



cca Centro de
Ciencias Ambientales
Facultad de Ciencias - Universidad de Chile



LA CAPA DE OZONO Y EL PROTOCOLO DE MONTREAL.

UN EXITO POR LA PROTECCION DEL MEDIO AMBIENTE GLOBAL

Dr. MANUEL A. LEIVA GUZMAN
manleiva@uchile.cl

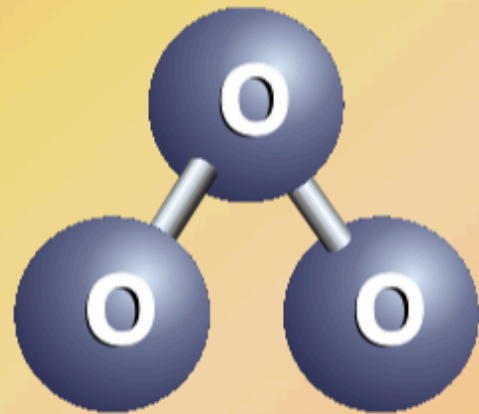
Conceptos básicos



¿Qué es el ozono?

El ozono es una de las formas químicas en las que el oxígeno se encuentra en la naturaleza, además del oxígeno molecular.

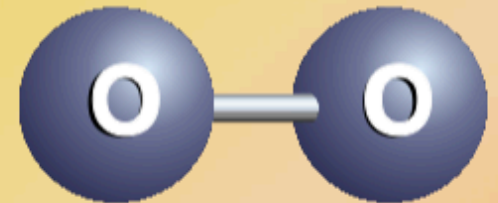
Molécula
Ozono (O_3)



Átomo
Oxígeno (O)



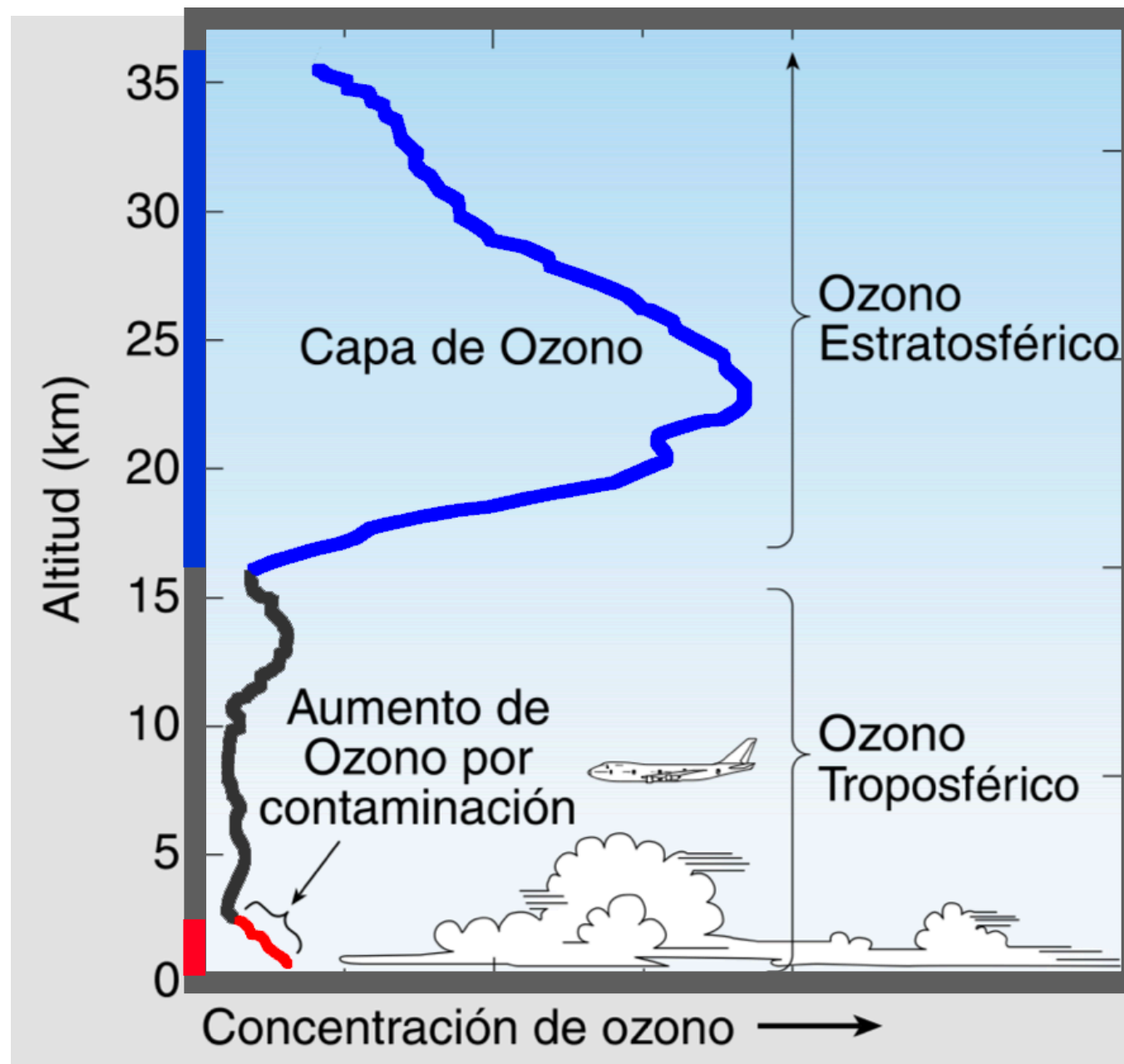
Molécula
Oxígeno (O_2)



Una molécula de ozono (O_3) contiene tres átomos de oxígeno (O) enlazados. Las moléculas de oxígeno (O_2) que constituyen el 21% de la atmósfera, tienen dos átomos de oxígeno enlazados.

