

OZONO: serie temporali, attività solare, vulcani, *total ozone* e *effective ozone*, massa d'aria, buco dell'ozono

Elio Antonello - Versione 1: 16.7.2020; 2: 21.8.2020

Si cerca di capire/illustrare meglio alcuni aspetti dell'ozono per quanto riguarda le periodicità, gli effetti di vulcani ed attività solare, e il buco dell'ozono.

1. Introduzione illustrativa

La figura qui sotto (Rieder et al. 2010) si basa su misure Dobson Unit (DU, spessore della colonna di ozono ottenuta dal confronto delle intensità UVB e UVA) dell'**ozono totale** (quello che sta allo zenit) eseguite con solerzia dagli svizzeri ad Arosa (46°N) negli ultimi 90 anni circa; un set molto lungo.

H. E. Rieder et al.: Extreme events in total ozone over Arosa – Part 1

10025

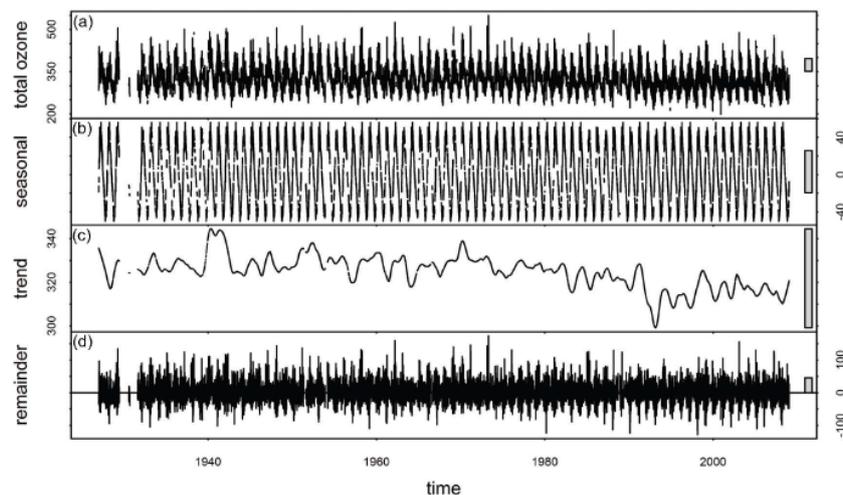


Fig. 3. Decomposition plot of the Arosa total ozone record based on a Seasonal-Trend decomposition procedure based on LOESS (STL): (a) daily mean values, (b) seasonal component, (c) trend component, (d) remainder. For convenient reference, right-hand grey bars in (a–d) refer to the same magnitude (40 DU). Gaps in the time series indicate periods with missing data. All panels are for 1927–2008. LOESS was computed using the `stl-R` function with parameters `t.window=549`, `t.degree=1`, `s.window="periodic"`, and `s.degree=0`.

Pannello (a): medie giornaliere del total ozone. Questo tipo di serie temporali si interpreta con il metodo statistico della regressione multipla, mediante un modello che è la somma della componente stagionale (rappresentata con termini trigonometrici), della QBO (Quasi Biennial Oscillation; rappresentata con un proxy), dell'attività solare undecennale (rappresentata con il proxy emissione radio 10.7 cm), di un trend a lungo periodo con una componente stagionale di ampiezza lentamente variabile, e di un residuo.

Pannello (b): oscillazione stagionale ricavata con la regressione: si può notare l'ampiezza di circa +/- 50 DU (max-min circa 100 DU).

