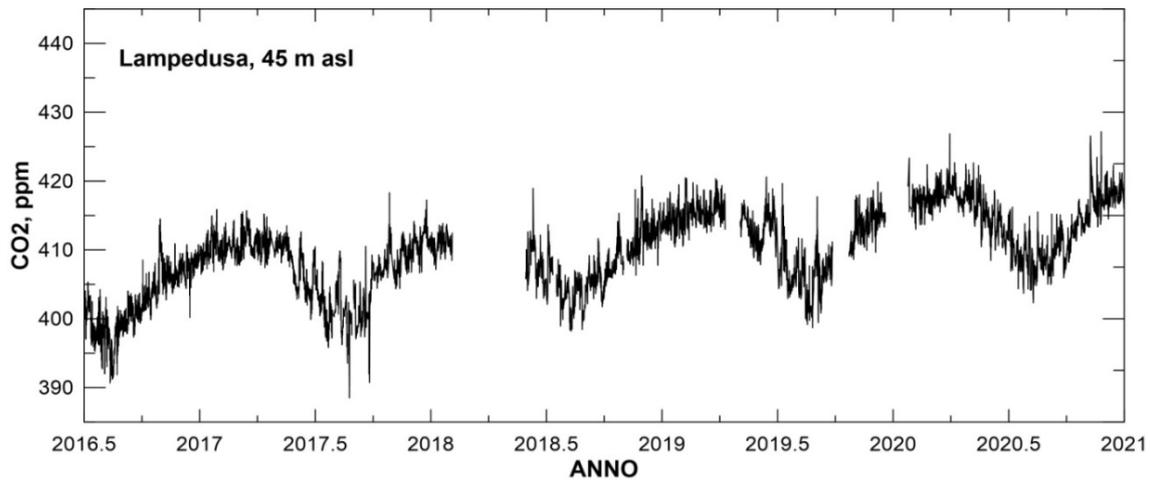


Figura 6. Andamento della concentrazione di CO₂ atmosferica a Lampedusa, (53.1 ° N, 11.4° E).

Pertanto, i dati della Stazione di Lampedusa si prestano particolarmente bene ad un'analisi indirizzata a identificare i valori di fondo ed il possibile impatto di variazioni delle emissioni a larga scala sulle concentrazioni osservate in atmosfera.

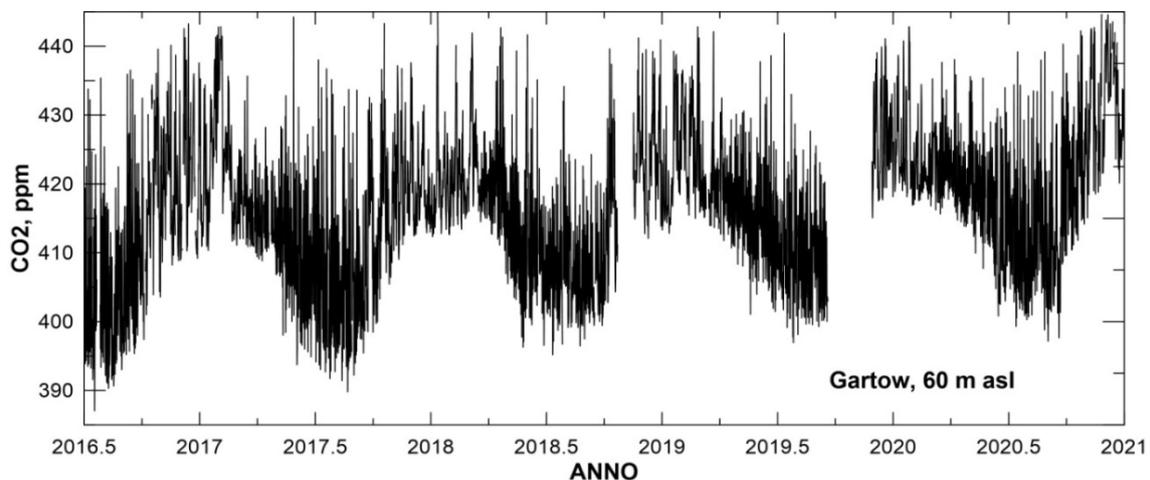


Figura 7. Andamento della concentrazione di CO₂ atmosferica a Gartow, torre di 341 m in Germania (53.1° N, 11.4° E).

Va evidenziato comunque che l'influenza di sorgenti e pozzi di CO₂ e dei processi di trasporto gioca un ruolo dominante, per cui estrarre gli effetti diretti di una riduzione dovuta alle restrizioni imposte durante il COVID19, anche se relativamente significativa, richiede di poter separare un contributo, comunque piccolo, all'interno di una variabilità naturale significativa.

Una prima analisi finalizzata alla valutazione di un'eventuale riduzione delle emissioni di CO₂ durante il lockdown (figura 8) si basa sul confronto del tasso di crescita attraverso la curva di fit 2.1

sul set completo di dati 2014-2020 (GR “vero”) con il fit sul set di dati 2014-2019, escludendo quindi l’anno da esaminare (GR “atteso”).

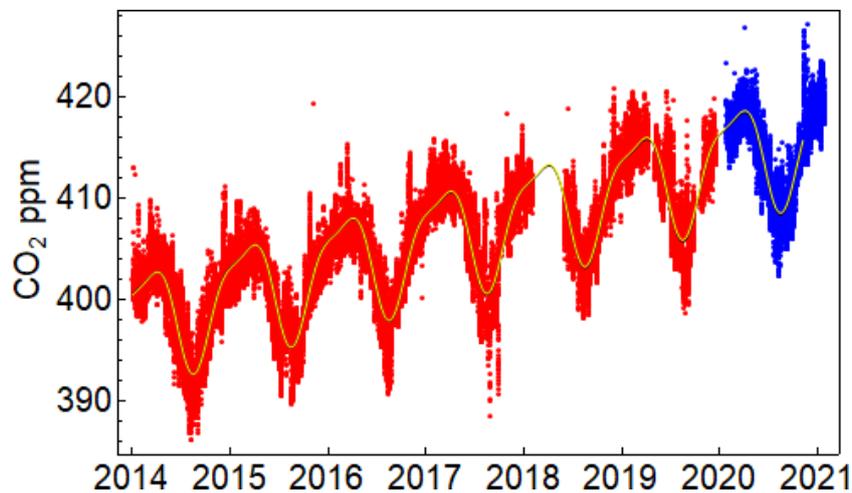


Figura 8. Fit non lineare eseguito sul set di dati 2014-2020 (curva nera) e sul set di dati 2014-2019 prolungando fino al 2020 (curva gialla). Le due curve sono quasi sovrapposte, quindi poco distinguibili.

Il confronto serve ad evidenziare l’eventuale variazione nella proiezione dell’andamento del 2020 se non ci fosse stato il lockdown.

Il GR “vero” risulta essere pari a 2.61 ppm, mentre quello “previsto” risulta essere pari a 2.65 ppm. La lievissima riduzione non è statisticamente significativa e quindi non correlabile agli effetti delle misure restrittive del lockdown. D’altra parte, una eventuale maggiore riduzione potrebbe essere stata mascherata o amplificata da altri tipi di eventi sia di tipo naturale (incendi, maggiore o minore efficienza dei processi fotosintetici, particolari eventi meteorologici, etc.) che di tipo antropico. A tale scopo, sono necessari ulteriori approfondimenti.

In questo contesto, va notato che il periodo maggiormente influenzato dal lockdown è stato caratterizzato da perturbazioni significative, in particolare connesse ad incendi boschivi avvenuti nei Balcani ed in Europa Orientale.

Le condizioni di trasporto su scala sinottica avvenute nel mese di marzo hanno trasportato le emissioni degli incendi fino a Lampedusa, con un molto probabile effetto di incremento della concentrazione di CO₂ osservata.

A supporto dell’identificazione di questi processi riportiamo in figura 9 la mappa satellitare ottenuta dal sensore VIIRS sul satellite Suomi NPP il giorno 16 marzo 2020, con l’indicazione degli incendi identificati dai sensori MODIS sui satelliti Terra ed Aqua sulla base delle temperature di brillantezza rilevate dallo spazio. È evidente la presenza di numerosi incendi attivi nei Balcani.



Figura 9. Mappa a falsi colori ottenuta il 16 marzo 2020 dallo strumento VIIRS sul satellite Suomi NPP della NASA. I punti rossi identificano incendi, rilevati dalla temperatura di brillantezza misurata dai sensori MODIS su satelliti Terra e Aqua.