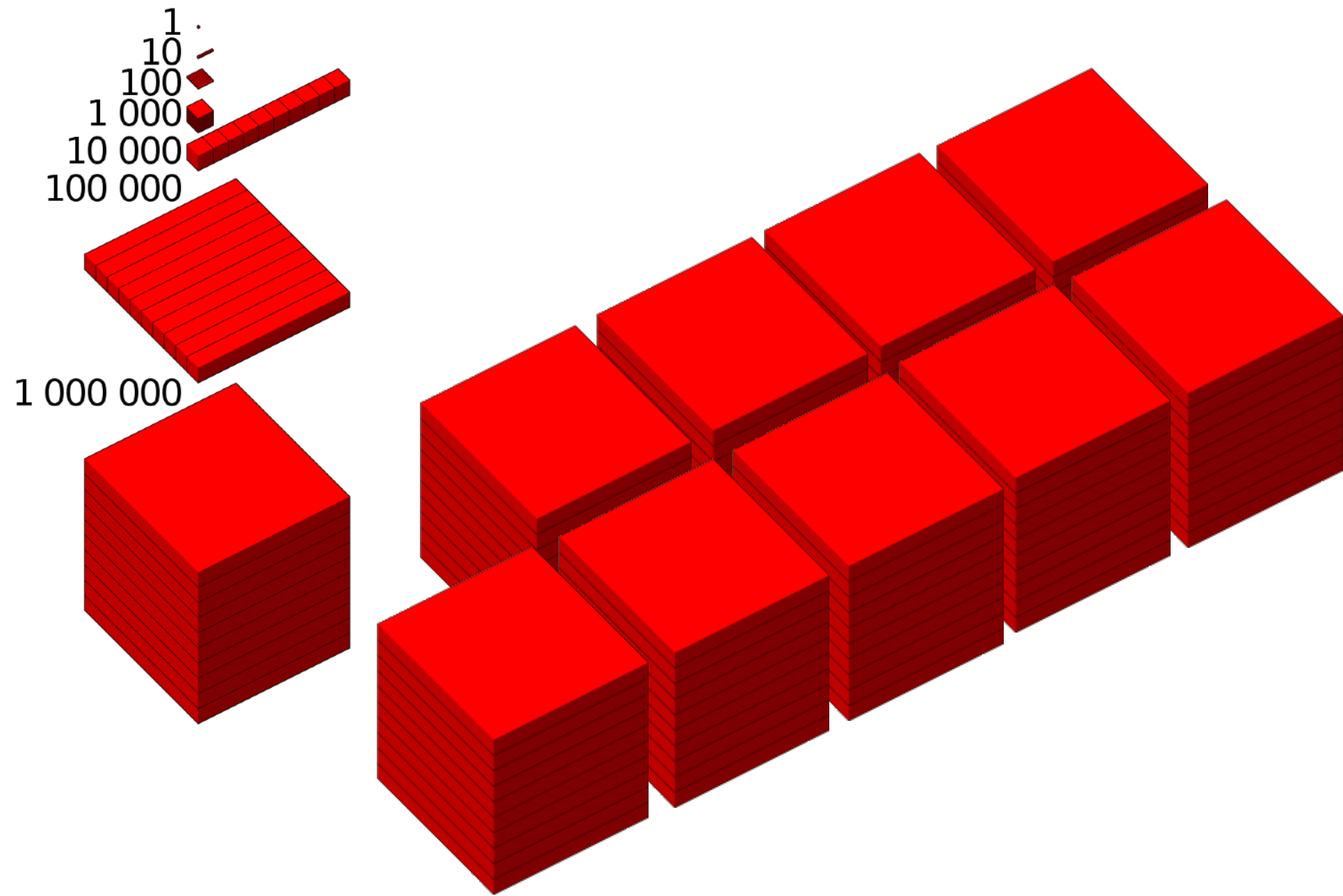
¿Qué es el ozono?

El ozono está presente en la **zona inferior de la atmósfera** y **se concentra mayormente en la “capa de ozono”** de la estratósfera. En la tropósfera el ozono se forma como resultado de la contaminación por la acción del hombre.