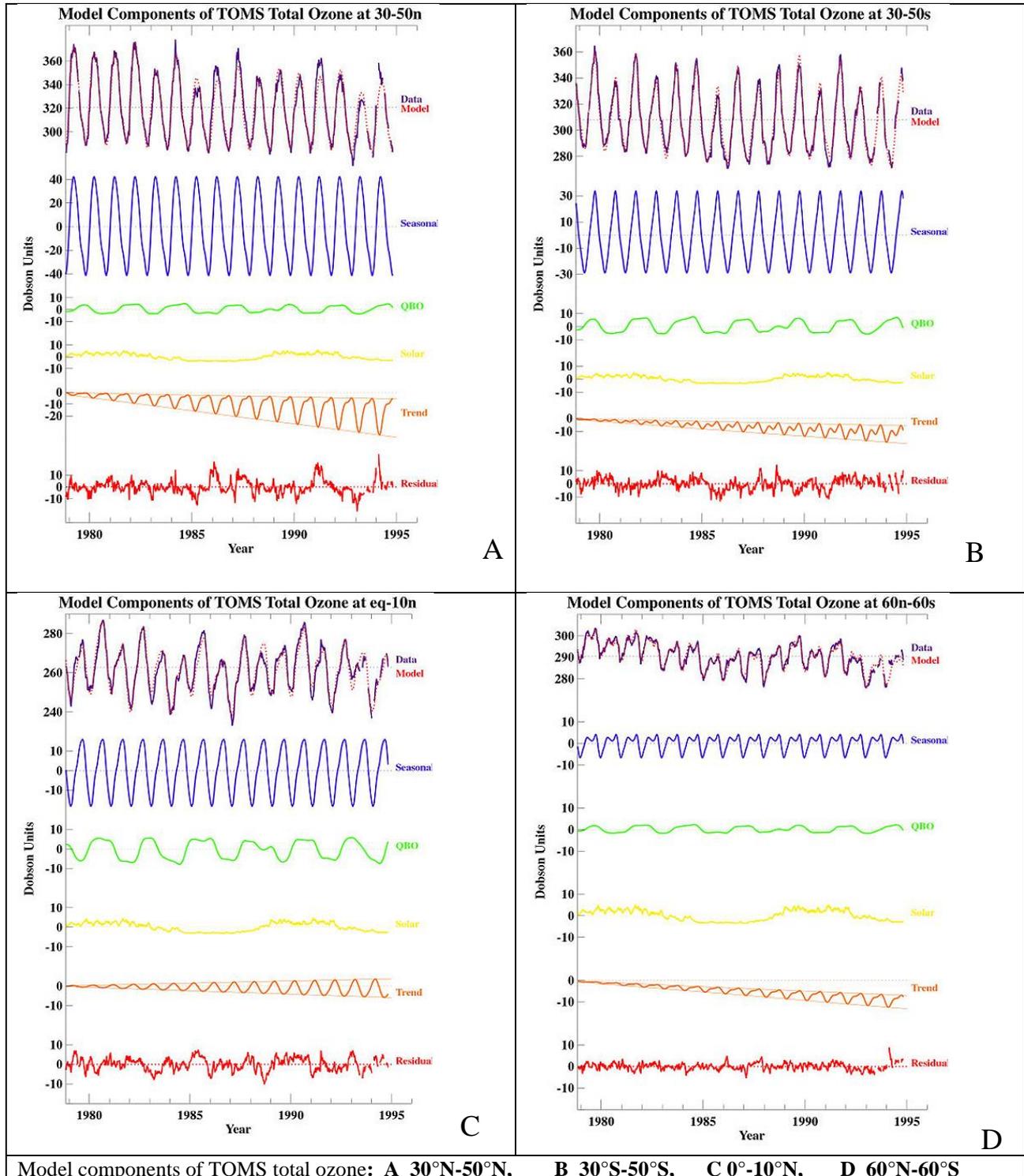
Pannello (c): trend ricavato; qui sono inglobati anche il contributo della QBO e il ciclo undecennale del Sole; la diminuzione progressiva negli ultimi 20 anni è legata al problema inquinamento CFC.

Pannello (d): stima del residuo, tolti oscillazione stagionale e trend; è piuttosto ampio (anche +/- 100 DU), di alta frequenza e dovrebbe essere spiegato dalle **condizioni atmosferiche variabili** (temperatura, pressione, copertura nuvolosa).

L'eruzione vulcanica **più intensa** degli ultimi 90 anni è stata il **Pinatubo del 1991**, e in vari lavori è stato rilevato l'effetto sull'ozono degli **anni 1992-1993**; qui si può vederlo nel **Pannello (c)** in corrispondenza dei valori più bassi. Si tratta di un effetto di 'solo' una decina di DU.

2. Regressioni multiple

Il manuale-textbook NASA (1999) discute in dettaglio il metodo statistico delle regressioni multiple, e riporta esempi illustrativi con risultati mediati per diversi intervalli di latitudine, come nella figura qui sotto. Si parte con i dati (**Data**) di **total ozone**, **medie mensili**, e si arriva al modello statistico **Model**, risultato dalla sovrapposizione delle varie componenti e rappresentato dalla curva tratteggiata sovrapposta a **Data**.



Seasonal: oscillazione stagionale ricavata.

QBO: effetto della circolazione atmosferica della Quasi-Biennial Oscillation; ha un'ampiezza piccola, in genere è più significativa a latitudini tropicali.

Solar: effetto dell'attività solare undecennale, ricavato adattando il proxy radio;

Trend: trend a lungo termine che si presume sovrapposizione di un trend lineare e un'oscillazione annuale (stagionale) di ampiezza variabile;

Residual: residuo che rimane dopo tolte le suddette componenti.