In figura 10 sono riportate le traiettorie che arrivano a Lampedusa negli strati più bassi della troposfera il 21 marzo 2020, cinque giorni più tardi rispetto all'immagine VIIRS mostrata in figura 9. È quindi plausibile che le masse d'aria arrivate a Lampedusa il 21 marzo siano state influenzate da questi incendi in Europa Orientale. Studi recenti (ad es. Campanelli et al., 2021) mostrano che questi eventi hanno influenzato le concentrazioni di vari inquinanti in varie città italiane.

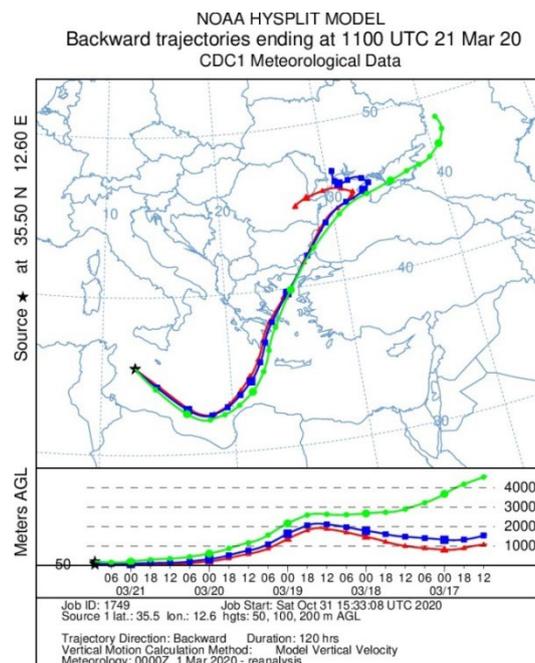


Figura 10. Traiettorie delle masse d'aria che arrivano a Lampedusa il 21 marzo 2020. Le traiettorie sono calcolate tramite il modello Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model (HYSPLIT), ed utilizzano i dati di rianalisi meteorologiche.

Questa interpretazione è confermata dall'elevata concentrazione atmosferica di CO misurata a Lampedusa in quel periodo e mostrata in figura 11. La figura mostra l'evoluzione della concentrazione di CO a Lampedusa nei primi mesi del 2020.

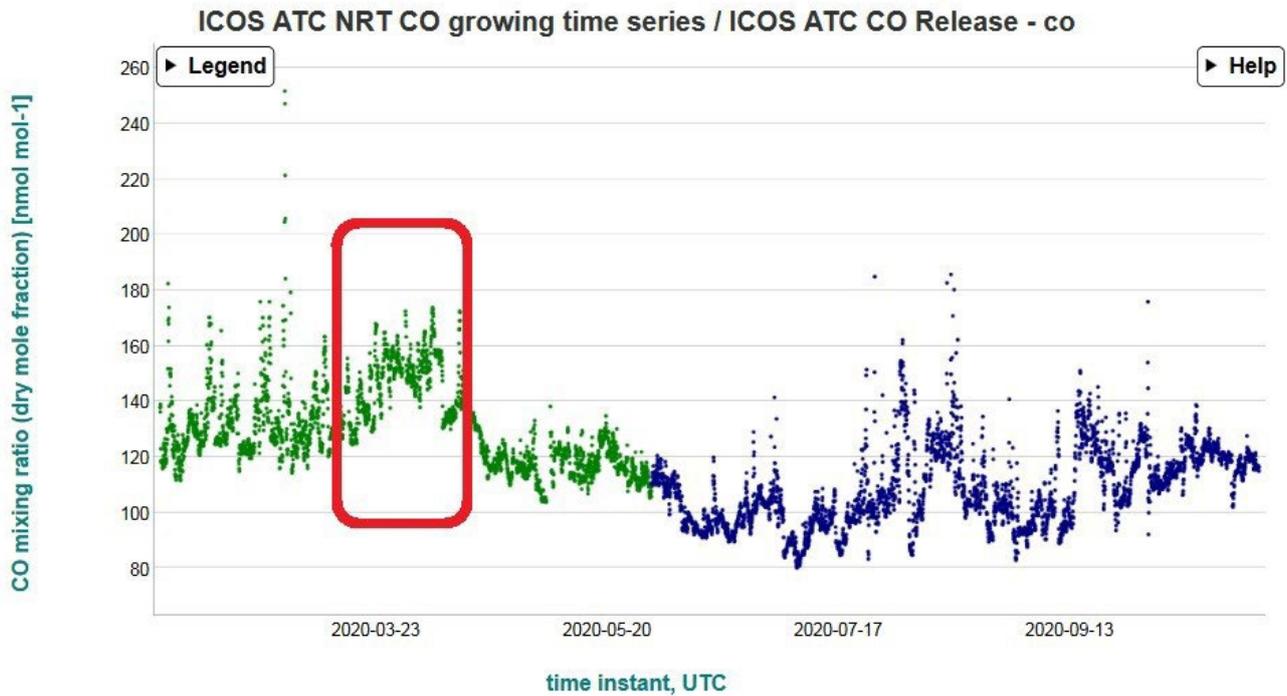


Figura 11. Evoluzione della concentrazione di CO a Lampedusa nei primi mesi del 2020. Il riquadro rosso è relativo al periodo di marzo 2020 con influenza di incendi dall'Est Europa.

2.1.2 Serie temporali della concentrazione atmosferica di CO

L'analisi dell'evoluzione temporale della concentrazione atmosferica del monossido di carbonio, CO (figura 12) può fornire indicazioni riguardo l'influenza di sorgenti naturali o antropiche sulla variabilità dell'evoluzione temporale delle concentrazioni di CO₂. Il CO viene prodotto principalmente da processi di combustione di composti organici, siano essi di origine naturale, come gli incendi, che di origine antropica, come il traffico veicolare o la produzione industriale; inoltre è formato anche da processi di ossidazione degli idrocarburi (principalmente metano) che avvengono in atmosfera, principalmente ad opera dell'OH. Come la CO₂, sebbene con diversa ampiezza, il CO presenta un gradiente latitudinale che vede minimi della sua concentrazione media nell'emisfero sud e massimi nella fascia più industrializzata dell'emisfero nord tra i 30° ed i 60° di latitudine. I meccanismi di rimozione del CO in atmosfera riguardano invece i processi fotochimici di reazione con il radicale OH [Khalil e Rasmussen, 1990].

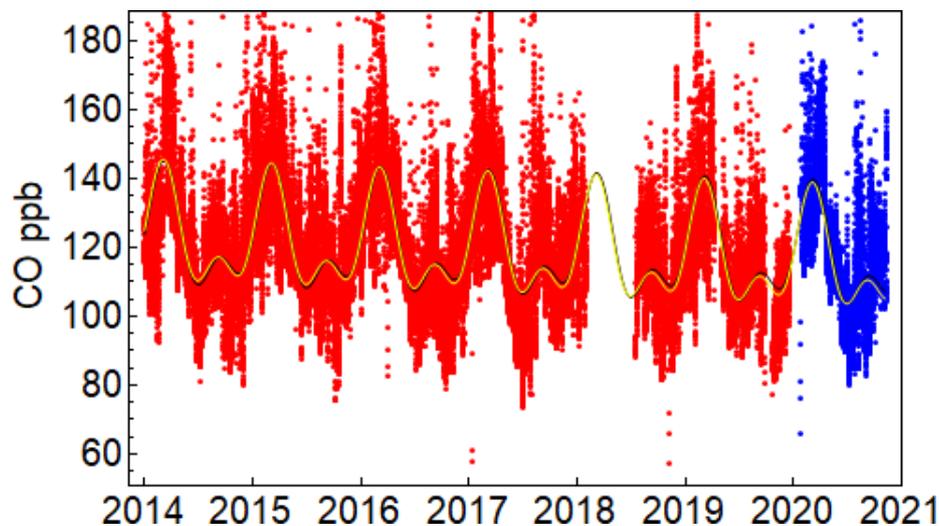


Figura 12. Evoluzione della media oraria della concentrazione atmosferica di CO a Lampedusa e fit non lineare 2.1 eseguito sul database 2014-2020 (curva nera) e sul database di dati 2014-2019 prolungando fino al 2020 (curva gialla).