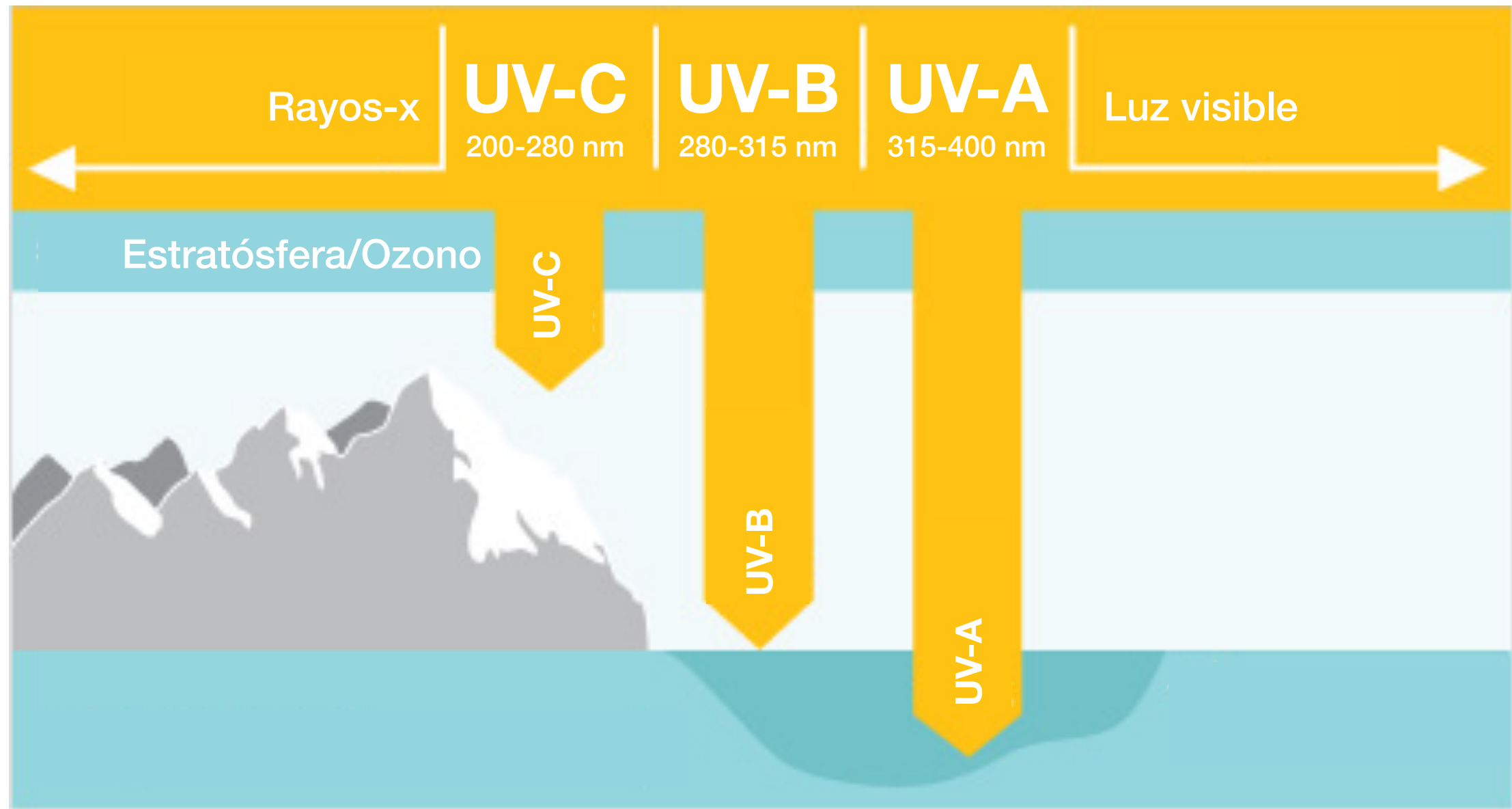


Ozono es escaso

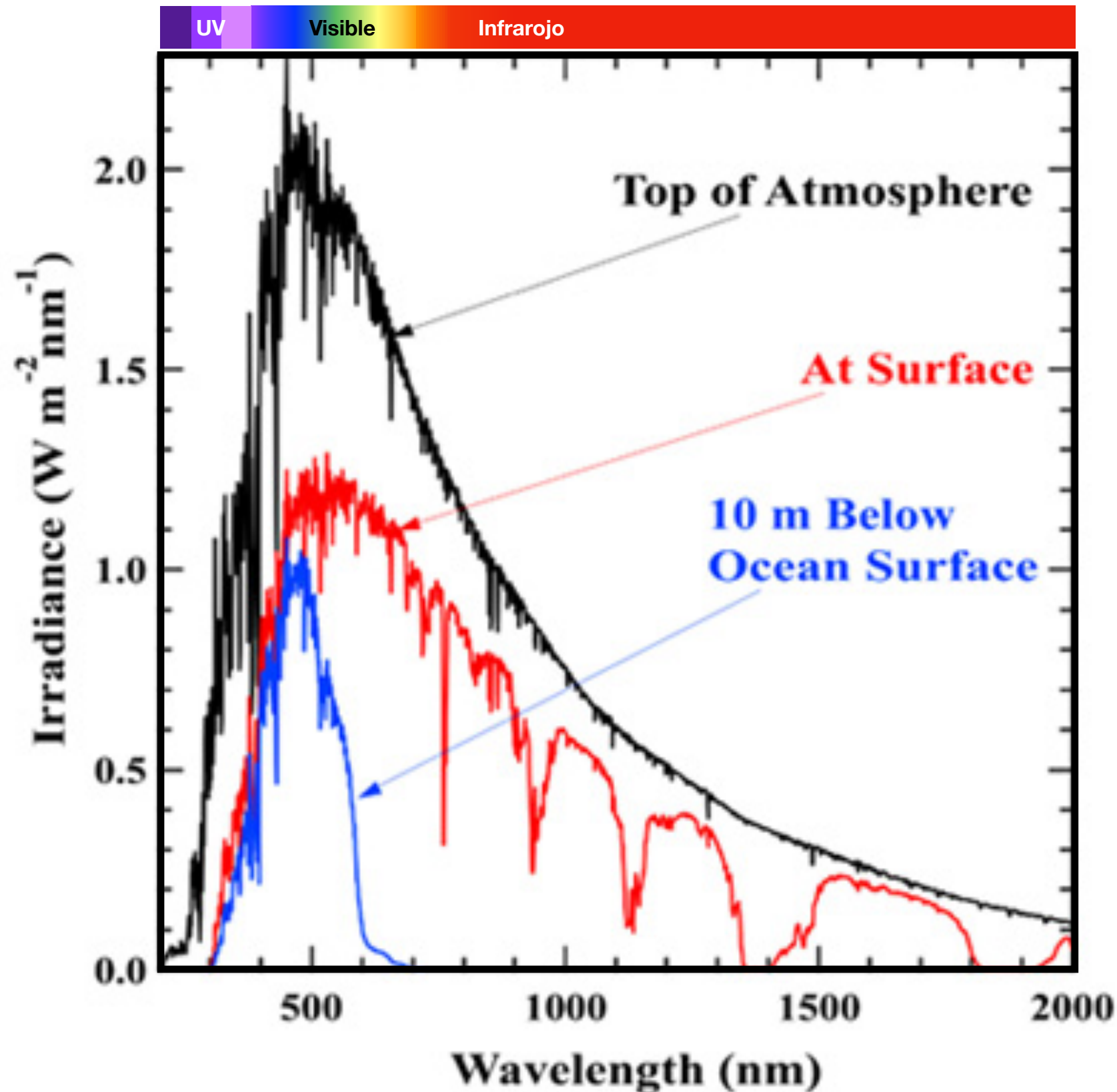
1 molécula de ozono
10 000 000 moléculas de aire