Caso A: latitudini 30°N - 50°N, confrontato con **Caso B**, latitudini 30°S - 50°S: la diversa ampiezza Seasonal dimostra l'asimmetria dei due emisferi; essa insieme alla diversità del valore medio del Model, un po' più basso nell'emisfero Sud, sono legati alla circolazione Brewer-Dobson che sposta a livello stratosferico l'ozono prodotto nei tropici e lo deposita presso i Poli, ma in modo preferenziale nella zona Nord.

Confronto con **Caso C**, latitudini 0° - 10°N: l'ampiezza Seasonal è 'piccola'. Confronto con **Caso D**, 60°N-60°S: qui la Seasonal è proprio piccola perché i due emisferi si compensano, ma non esattamente, per cui la variazione Seasonal non si riduce a zero; resta quindi una curva con minimi primari (Nord) e minimi secondari (Sud), evidenti anche nella curva **Data**: essendo quest'ultima curva ora di **ampiezza molto piccola**, è possibile notarvi adesso anche l'**oscillazione undecennale del Sole**. NASA (1999) commenta:

Comparing the seasonal cycle component (blue curve) in each figure, we note the following points: 1) *The seasonal cycle is largest in the northern hemisphere midlatitudes. At 30-50°N the seasonal cycle ranges 80 DU from maximum to minimum, whereas in the southern hemisphere midlatitudes, it ranges 60 DU from maximum to minimum.* 2) *The seasonal cycle in the tropics is much smaller than in the midlatitudes. In the Equator-10°N band, its range is about 30 DU from maximum to minimum. We expect to see much less variation here, since there is little variation in the position of the Sun, and therefore in the amount of solar irradiance, during the year in the tropics.* 3) *The smallest seasonal cycle is in the global average of ozone. At 60°N-60°S, it is only about 10 DU from maximum to minimum.*

Comparing the QBO component in each figure (green curve), we note the following points: 1) *The ozone QBO contribution is largest in the tropics. In the Equator-10°N latitude band, the amplitude of the QBO of ozone is about 12 DU from maximum to minimum.* 2) *In the northern and southern middle latitudes, the estimated QBO is about 10 DU from maximum to minimum. Although it is not shown here, in some seasons the magnitude of the extratropical QBO is actually larger than the equatorial QBO, even though the QBO is a tropical phenomenon.* 3) *The phase of the ozone QBO is opposite in the tropics and midlatitudes. This inverse relationship holds for the entire time period. Because of this variation of the phase of the ozone QBO signal with latitude, the QBO proxy was shifted, or lagged, in time to give the best fit between the model and data. A different lag is applied at each latitude. Lagging the QBO proxy in this fashion is a common feature of most trend research models.* 4) *The amplitude of the global ozone QBO is much smaller, and in phase with the midlatitude signal.*

Comparing the solar cycle component in each figure (yellow curve) we note the following point: *The amplitude of the solar cycle is ~5 DU for all the latitude bands shown. Currently, the solar cycle of ozone is not well quantified, and some of the variability in the ozone that we attribute to solar cycle may be due to other factors, particularly aerosol contamination. Although not shown in this plot, analysis of the estimated errors for each model component show that the solar cycle has the largest associated uncertainty range. Many researchers are currently studying the solar cycle in ozone, but because the period is so long (11 years), it will take more data over longer time periods to lessen the uncertainty of the solar cycle estimate.*