A Lampedusa la variabilità mensile di questo inquinante, fortemente influenzato dalle emissioni antropiche, è principalmente associata a fenomeni di trasporto a scala regionale; anch'esso come la CO₂ mostra un andamento annuale. Ci sono picchi nella seconda parte della stagione invernale legati ad un maggiore contributo delle emissioni non locali legate al traffico veicolare e al riscaldamento domestico. Viceversa, in estate aumenta l'efficacia delle reazioni fotochimiche che

coinvolgono il CO e portano ad una diminuzione della sua concentrazione, grazie all'aumento della concentrazione del radicale OH legata alla maggior disponibilità di radiazione ultravioletta solare e alla maggiore concentrazione di ozono e vapore d'acqua.

La serie temporale mostra anche un aumento delle concentrazioni di CO in estate. Sebbene questa caratteristica richieda un approfondimento, si può ipotizzare che essa sia legata al trasporto di masse d'aria provenienti da regioni su cui si sviluppano incendi estivi, da una maggiore produzione fotochimica del CO, sempre legata all'OH [Drori et al., 2012], e alla maggiore stabilità dello strato limite su mare.

Per le serie temporali di concentrazione (2014-2020) di CO si sono ripetute le stesse analisi condotte sulle concentrazioni di CO₂, al fine di valutare eventuali correlazioni e stimare possibili variazioni tra CO₂ e CO durante il lockdown.

Si è applicato anche alle concentrazioni di CO il fit dell'eq. 2.1 che rappresenta la variazione annuale del CO in termini di una componente "lineare" e una "non lineare", a sua volta data da due contributi uno annuale ed uno semestrale i cui valori sono riportati qui di seguito:

Parametri	Valori
A	13.9 ppb
B	8.6 ppb
$\phi 1$	747 h
$\phi 2$	9306 h
c1	123 ppb
c2	1.0×10^{-4} ppb/h

In figura 12 è possibile notare una decrescita annuale della concentrazione di CO, che risulta mediamente maggiore nell'anno 2020. Considerando il fattore di decrescita, stimato dal fit in modo analogo a quanto fatto per la CO₂, si evidenzia che il valore "atteso" sia pari a -0.9 ppb/anno, mentre quello "vero" sia -1.1 ppb/anno.

Durante l'anno la variazione complessiva della CO è di circa 35 ppb. Utilizzando la notazione matematica del fit 2.1 questa variazione è dovuta alla combinazione delle componenti annuale e semestrale; infatti, in questo caso si ha un piccolo sfasamento tra le due componenti e il contributo di semi-ampiezza rispettivamente pari a 13.9 e 8.6 ppb si somma in inverno e si sottrae in estate generando l'andamento osservato.

2.2 VARIAZIONE DELLE CONCENTRAZIONI ATMOSFERICHE DI CO₂ E CO NEL PERIODO DEL LOCK-DOWN 2020

Una volta individuati gli andamenti generali, le serie temporali della concentrazione atmosferica di CO₂ e CO misurate a Lampedusa è stata analizzata nel periodo gennaio 2014 - dicembre 2020 partendo da dati orari con lo scopo di individuare una traccia degli effetti del lockdown.

2.2.1 Variabilità media

Scopo del paragrafo è verificare se la concentrazione media di CO₂ e CO misurata a Lampedusa durante il lockdown presentasse delle anomalie significative rispetto a quelle osservate dal 2014 al 2019. Le medie annuali dei valori di concentrazione di CO₂ e CO dal 2014 al 2020 (escluso il 2018 per dati non disponibili) sono riportate in figura 13 e 14.

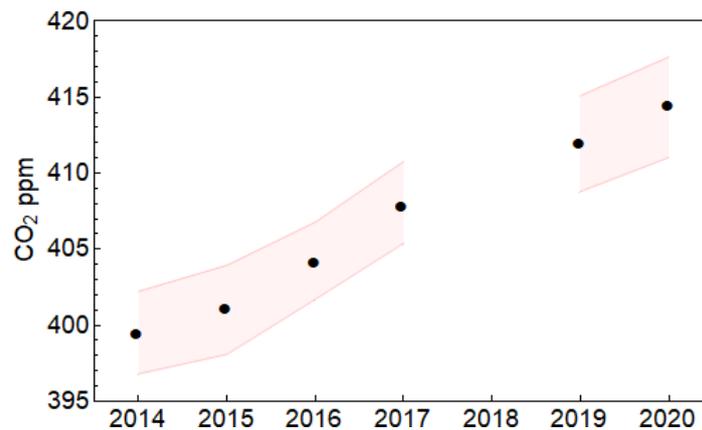


Figura 13. Media annuale delle concentrazioni di CO₂. L'area in rosa delinea i valori interquartili.

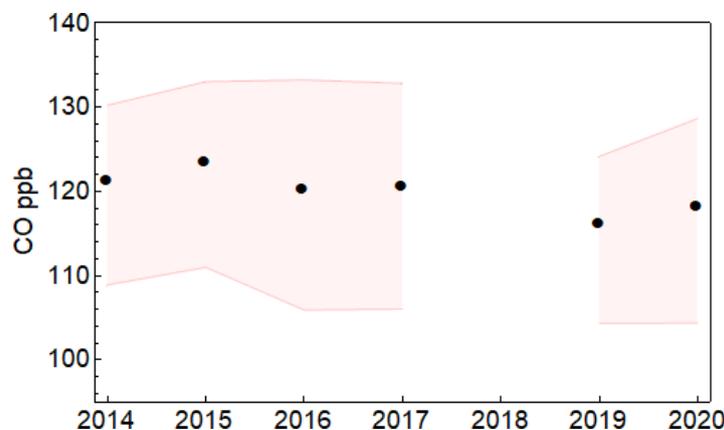


Figura 14. Media annuale delle concentrazioni di CO. L'area in rosa delinea i valori interquartili

L'evoluzione della concentrazione di CO₂ e CO nel periodo di riferimento 2014-2019 e nel 2020 è stata comparata valutando tre periodi temporali (Tabella 1): uno precedente al lockdown (PRE-LD, 1 gennaio – 9 marzo), uno relativo al periodo del lockdown (LD, 10 marzo – 17 maggio), ed un terzo seguente al lockdown (POST-LD, 18 maggio – 31 luglio). Le date sono state scelte sulla base dei cambiamenti introdotti dai vari DPCM (Decreto del Presidente del Consiglio italiano).

Misure restrittive	DPCM	
PRE-LD 1/1 – 9/3	31 gennaio 2020 8 marzo 2020 9 marzo 2020	Dichiarazione dello stato di emergenza Disposizione di misure di contenimento restrittive per la Lombardia Estensione delle misure di contenimento all'intero territorio nazionale
LD 10/3 – 17/5	11 marzo 2020 22 marzo 2020 17 maggio 2020 Fase 2	limitazioni attività commerciali non strettamente necessarie limitazione attività produttive escluse quelle indicate nella lista del DPCM ripresa graduale attività commerciali (bar, negozi, etc.)
POST-LD 18/5 – 31/7	18 maggio 2020 Fase 3 29 luglio 2020	Spostamenti tra regioni permessi; riapertura di molte attività commerciali e sociali Estensione dello stato di emergenza al 31 ottobre 2020

Tabella 1. Provvedimenti di limitazione delle attività e di distanziamento sociale nazionale durante i tre periodi di studio PRE-LD, LD, POST-LD.

Le serie temporali sono state analizzate valutando la differenza (figura 15) tra la media del 2020 e la media del periodo di riferimento (2014-2019) delle concentrazioni di CO₂ e CO. Ad entrambe le concentrazioni si è sottratto il valore del trend lineare stimato utilizzando gli anni 2014-2020.

In figura 15 si evidenzia come le concentrazioni di CO₂ nei tre periodi, una volta sottratta la crescita lineare, siano sistematicamente più alte nel 2020 che nel periodo 2014-2019; anche se nel POST-LD la differenza è minore. C'è da tenere presente che questa analisi presuppone che il tasso di crescita annuale sia rimasto invariato tra i vari anni. Variazioni interannuali del tasso di crescita, che sono senz'altro presenti (si veda fig. 3), sono difficili da prendere in esame e possono influenzare i risultati.

Osservando le differenze tra CO₂ e CO si nota la maggiore variabilità della CO. Questo risultato va interpretato tenendo conto che il ciclo annuale della CO presenta, rispetto al suo valore medio annuale, una maggiore variabilità di quello della CO₂; percentualmente la CO e la CO₂ presentano variabilità annuali rispettivamente di circa il 30% ed il 2.5%.