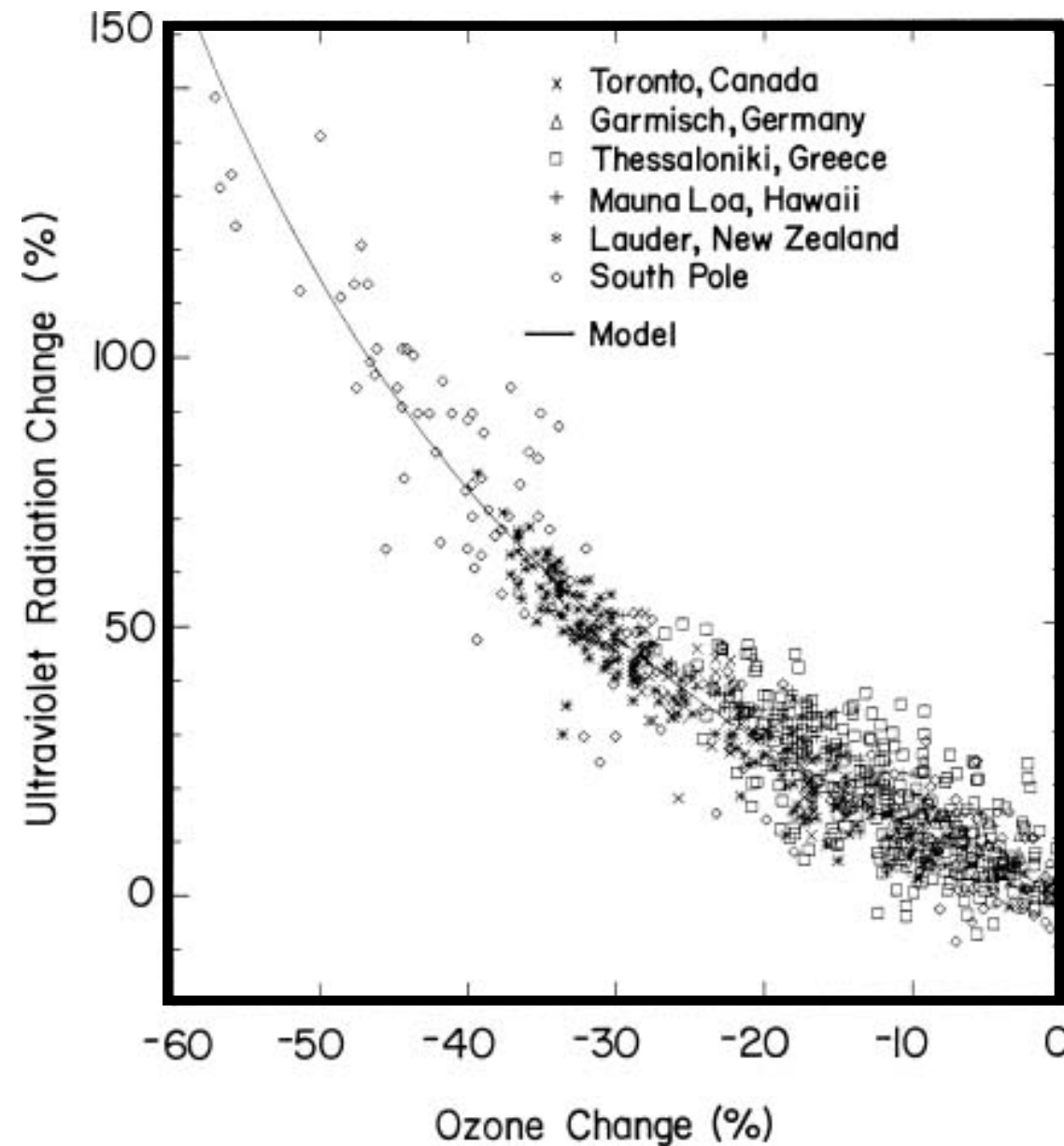
Ozono y radiación solar



Ozono y radiación solar

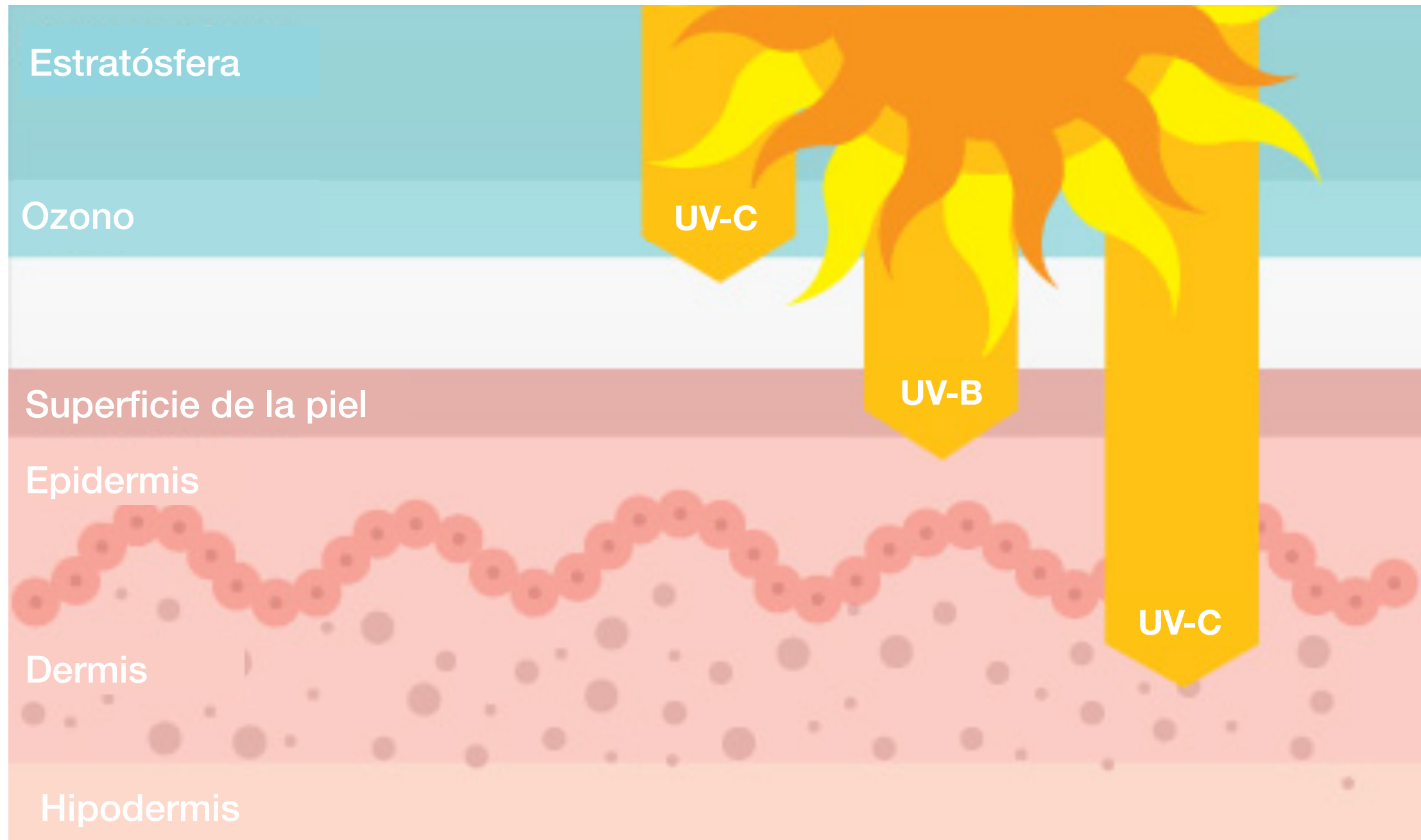


Ozono y radiación solar



Una disminución del ozono produce
un aumento de radiación UV

Radiación solar y piel

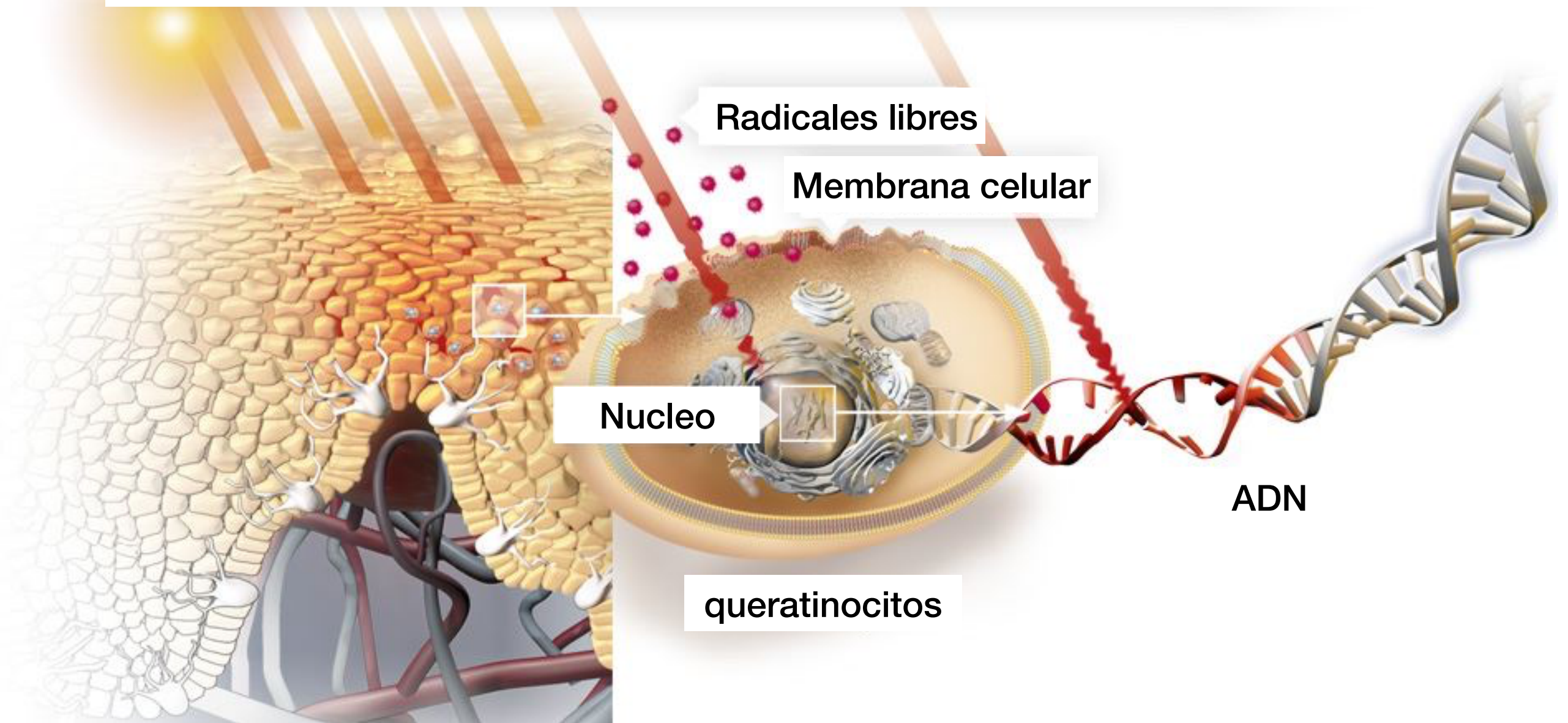


Radiación solar y daño en DNA

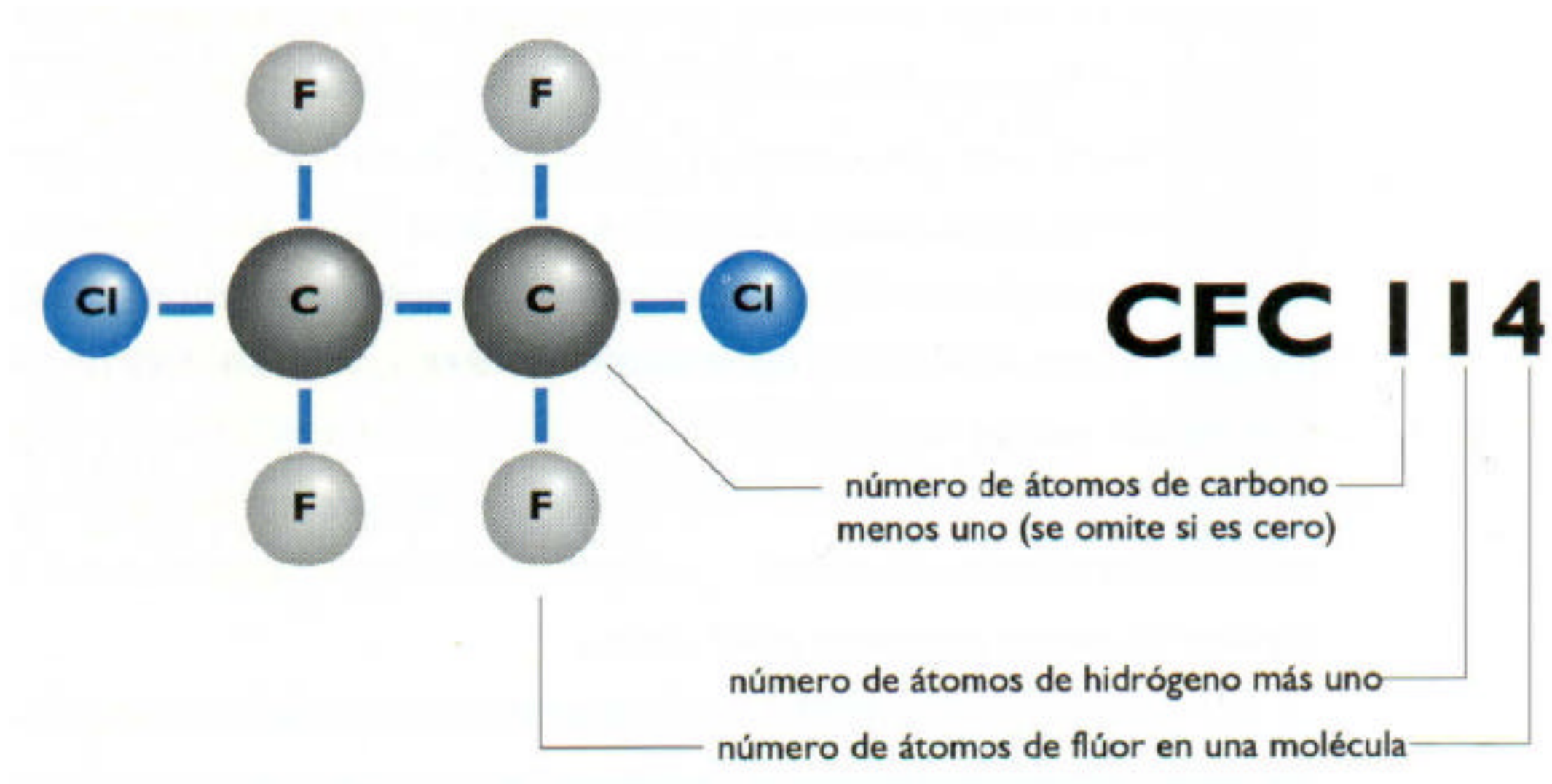
UV induce daño en la piel

daño celular

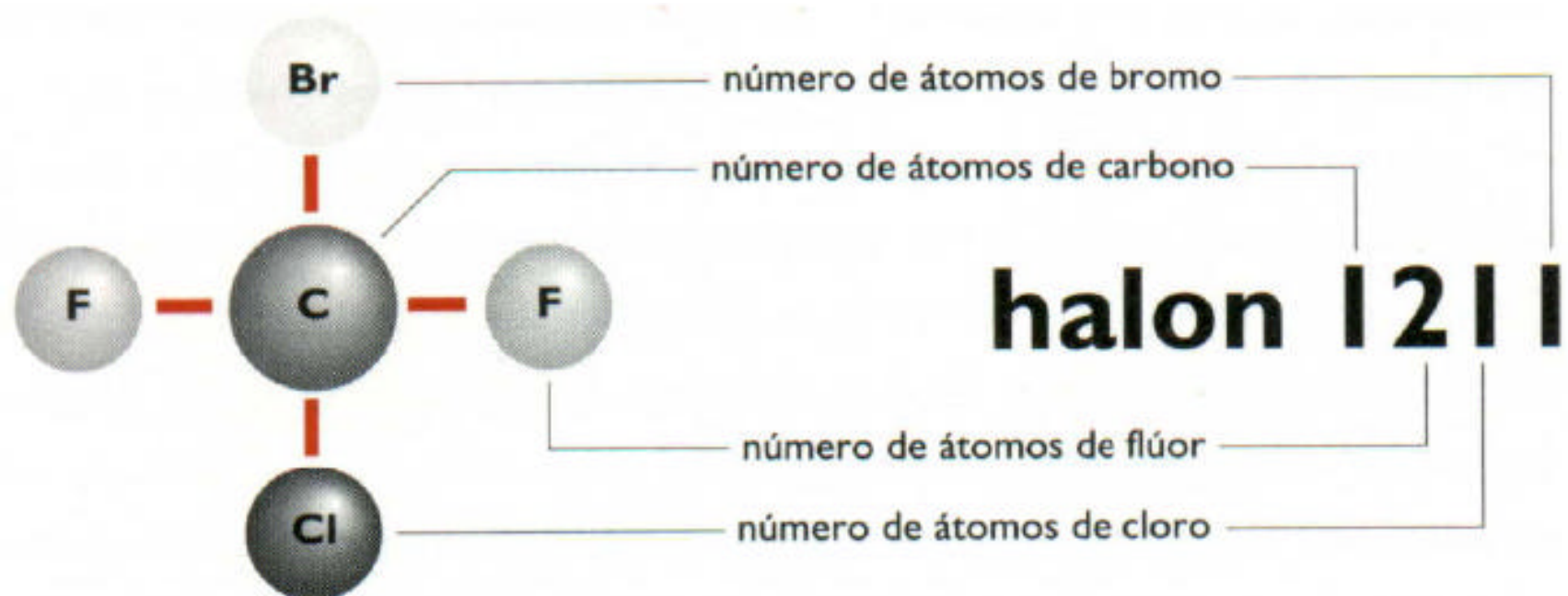
daño en el ADN