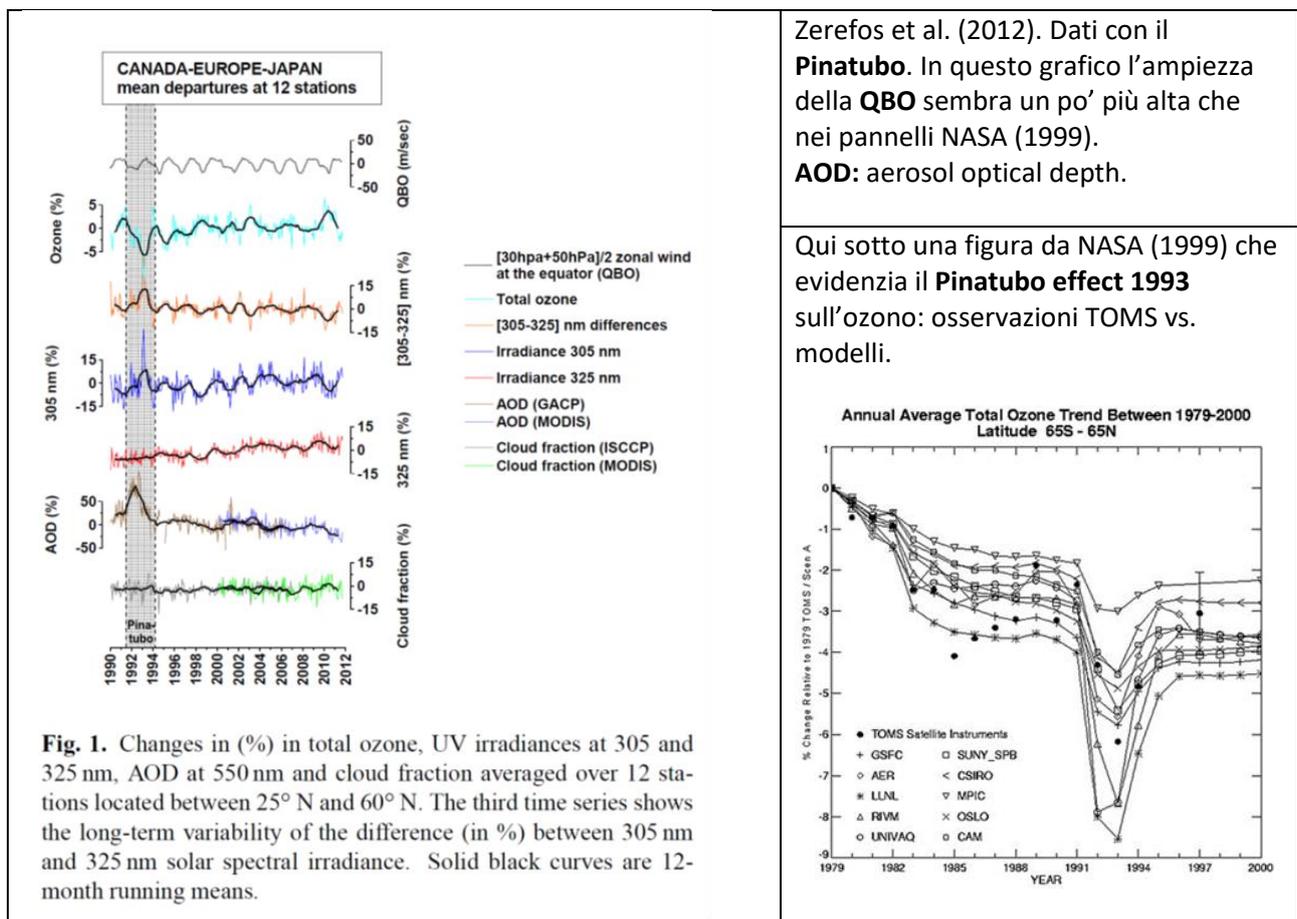
Comparing the seasonally varying trend component in each figure (orange curve) we note the following points: 1) *The long-term trend is most negative in the northern hemisphere midlatitudes. At 30-50°N, the ozone has been depleted by as much as 36 DU over the course of 16 years.* 2) *The seasonal variability of the long-term trend is largest in the northern hemisphere midlatitudes. The solid lines enveloping the long-term trend component represent the seasonal variation of the trend. In the 30-50°N latitude band, the wintertime ozone values in 1993 are nearly 35 DU less than they used to be in 1978, while the summertime values have only decreased by about 5 DU. People are more likely to be exposed to sunlight in the summer, so it is fortunate that this is when the observed ozone trend is smallest. Nonetheless, even small reductions of ozone can cause increased UV exposure.* 3) *The long-term trend is small in the tropics and is even positive during some seasons. However, the tropical trends are not statistically significant.*

Therefore, we cannot say with statistical certainty that the long-term ozone levels are changing in this region.

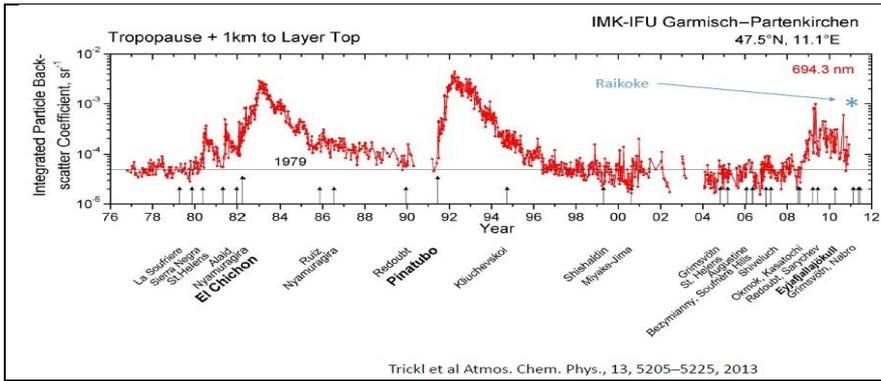
Per quanto riguarda i cicli solari, NASA (1999) menziona un trend su molti decenni che si pensa debba dipendere dall'attività solare, e cita il **ciclo di Gleissberg** di 88 anni delle macchie solari; nel **Pannello (c)** di Arosa si potrebbe **forse intuire** tale andamento, di piccola ampiezza, ma c'è anche l'ozono che è sofferente per i CFC negli ultimi decenni.