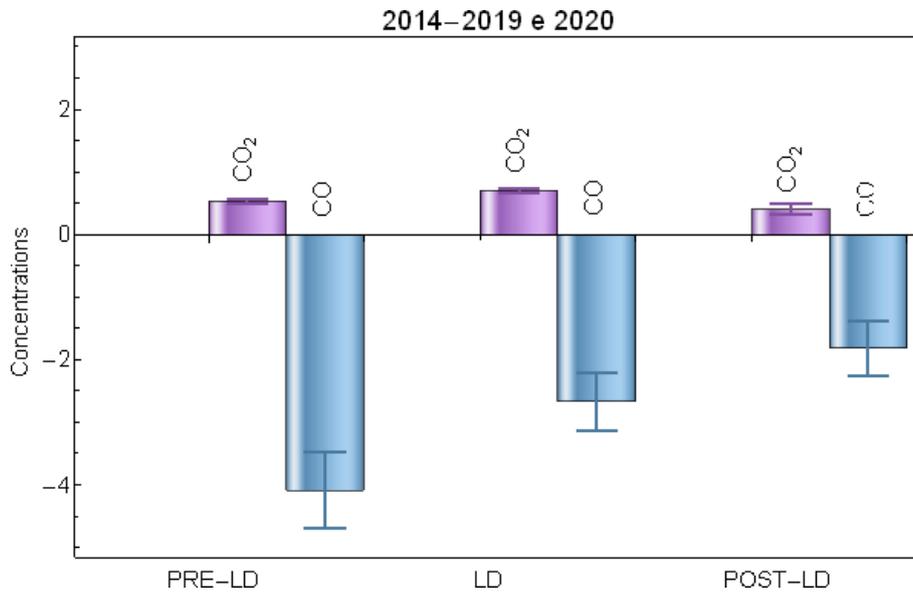


Figura 15. Differenze tra le concentrazioni di CO₂ (ppm) e CO (ppb) nel 2014-2019 e nell’anno della pandemia (2020) durante il periodo di pre-lockdown (PRE-LD), lockdown (LD) e post-lockdown (POST-LD). Le barre verticali rappresentano l’errore standard.

La concentrazione della CO mostra una decrescita maggiore nel periodo pre-lockdown rispetto ai periodi seguenti, probabilmente legata a fenomeni di trasporto regionale non direttamente legati al lock-down (si veda la discussione della variabilità giornaliera riportata nel prossimo paragrafo).

Si può quindi concludere che nelle misure fatte a Lampedusa di CO₂ e CO non si possa evidenziare una influenza diretta della riduzione delle emissioni occorse durate il lockdown, almeno nei valori medi calcolati nei tre periodi di riferimento.

2.2.2 Variabilità giornaliera

Le masse d'aria meno influenzate da molteplici sorgenti antropiche sono caratterizzate da una maggiore omogeneità delle concentrazioni dei vari composti; nello specifico, ci si aspetta che la concentrazione di CO₂ e di CO misurata in questo tipo di masse d'aria presenti una ridotta variabilità temporale nel breve periodo. Per queste ragioni la variabilità temporale è uno dei parametri maggiormente utilizzati per identificare le concentrazioni di fondo, ossia quelle per le quali l'influenza diretta di pozzi e sorgenti sia limitata.

I siti direttamente influenzati dalle emissioni antropiche durante il lockdown hanno mostrato una ridotta variabilità della concentrazione atmosferica di CO₂ dovuta principalmente alla riduzione delle emissioni antropiche di CO₂ [Papale et al. 2020].

Come esempio, si mostra l'andamento della concentrazione atmosferica di CO₂ dalla stazione tedesca di Gartow in Germania nel periodo che va dal maggio 2019 ad aprile 2020; il periodo del lockdown è evidenziato da un rettangolo rosso (figura 16). È evidente come questo periodo sia caratterizzato non da una riduzione del valor medio, ma dalla riduzione della sua variabilità rispetto al periodo precedente.

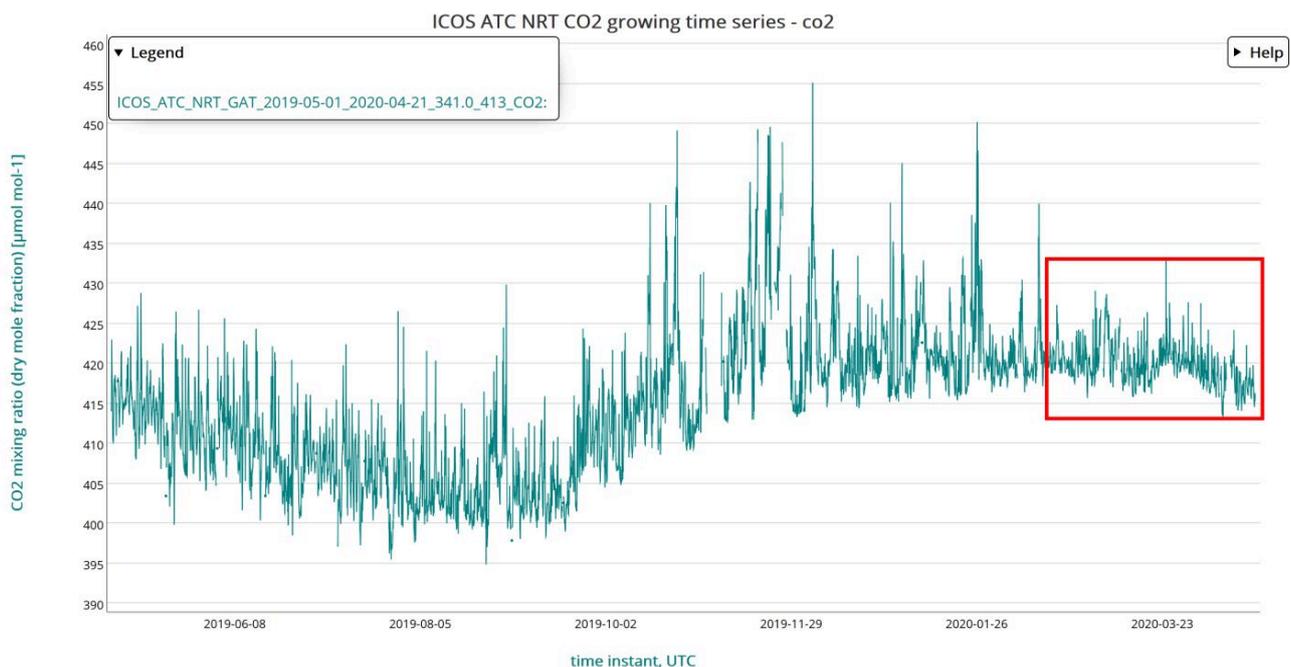


Figura 16. Concentrazione atmosferica di CO₂ nella torre ICOS vicino a Gartow, Germania.

Ai fini dell'analisi per identificare il possibile effetto della riduzione delle emissioni antropiche ha quindi senso andare a identificare ed ad analizzare nel dettaglio i periodi con minore variabilità di breve periodo in un sito di fondo come quello di Lampedusa.

Figura 17 mostra l'evoluzione della concentrazione media oraria della CO₂ nei mesi di marzo, aprile e maggio per gli anni che vanno dal 2014 al 2020. Come aspettato, si osserva un aumento della concentrazione di anno in anno anche se in maniera variabile. Nella primavera del 2018 le misure hanno subito un'interruzione per problemi allo strumento. Osservando la variabilità dei diversi anni, appare evidente che esistono pochi periodi che presentino una variabilità più ridotta di quella osservata nell'Aprile 2020.