CFCs



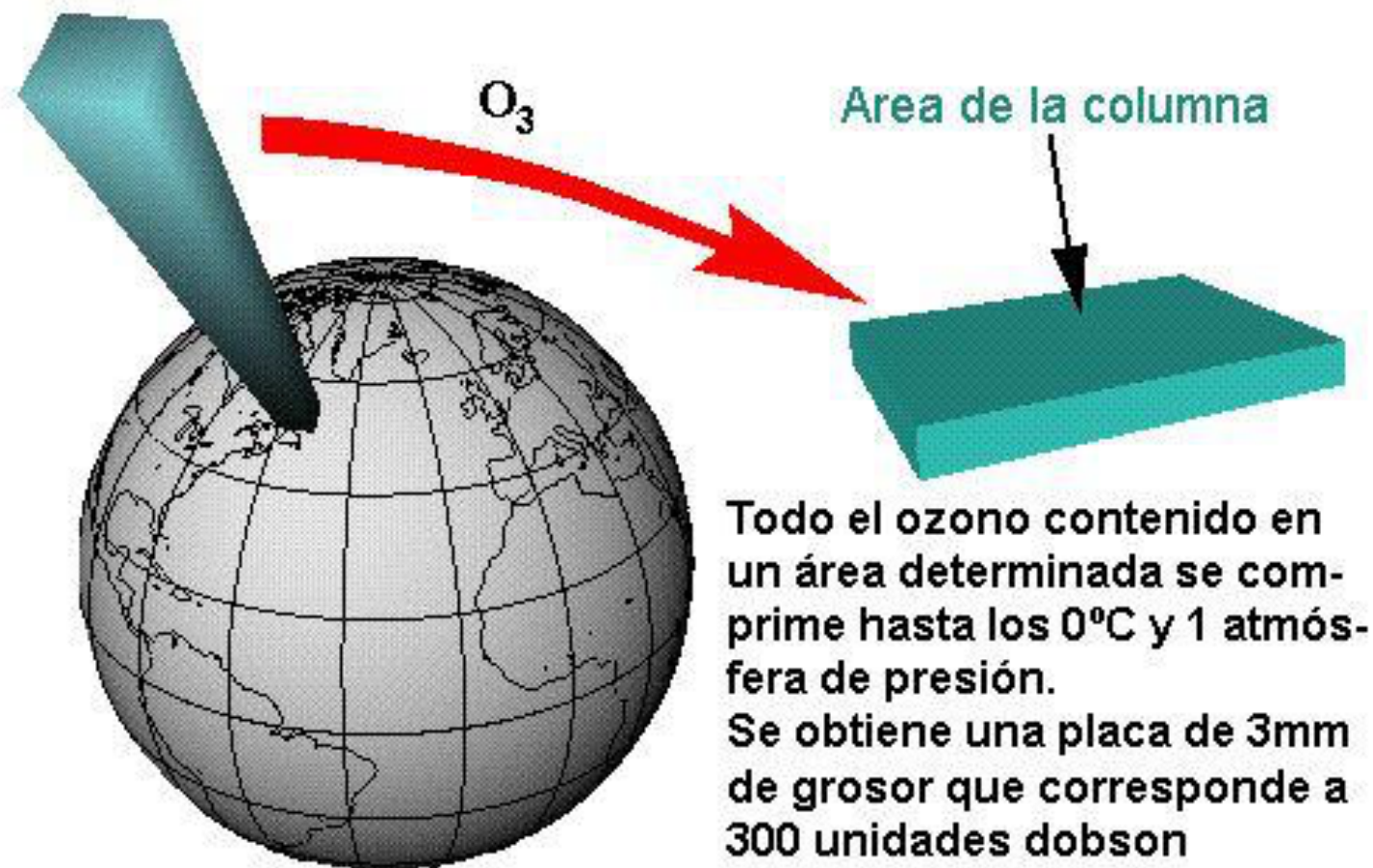
Halones



Unidades dobson

¿Capa de ozono?

El nivel de ozono en la atmósfera se mide en Unidades Dobson (UD). Si 300 UD de ozono fueran traídas a las condiciones de presión y temperatura de la superficie de la Tierra formarían una capa de 3 mm de espesor.



Unidades dobson

¿Capa de ozono?

Estudiando los meteoritos notó que el perfil de temperaturas de la troposfera no era constante, como antes se creía (de ahí el nombre de estratosfera). De hecho, demostró, una región donde la temperatura bruscamente se elevaba. Esto, como él propuso, pasaba porque la radiación UV calentaba el ozono, en la que se ha conocido como la capa de ozono.



GMB Dobson (1889–1976)

En su honor se nombró la unidad Dobson (DU) es la relación estándar de expresar la concentración de una columna de ozono en la atmósfera, específicamente.

Unidades dobson

¿Capa de ozono?