3. Vulcano Pinatubo

Nei pannelli A, B, C, D della figura precedente dovrebbe vedersi anche l'effetto del **vulcano Pinatubo**, ma questo lo si vede solo nel valore più basso raggiunto dai **Data** del Caso A. Il vulcano è invece ben evidenziato nel lavoro di Zerefos et al. (2012) come si vede nella figura qui sotto a sinistra (**perché dipende anche da come sono stati mediati i dati...**).



La figura sopra a destra con il **Pinatubo effect** (NASA 1999) mostra un minimo, in apparenza profondo. Le osservazioni però dicono: -6.2% sulla **media annuale** dell'ozono nel 1979 (se usiamo come media 290 DU del Caso D, 60S-60N, è circa -18 DU). E se ci riferiamo realisticamente ai livelli di ozono osservati (TOMS) negli anni intorno al 1990 e intorno al 1996 siamo circa a -3 o -4%, quindi solo una decina di DU.

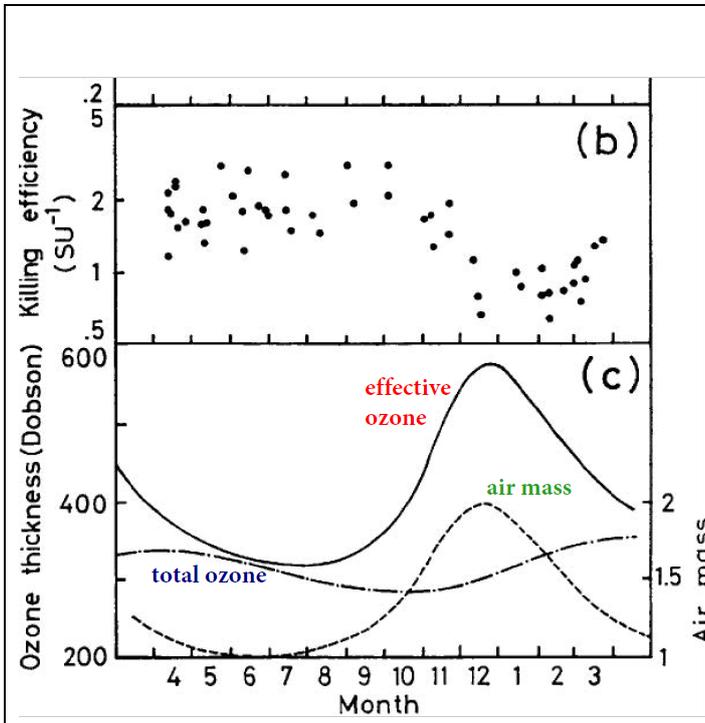


Eruzioni vulcaniche 1976-2012. Le osservazioni TOMS nella figura precedente dell'Annual Average Total Ozone mostrano probabilmente anche i piccoli effetti di ElChichon 1982-1985. L'eruzione è mostrata dagli aerosol qui a sinistra.

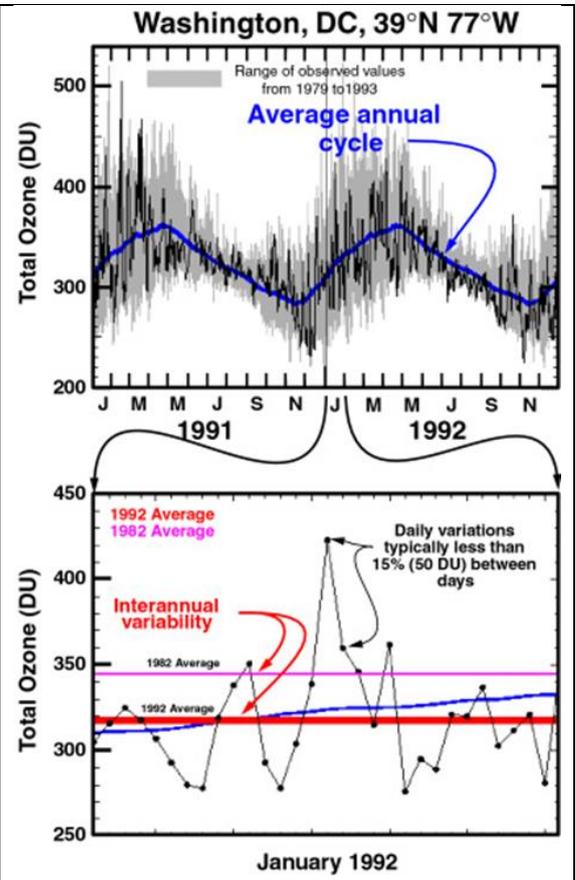
In conclusione: ai fini dei nostri lavori, secondo me gli effetti sull'ozono dei vulcani e dell'attività solare osservati negli ultimi novanta anni sembrano piccoli. Come visto sopra, NASA (1999) metteva in guardia che anche piccole variazioni di ozono possono aumentare l'esposizione UV, se avvengono d'estate; e in precedenza riportava un esempio di *DNA action spectrum*: con una riduzione del 10% di ozono c'è aumento di probabilità di danneggiamento da UV del DNA del 22%. Però 10% di total ozone sono circa 30 DU, quindi ben maggiore dell'effetto sull'ozono dell'attività solare e dei vulcani (dell'ultimo secolo).