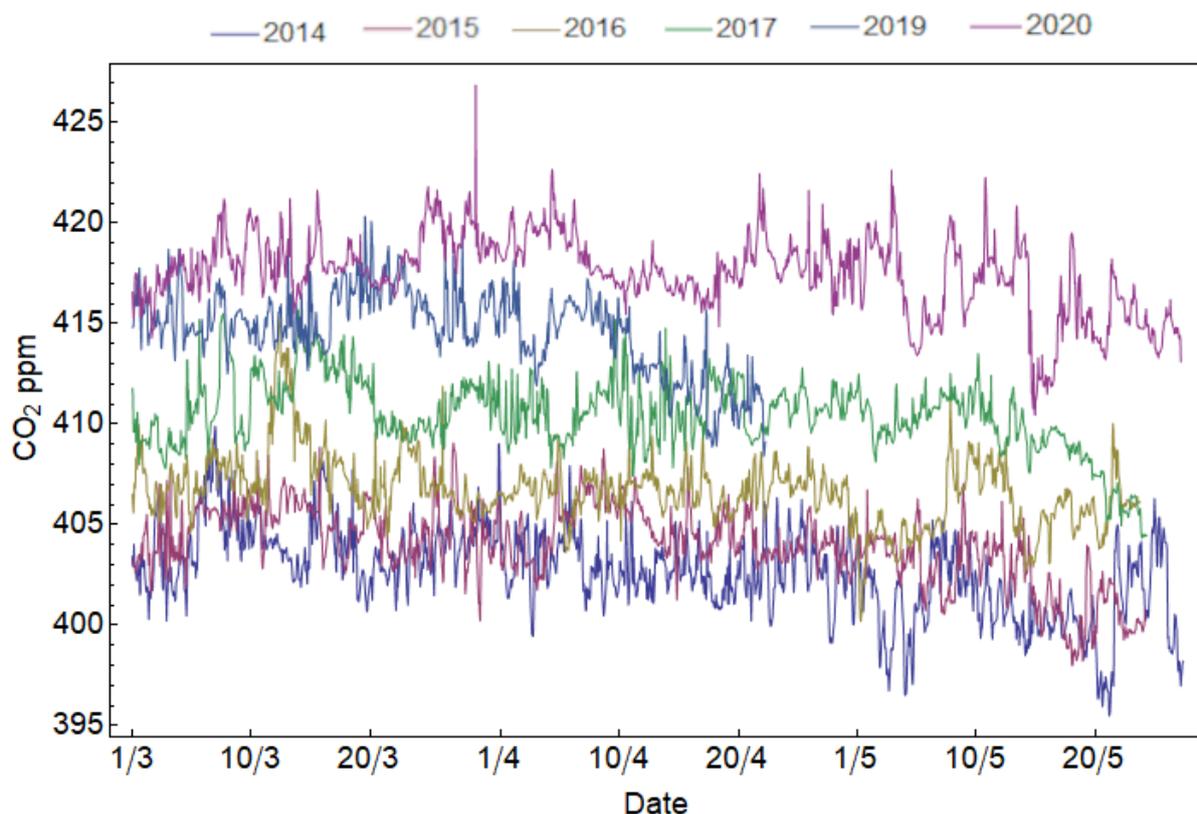


Figura 17. Evoluzione della concentrazione media oraria di CO₂ a Lampedusa nei mesi di marzo, aprile e maggio per gli anni dal 2014 al 2020.

Si è quindi focalizzata l'analisi sul mese di aprile 2020 per cercare indizi sulla possibile influenza del lockdown sulle concentrazioni atmosferiche di CO₂. L'analisi per questo periodo si basa sull'utilizzo di retro-traiettorie, per identificare l'origine delle masse d'aria, da associare alle misure giornaliere fatte a Lampedusa.

Figura 18 mostra lo scatter plot tra ΔCO_2 e ΔCO , che sono le differenze tra la concentrazione giornaliera di CO_2 e CO osservata a Lampedusa ed il valore atteso dato dalla curva dei rispettivi fit (curva nera in fig.2 e curva nera fig. 8).

Le barre di errore indicano la deviazione standard giornaliera sui valori osservati e sono un indice della variabilità della misura. I valori di ΔCO_2 e ΔCO sono stati poi messi in relazione con le traiettorie delle masse d'aria corrispondenti.

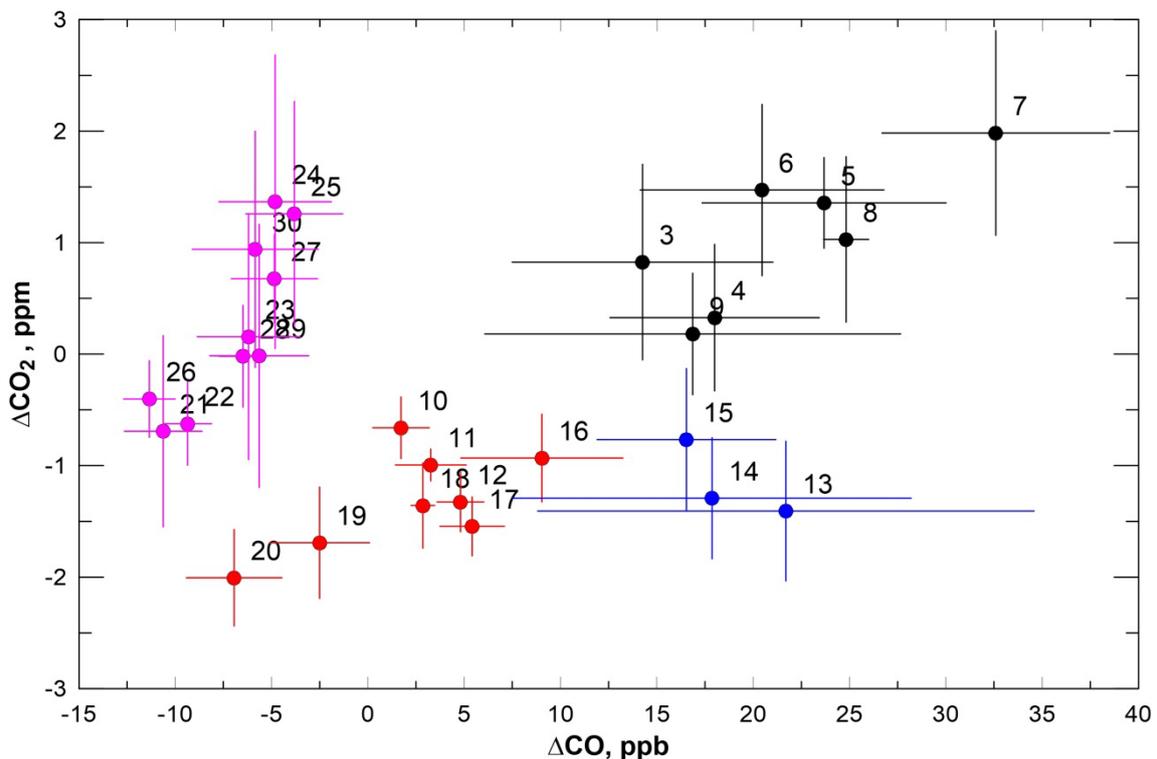


Figura 18 Scatter plot della differenza tra il valore medio giornaliero ed il valore del fit 2.1 della concentrazione di CO_2 e di CO misurato a Lampedusa. Le barre di errore rappresentano la deviazione standard della media giornaliera, indice della variabilità delle misure. I numeri rappresentano i giorni di aprile.

Le traiettorie per il mese di aprile 2020 (una per giorno centrata circa al mezzogiorno solare) sono riportate in figura 19, 20, 21. Le traiettorie rappresentano il percorso delle masse d'aria nei 7 giorni precedenti il loro arrivo a Lampedusa alle quote di 50, 200 e 400 m.