Promedio Global
300 UD = 3 mm



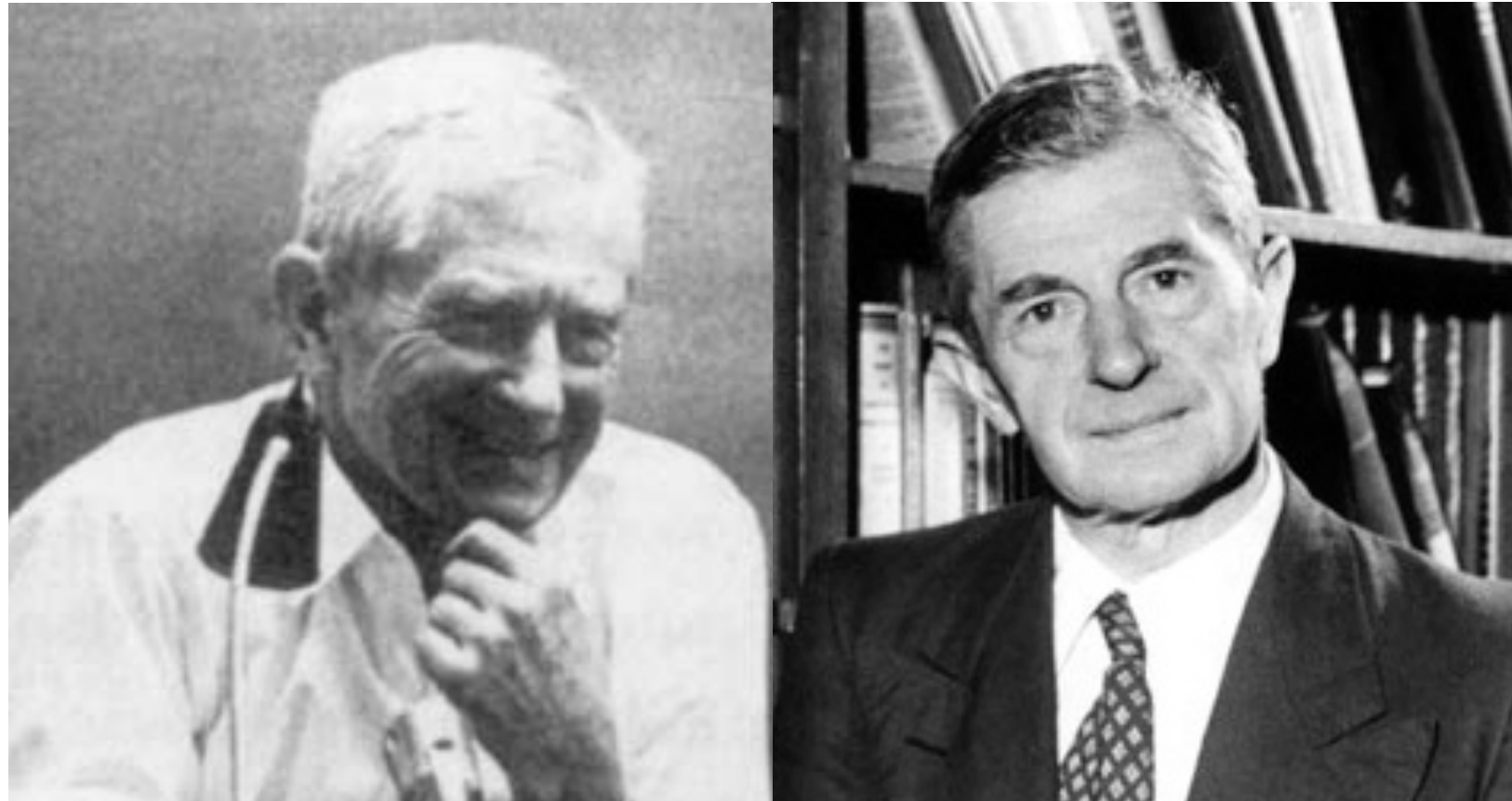
2

Proceso de formación y destrucción



cca Centro de
Ciencias Ambientales

Química del Ozono Estratosférico



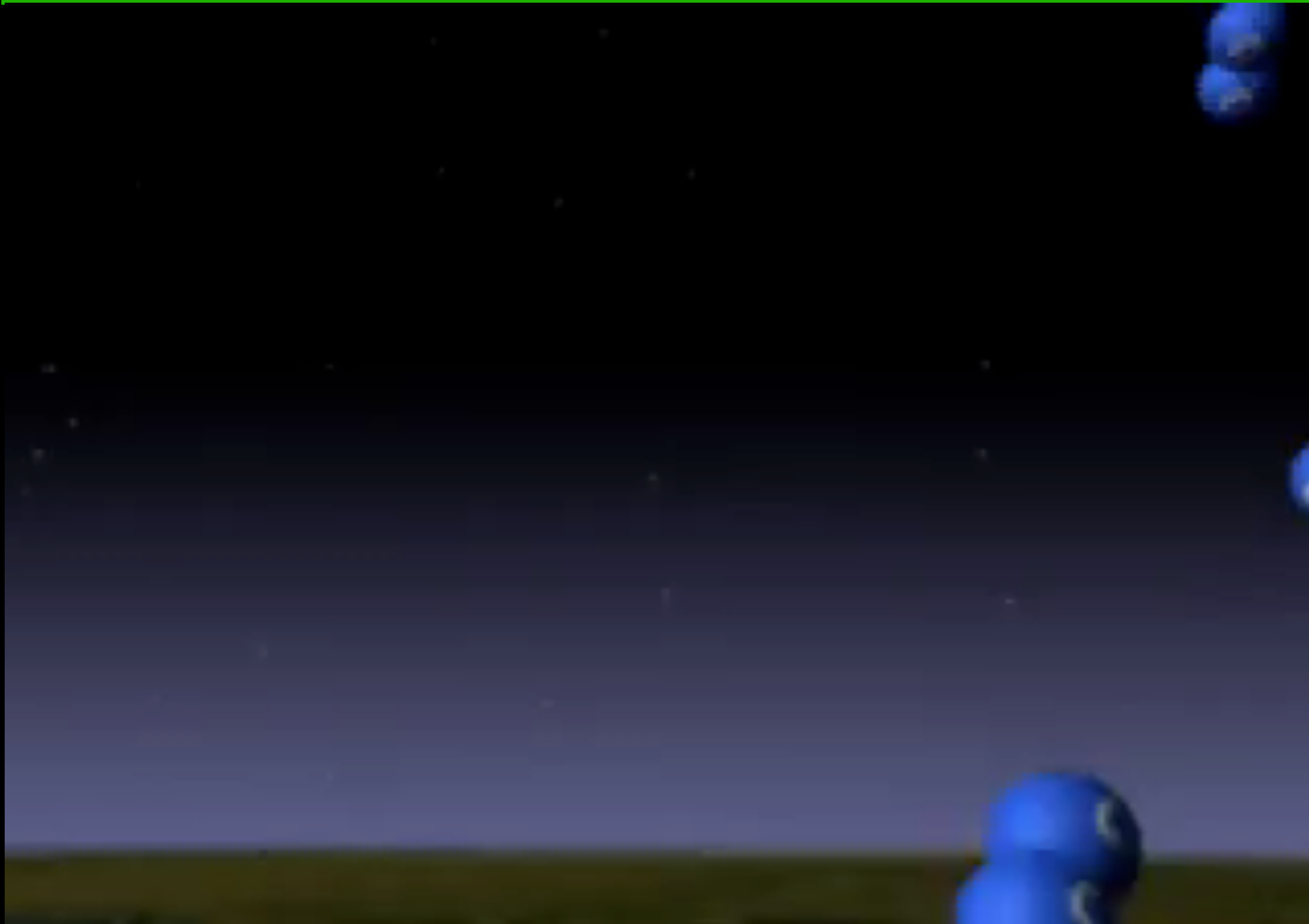
Sydney Chapman (1888-1970)

La teoría del origen de la capa de ozono fue propuesta, por el científico inglés, ***Sydney Chapman*** en 1930.