4. Total ozone e effective ozone

Il **total ozone** si ricava dalla misura dell'**effective ozone** realmente effettuata da terra, corretta poi per la massa d'aria-angolo zenitale del Sole, in modo da determinare lo spessore della colonna di ozono allo zenit. In letteratura non è facile trovare dati/risultati dell'effective ozone. Nel ben noto lavoro di Furusawa et al. (1990), che si riferisce a 35°N, si riporta una stima teorica dell'ozono come nella figura qui sotto a sinistra.



Furusawa et al. (1990). Dati per Isehara in Giappone. La killing efficiency è quella dell'UV solare sul virus batteriofago usato negli esperimenti.



NASA (1999). Dati per Washington D.C.

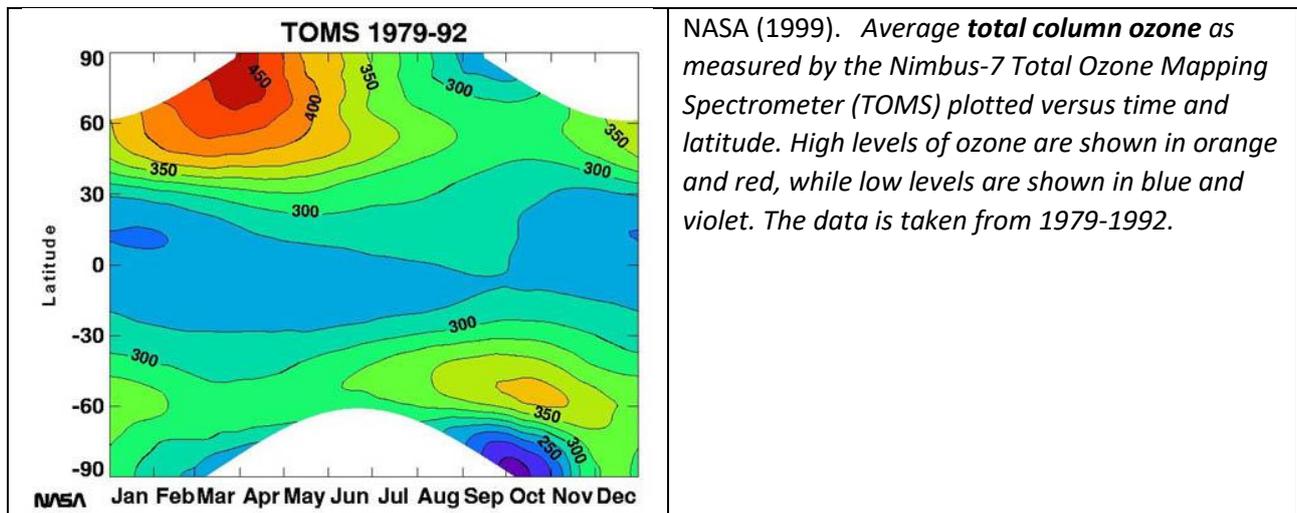
La curva continua è l'effective ozone data dal prodotto del total ozone (curva a tratto e punto) per la massa d'aria (curva tratteggiata). Si noti la differenza di ampiezza dell'ozono totale e dell'ozono effettivo. Come confronto, sulla destra riporto il **total ozone** a Washington DC, 39°N (da NASA 1999); usando la formula specifica che definisce la massa d'aria per l'ozono deduco che all'*average annual cycle* (**curva blu**) corrisponde un **effective ozone** con minimo a giugno di circa 330 DU e massimo in dicembre di circa 660 DU (supponendo la misura a mezzogiorno con corrispondente angolo zenitale). L'ampiezza **effettiva quindi** è circa 330 DU. Nel caso di Furusawa è invece inferiore a 300. Ovviamente l'ampiezza dell'**effective ozone** cresce con la latitudine per effetto **anche** dell'angolo zenitale.