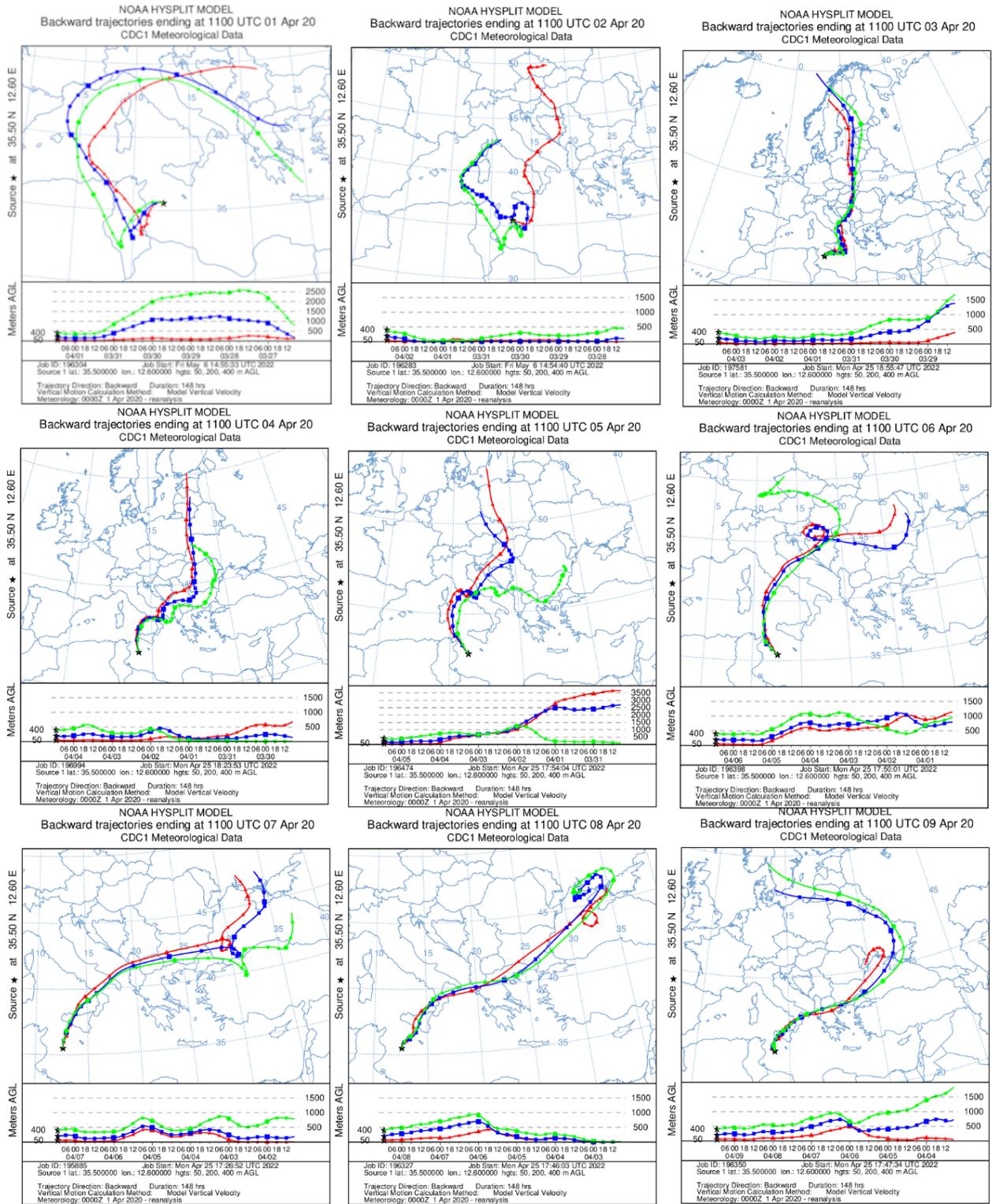


Figure 19. Retro-traiettorie di 7 giorni ottenute dal modello HYSPLIT. Viene riportata una traiettoria al giorno per il periodo 1-9 aprile 2020

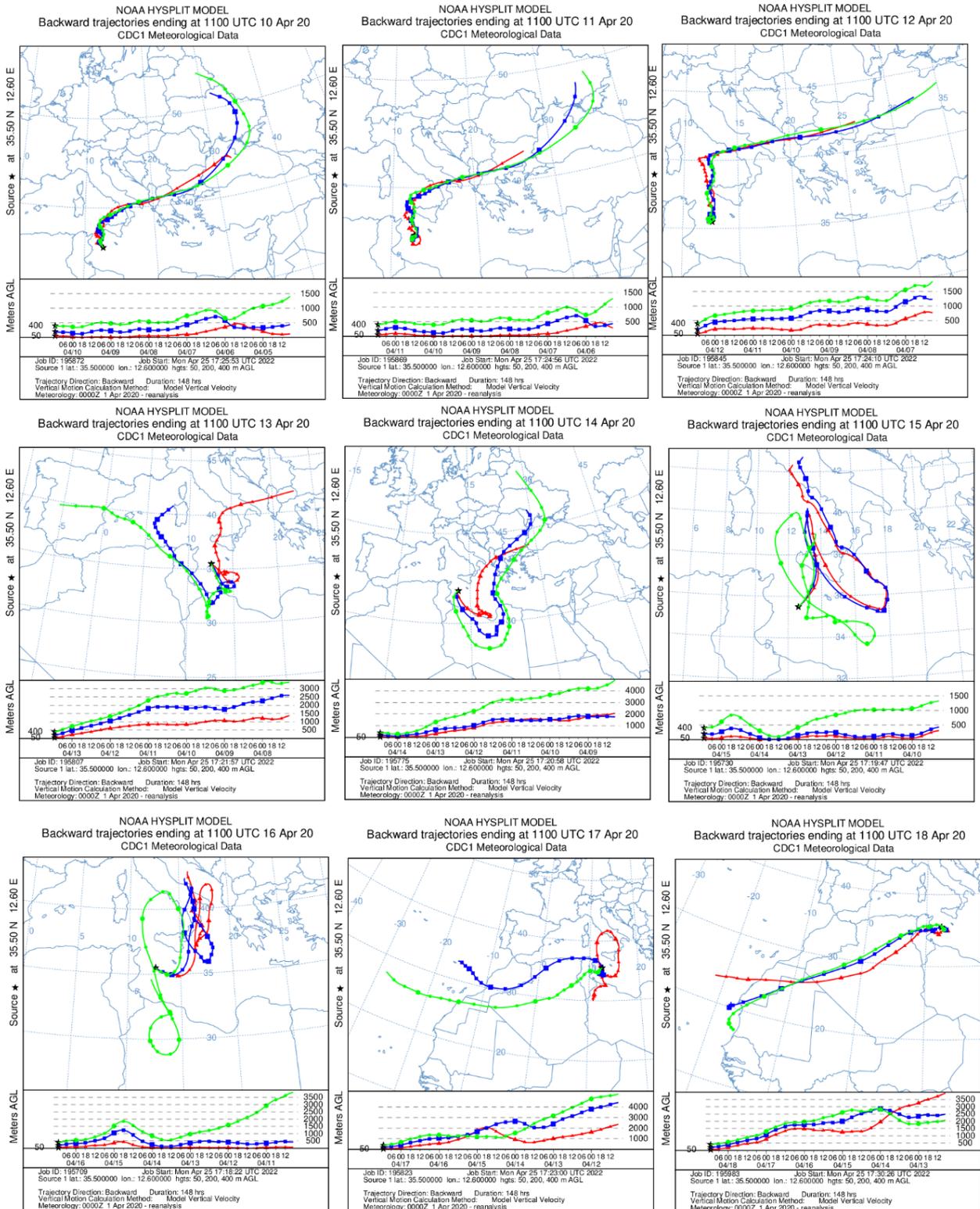


Figure 20. Retro-traiettorie di 7 giorni ottenute dal modello HYSPLIT. Viene riportata una traiettoria al giorno per il periodo 10-18 aprile 2020.