Notare la dispersione dei punti **giornalieri** osservati a Washington, molto alta tra ottobre e maggio e molto ridotta tra giugno e settembre. Scrive NASA (1999): **The difference in day-to-day changes in ozone can be attributed to a more active weather pattern in winter than in summer.** Come si vede nel pannello inferiore, nel giro di quattro giorni l'ozono totale può cambiare da 280 a 430 DU (ovvero ben 150 DU; che in gennaio fanno 300 DU circa di ozono effettivo), e questo spiegherebbe anche i forti residui nel **Pannello (d)** di Arosa.

[NOTA PRATICA: per le latitudini da 0° fino ai 50° N – 50°S, nei tre mesi centrati sul solstizio "estivo locale" l'ozono totale di mezzogiorno è 'poco' diverso da quello effettivo (la differenza è entro +/- 10%) perché la massa d'aria è poco diversa da 1, e va da 1 a 1.12].

5. Buco dell'ozono

La figura qui sotto illustra l'asimmetria e lo sfasamento degli emisferi nord e sud. Il massimo di ozono totale a 60°N si ha verso aprile; il massimo a 60°S si ha verso ottobre ma è anche il periodo in cui ci può essere il buco dell'ozono in Antartide; **si dice "buco" quando l'ozono totale scende sotto 200 DU.**



Il buco dell'ozono si è sentito anche in Cile meridionale. L'immagine qui sotto di Nozawa et al. (2007) mostra il caso per **Punta Arenas** (53°S) negli anni 2003 e 2004, l'ozono effettivo sono i **cerchietti rossi**. Sopra 800 DU non ci sono misure perché i risultati non sono affidabili (inverno australe: la massa d'aria qui arriva a 4).

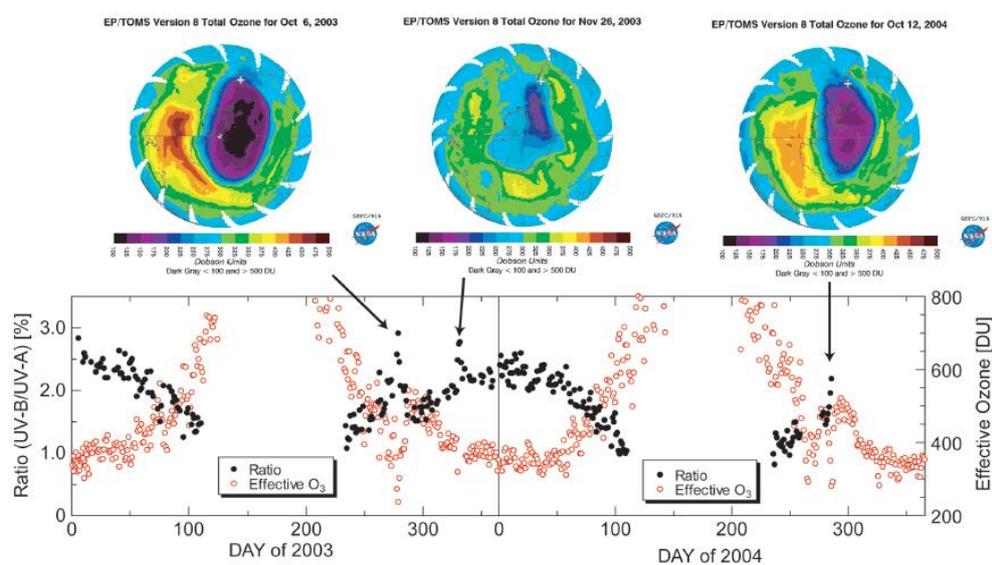


Figure 5 – Variation of UV-ratio (UV-B/UV-A, ●) and effective ozone (○) at Punta Arenas between 2003 and 2004. Sudden enhancement of ratio can be seen in spring. Ozone mapping data observed by TOMS onboard the Earth Probe spacecraft (EP/TOMS) are shown on top. Cross-marks on upper panels indicate positions of Punta Arenas. All sudden enhancements of UV-ratio concern expansion of the ozone hole.

Il livello di ozono effettivo nei mesi estivi australi (gennaio) appare essere circa 350 DU; l'ozono totale risulta quindi circa 310. Nella primavera australe (ottobre) del 2003 l'ozono effettivo appare essere sceso fino a circa 230 DU; stimando una massa d'aria circa 1.6 per fine settembre, l'ozono totale era quindi sceso **verso 150 DU**. Una bella differenza rispetto alle condizioni normali.

Considerazioni riassuntive di NASA (1999) su Antartico e Artico: *The Antarctic ozone hole is a region of very large ozone losses over Antarctica that occur in the southern hemisphere spring, appearing in September and breaking up at the end of October* [quindi il buco c'è solo per due mesi all'anno; non c'è sempre].

While there is not a symmetrical Arctic "hole" as seen in the Antarctic, there have been severe spring ozone losses recorded in the last several years for the north polar region [c'è chi parla di mini-holes nell'Artico, a volte più forti a volte meno forti]. *The CFCs that destroy ozone are distributed throughout the atmosphere. However, the holes form as a result of exceptionally cold temperatures which occur during the winter season over the polar regions. These cold temperatures isolate air in the polar regions from ozone rich air at lower latitudes and allow formation of polar stratospheric clouds that enhance ozone destructive processes.*

Nell'Artico si rilevano le tempeste solari (**SPE, Solar Proton Events**), ma soltanto in inverno-primavera, con una diminuzione dell'ozono per qualche decina di giorni; il vortice polare invernale (circolazione atmosferica intorno al Polo) tende a bloccare il fenomeno sopra 60°N. Denton et al. (2018) concludono: *Stratospheric ozone measurements from sites that are within the PV (Polar Vortex) show a decrease in ozone partial pressure following SPEs. The decrease in ozone partial pressure at the altitude of peak ozone is ~5–10%, commences close to zero epoch, and persists for ~30 days. No decrease in stratospheric ozone is detected following SPEs in late summer or autumn. No decrease is detected following a set of random epochs. No decrease is detected for sites that are situated completely outside the PV. The PV is an essential and necessary factor for causing stratospheric ozone depletion following SPEs. Results suggest that delayed (indirect) destruction of ozone plays a role in the stratospheric ozone budget following SPEs.*

Bibliografia

- Denton et al. 2018, *Northern Hemisphere Stratospheric Ozone Depletion Caused by Solar Proton Events: The Role of the Polar Vortex*, Geophysical Research Letters, 45, 2115–2124.
- Furusawa et al. 1990, *Biological and physical dosimeters for monitoring solar UV-B light*, J. Radiat. Res. 31, 189-206.

NASA 1999, *Stratospheric ozone. An electronic textbook*,

http://www.ccpo.odu.edu/SEES/ozone/oz_class.htm

Nozawa et al. 2007, *Ground-based observations of solar UV radiation in Japan, Brazil and Chile*, *Revista Brasileira de Geofisica* (2007) 25(Supl. 2): 17-25

Rieder et al. 2010, *Extreme events in total ozone over Arosa – Part 1: Application of extreme value theory*, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 10021–10031.

Zerefos et al. 2012, *Evidence of a possible turning point in solar UV-B over Canada, Europe and Japan*, *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 2469–2477.

APPENDICE

La massa d'aria l'approssimiamo con la secante dell'angolo zenitale.

Un calcolo più preciso è quello di Dobson, oppure il *Brewer algorithm*:

$AMF = \sec \left(\arctan \left(\frac{R \sin \theta}{R+h} \right) / \sqrt{1 - \frac{R^2 \sin^2 \theta}{(R+h)^2}} \right)$ con R = raggio terrestre, h = posizione dell'ozono

(strato supposto sottile), θ = angolo zenitale del Sole SZA; si assume =0 l'altezza dell'osservatore, R=6370 km, (h=21.988 km, Anton et al. 2009, *Influence of the ozone profile above Madrid (Spain) on Brewer estimation of ozone air mass factor*, *Ann. Geophys.*, 27, 3179–3183; si veda Savastiuk e McElroy 2004 su Researchgate).

Ci sono molte pubblicazioni, formule e discussioni per gli angoli zenitali MOLTO grandi.

Tabella con la massa d'aria approssimata, per il SZA di mezzogiorno: SZA = lat - obliq, oppure lat + obliq, dove obliquità: 23.44 gradi.

	lat.	SZA estate locale	Massa d'a.	SZA inverno locale	Massa d'a.
Isehara	35.5 N	12.1	1.0	58.9	1.9
Arosa	46.5 N	23.1	1.1	69.9	2.9
Washington DC	39 N	15.6	1.0	62.4	2.1
Punta Arenas	53 S	29.6	1.1	76.4	4.2

Con Stellarium: a Punta Arenas a settembre si ha altezza Sole 36°, SZA=90°-36°=54° e massa d'aria 1.7; a ottobre altezza 42°, SZA 48° e massa d'aria 1.5.

$\cos SZA = \sin(\text{lat}) * \sin(\text{decl}) + \cos(\text{lat}) * \cos(\text{decl}) * \cos(\text{angolo orario})$, dove decl = +/- obliq, angolo orario facciamo 0°; $\cos SZA = \sin(\text{lat}) * \sin(\text{obliq}) + \cos(\text{lat}) * \cos(\text{obliq}) \dots$ da cui SZA=lat +/- obliq.