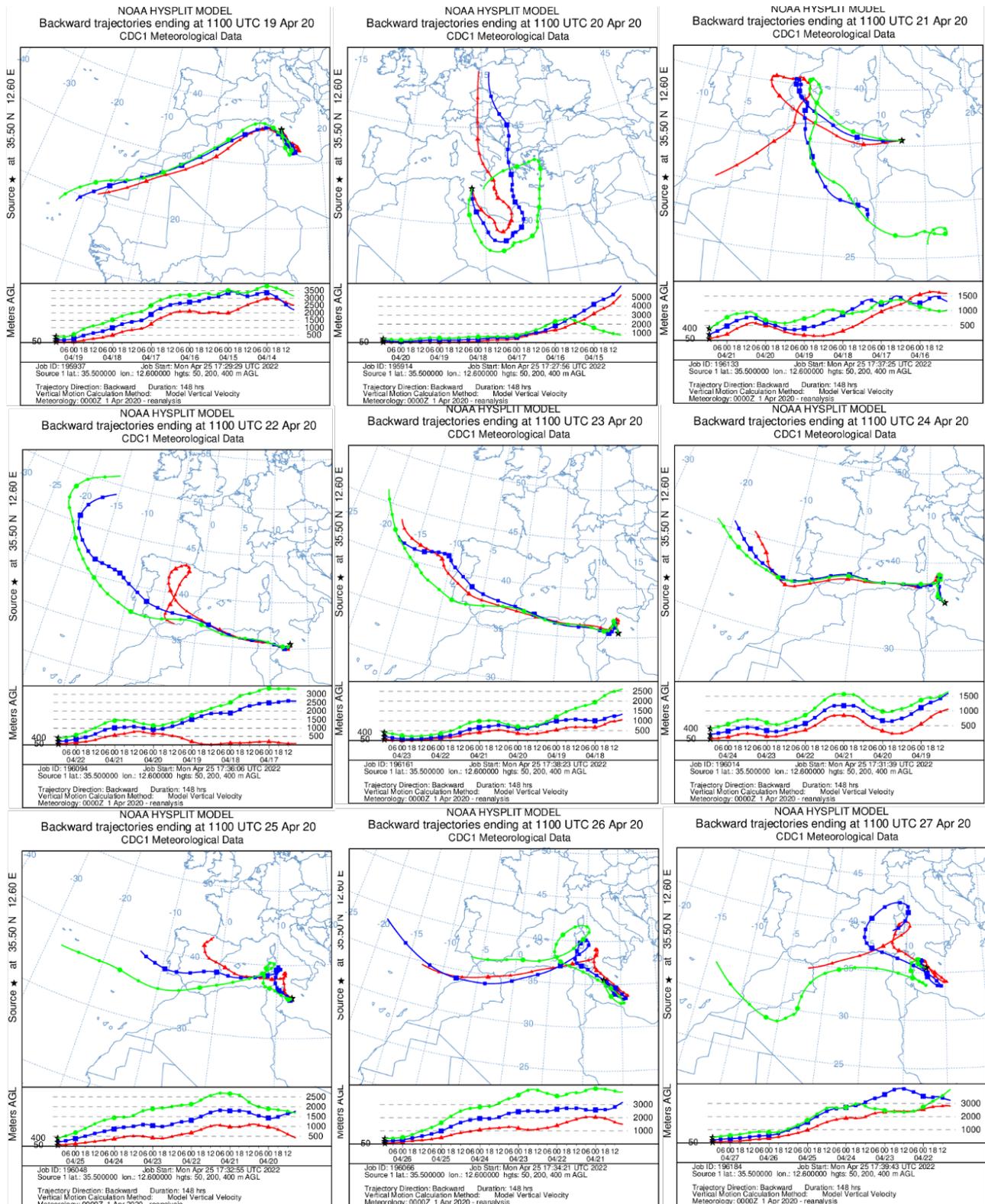


Figure 21. Retro-traiettorie di 7 giorni ottenute dal modello HYSPLIT. Viene riportata una traiettoria al giorno per il periodo 19-27 aprile 2020.



Dal confronto congiunto dello scatter plot e delle retro-traiettorie ottenute con il modello HYSPLIT si evidenziano 4 periodi ben distinti nel mese di aprile 2020:

- Il periodo dal 3 al 9 aprile è caratterizzato da masse d'aria provenienti dai Balcani che transitano sopra l'Italia centro meridionale, a cui sono associati alti valori di CO e di CO₂ ed un'elevata variabilità giornaliera. Queste masse d'aria sono state molto probabilmente influenzate da processi di combustione come evidenziato dai valori e dalla variabilità elevata della CO; l'alto valore della CO₂ non può essere associato con sicurezza ad origini antropiche dato che è noto [Artuso et al., 2009; Trisolino et al., 2021] che la regione balcanica in questo periodo dell'anno sia una sorgente naturale di CO₂;
- i periodi che vanno dal 10 al 12 e dal 17 al 20 aprile sono caratterizzati da una minore variabilità sia della CO che della CO₂ e da valori negativi di entrambe le concentrazioni rispetto alla concentrazione aspettata. Le traiettorie associate dal 10 al 12 sono assai più brevi delle precedenti e corrispondono a masse d'aria che sono state prevalentemente sul mar Tirreno e quindi poco influenzate da sorgenti attive di CO o di CO₂. Le masse d'aria che arrivano a Lampedusa dal 17 al 20 aprile sono caratterizzate da traiettorie discendenti che passano sopra l'Africa nord-occidentale e sono anch'esse poco influenzate da sorgenti recenti, come dimostrato dai ridotti valori della variabilità giornaliera sia per la CO₂ che per la CO. I valori minimi della concentrazione di CO e CO₂ misurati in tutto il mese di aprile sono associati alle traiettorie del 19 e del 20 aprile;
- Il periodo che va dal 13 al 16 aprile presenta valori relativamente bassi di CO₂, ma valori di CO elevati; entrambe le concentrazioni sono associate ad una variabilità elevata. Le corrispondenti traiettorie sono caratterizzate da percorsi che permangono a bassa quota sul Mediterraneo transitando prima a sud di Lampedusa e poi a nord, passando sulla Sicilia e l'Italia Meridionale;
- Il periodo dal 21 a 30 aprile è caratterizzato da bassi valori di CO associati in genere ad una bassa variabilità giornaliera, segno di masse d'aria poco influenzate da attività antropiche. Le masse d'aria hanno un'origine occidentale sorvolando per lo più il nord Africa e la penisola Iberica e sono spesso associate a percorsi assai lunghi; dal 27 al 29 permangono sul Mediterraneo centrale prima di raggiungere Lampedusa.



Il confronto tra le traiettorie delle masse d'aria e le concentrazioni di CO₂ e CO ha confermato come in un sito di fondo quale Lampedusa la concentrazione della CO₂ sia prevalentemente influenzata da sorgenti non locali, evidenziando come nell'aprile 2020 le masse d'aria di origine balcanica siano ricche di CO₂ e di CO.

D'altronde i periodi con minori valori di CO₂ e con minore variabilità sono associati a masse d'aria caratterizzate da tragitti fortemente discendenti non provenienti dall'Italia, che non possono essere associate in alcun modo a sorgenti nazionali direttamente influenzate dal lock down.

Considerando la quota e la permanenza delle diverse traiettorie sulle regioni italiane, l'influenza delle possibili sorgenti emissive italiane su Lampedusa nell'aprile del 2020 sono state minime e corrispondono con il periodo influenzato dalle sorgenti balcaniche e con i valori osservati il 15 ed il 16 aprile.

Questo risultato evidenzia anche che l'influenza di sorgenti regionali che in quel periodo hanno presentato la riduzione delle emissioni in Italia ed in particolare della Sicilia, è difficilmente individuabile dalle osservazioni perché si inserisce tra questi due estremi: il massimo valore associato alle traiettorie balcaniche ed il minimo legato alla concentrazione della media troposfera, che presentano differenze dell'ordine del ppm pari a circa 1/400 del valore della CO₂.



3. CONCLUSIONI

Nel contesto del progetto PULVIRUS (<https://www.pulvirus.it/>), nato nell'aprile 2020 durante le fasi iniziali della pandemia di COVID-19 da una collaborazione tra ENEA, Istituto Superiore di Sanità (ISS) e Sistema Nazionale per la Protezione Ambientale (SNPA, composto da ISPRA e dalle Agenzie Regionali del Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente), ci si è posti la domanda se la variazione delle emissioni nazionali associata al lockdown fosse tale da poter produrre un effetto misurabile sulla concentrazione atmosferica di CO₂ e CO su scala regionale e/o globale.

Da questo punto di vista, il lockdown ha dato la possibilità di valutare gli effetti di una rapida e significativa riduzione delle emissioni antropiche primariamente in relazione alle tematiche della qualità dell'aria, ma anche in relazione ai gas serra come CO₂ e CO.

Per poter valutare gli effetti a scala regionale della diminuzione delle emissioni antropiche è necessario utilizzare misure rappresentative di un'ampia zona che non siano influenzate in maniera rilevante da sorgenti locali, utilizzando quindi le cosiddette misure di fondo.

In Italia l'ENEA compie misure della concentrazione atmosferica di gas serra presso la Stazione di Osservazioni Climatiche di Lampedusa fin dall'inizio degli anni 90 (<https://www.lampedusa.enea.it/>). Grazie alla continua operatività della Stazione anche durante il lockdown, nella primavera del 2020 le misure sono proseguite regolarmente, fornendo così un prezioso database per verificare se in corrispondenza della riduzione delle emissioni antropiche fosse corrisposta una variazione della concentrazione di fondo di CO₂ e CO.

La Stazione di Lampedusa è riconosciuta come una stazione regionale del programma Global Atmosphere Watch dell'OMM, ed è un sito atmosferico dell'infrastruttura di ricerca Europea ICOS (Integrated Carbon Observation System; <http://www.icos-cp.eu>).

L'analisi delle misure di CO₂ e CO compiute presso la Stazione di Lampedusa dal 2014 al 2020 ha mostrato che:

1. non si sono rilevate significative riduzioni del tasso di crescita mensile e annuale di CO₂ durante il primo anno della pandemia (2020), quando le politiche nazionali hanno determinato la maggiore diminuzione di emissioni antropiche;
2. nell'aprile 2020, in corrispondenza con il periodo di lockdown con maggiori restrizioni, si è misurata a Lampedusa una minore variabilità della concentrazione atmosferica di CO₂. Questo è il tipo di segnale mostrato da altre stazioni europee durante il lockdown associato ad una minore



influenza di sorgenti locali, come ad esempio il traffico veicolare. Si è quindi realizzata un'analisi per il mese di aprile 2020 nella quale sono state associate alle misure giornaliere di CO₂ e CO e alla loro variabilità la provenienza delle masse d'aria giunte a Lampedusa. Questa analisi ha evidenziato che i valori minimi in termini di concentrazioni e di variabilità giornaliera delle misure dell'aprile 2020 della CO₂ sono determinati da masse d'aria provenienti dalla media atmosfera e quindi non influenzate da sorgenti regionali di CO₂.

Si può quindi concludere che, sia in termini di valori medi della concentrazione di fondo di CO₂ che in relazione ai valori giornalieri, la riduzione delle emissioni nell'Aprile 2020 non ha alterato in maniera rilevabile la concentrazione di CO₂ atmosferica nel sito di Lampedusa. È da notare come questo risultato differisca da quanto osservato in Europa in siti urbani direttamente influenzati dalle emissioni come quelli considerati nel lavoro di Papale et al. [2020].

A questo punto ci si potrebbe chiedere come si pensa di fronteggiare il riscaldamento globale se anche la riduzione delle emissioni antropiche registrata nel primo periodo del lockdown non ha prodotto riduzioni misurabili sulla concentrazione atmosferica di fondo della CO₂.

La questione è stata ben discussa in diversi studi, tra cui quello di Le Quéré et al. [2020]. Nel loro lavoro gli autori stimano che la diminuzione delle emissioni di CO₂ a livello globale nei momenti di maggiore riduzione delle attività sia stata del 17%. Questo valore può sembrare elevato, ma in termini assoluti corrisponde a tornare alle emissioni antropiche registrate nel 2006. Inoltre, si consideri che la diminuzione su scala annuale è stata molto minore del 17%, ed è stata stimata essere tra il 4.2 ed il 7.5%.

È bene tener presente che il tasso di diminuzione della CO₂ del 7.5% per anno è proprio quello che si stima andrebbe mantenuto per i prossimi *decenni* per limitare il riscaldamento globale ad un valore medio di 1.5 °C rispetto a all'era pre-industriale. Raggiungere questo obiettivo è di grande importanza in particolare per l'Italia e per tutta la zona mediterranea dato che i modelli climatici indicano essere una delle zone al mondo a soffrire le maggiori conseguenze in caso di riscaldamenti superiori. Come puntualizzato dalle stesse Nazioni Unite (<https://sdgs.un.org/goals/goal13>) anche attraverso l'Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC, 2018], l'obiettivo di un riscaldamento globale limitato a 1.5 °C è ottenibile solo attraverso azioni che portino a raggiungere attorno al 2050 un valore netto pari a zero delle emissioni globali di CO₂ equivalente, la cosiddetta *neutralità climatica*; questo risultato implica anche significative riduzioni delle emissioni di altri gas climalteranti, specialmente del metano.



L'obiettivo della neutralità climatica è raggiungibile mediante riduzioni continuative delle emissioni di gas climalteranti che inevitabilmente devono coinvolgere tutti i principali settori economici, tra cui l'energia, i trasporti, l'industria e l'agricoltura, e probabilmente sarà realmente raggiungibile solo grazie alla presa di coscienza collettiva della fondamentale importanza di contenere il riscaldamento globale entro 1.5 °C. Gli investimenti legati al rilancio dell'economia mondiale possono rappresentare un volano per raggiungere l'obiettivo della neutralità climatica; l'auspicio è che questo obiettivo sia perseguito fin d'ora con la massima determinazione.



4. BIBLIOGRAFIA

Artuso, F., P. Chamard, S. Piacentino, D.M. Sferlazzo, L. De Silvestri, A. di Sarra, D. Meloni, F. Monteleone. Influence of transport and trends in atmospheric CO₂ at Lampedusa. *Atmos. Environ.* **2009**, 43, 3044-3051, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.03.027>.

Campanelli, M., A.M. Iannarelli, G. Mevi, S. Casadio, H. Diémoz, S. Finardi, A. Dinoi, E. Castelli, A. di Sarra, A. Di Bernardino, G. Casasanta, C. Bassani, A.M. Siani, M. Cacciani, F. Barnaba, L. Di Liberto, and S. Argentini. A wide-ranging investigation of the COVID-19 lockdown effects on the atmospheric composition in various Italian urban sites (AER – LOCUS), *Urban Climate*, **2021**, 39, 100954, <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100954>.

Chamard, P., F. Thiery, A. di Sarra, L. Ciattaglia, L. De Silvestri, P. Grigioni, F. Monteleone, S. Piacentino. Interannual variability of atmospheric CO₂ in the Mediterranean: measurements at the island of Lampedusa. *Tellus* **2003**, 55B, 83-93, DOI: 10.3402/tellusb.v55i2.16725.

Drori R., U. Dayan, D.P. Edwards, L.K. Emmons, and C. Erlick, Attributing and quantifying carbon monoxide sources affecting the Eastern Mediterranean: a combined satellite, modelling, and synoptic analysis study, *Atmos. Chem. Phys.*, **2012**; 12, 1067–1082, doi:10.5194/acp-12-1067-2012

Huang, J.-P., K. Higuchi, N.B.A. Trivett. Multiresolution Fourier Transform and Its Application to Analysis of CO₂ Fluctuations over Alert. *J. Meteorol. Soc. Japan* **1997**, 75, 701-715, https://doi.org/10.2151/jmsj1965.75.3_701

IPCC, 2018: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press.

Khalil, M.A.K., and R.A. Rasmussen, The global cycle of carbon monoxide: trends and mass balance, *Chemosphere*, 1990; 20, 1-2, 227-272, [https://doi.org/10.1016/0045-6535\(90\)90098-E](https://doi.org/10.1016/0045-6535(90)90098-E).

Le Quéré, C., et al, Temporary reduction in daily global CO₂ emissions during the COVID-19 forced confinement, *Nat. Clim. Chang.* **10**, 647–653, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0797-x>.

Papale, D., et al., ICOS, Integrated Carbon Observation System, info@icos-ri.eu, Clear evidence of reduction in urban CO₂ emissions as a result of COVID-19 lockdown across Europe, <https://www.icos-cp.eu/event/933>, 2020.

Trisolino P, di Sarra A, Sferlazzo D, Piacentino S, Monteleone F, Di Iorio T, Apadula F, Heltai D, Lanza A, Vocino A, Caracciolo di Torchiariolo L, Bonasoni P, Calzolari F, Busetto M, Cristofanelli P. Application of a Common Methodology to Select in Situ CO₂ Observations Representative of the



Atmospheric Background to an Italian Collaborative Network. *Atmosphere*. 2021; 12(2):246. <https://doi.org/10.3390/atmos12020246>, 3044-3051.

World Meteorological Organization, 20th WMO/IAEA Meeting on Carbon Dioxide, Other Greenhouse Gases and Related Measurement Techniques (GGMT-2019). Crotwell, A.; Lee, H.; Steinbacher M., World Meteorological Organization. GAW report N° 255, 2020.



5. RINGRAZIAMENTI

I dati utilizzati per la stesura di questo rapporto tecnico sono stati acquisiti presso la Stazione di Osservazioni Climatiche ENEA di Lampedusa ad eccezione dei dati di concentrazione atmosferica di anidride carbonica delle stazioni di Zeppelin, di Jungfraujoch e di Gartow che come la stazione di Lampedusa fanno parte dell'infrastruttura europea ICOS.

Zeppelin

Lund Myhre, C., Platt, S. M., Hermansen, O., Lunder, C., & ICOS RI. (2022). ICOS Atmosphere Level 2 data, Zeppelin, release 2022-1 (Version 1.0). ICOS ERIC -- Carbon Portal. <https://doi.org/10.18160/DVRW-N591>

Jungfraujoch

Emmenegger, L., Leuenberger, M., Steinbacher, M., Roulet, Y.-A., & ICOS RI. (2022). ICOS Atmosphere Level 2 data, Jungfraujoch, release 2022-1 (Version 1.0). ICOS ERIC -- Carbon Portal. <https://doi.org/10.18160/WV00-VZPN>

Gartow

Kubistin, D., Plaß-Dülmer, C., Arnold, S., Kneuer, T., Lindauer, M., Müller-Williams, J., Schumacher, M., & ICOS RI. (2022). ICOS Atmosphere Level 2 data, Gartow, release 2022-1 (Version 1.0). ICOS ERIC -- Carbon Portal. <https://doi.org/10.18160/FHZC-ZQ4T>