Química del Ozono Estratosférico

Ciclo de Chapman

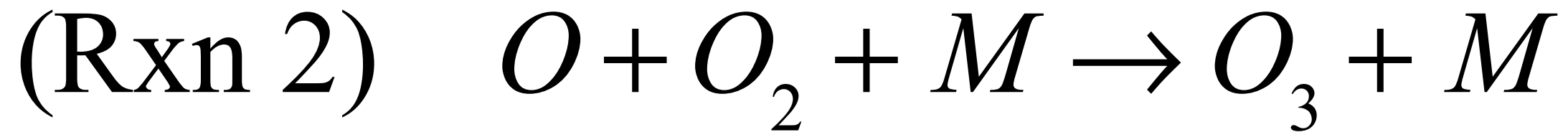
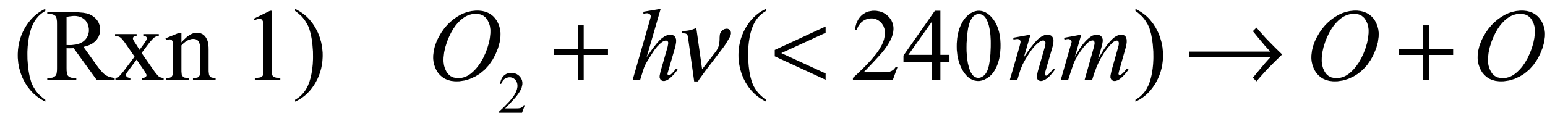
Formación



Química del Ozono Estratosférico

Ciclo de Chapman

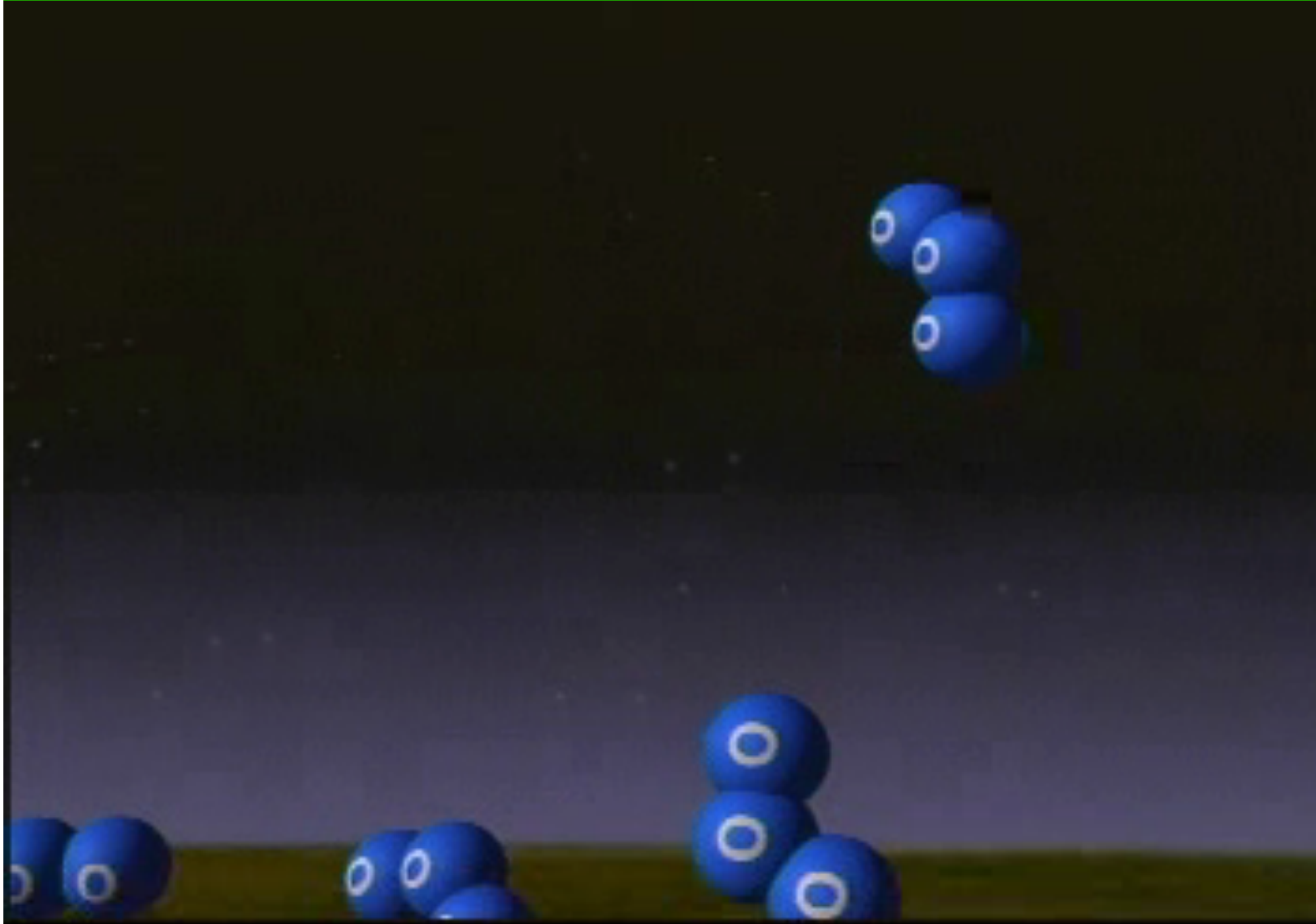
Formación



Química del Ozono Estratosférico

Ciclo de Chapman

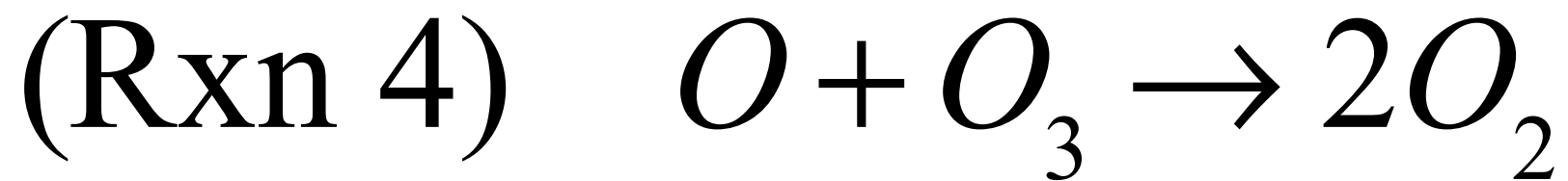
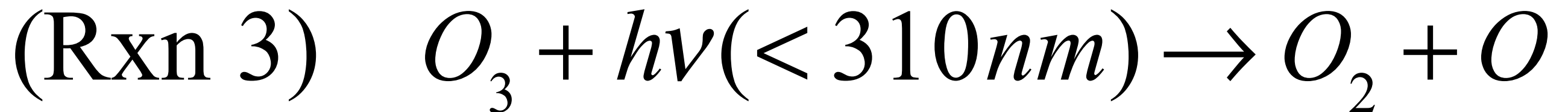
Destrucción



Química del Ozono Estratosférico

Ciclo de Chapman

Destrucción



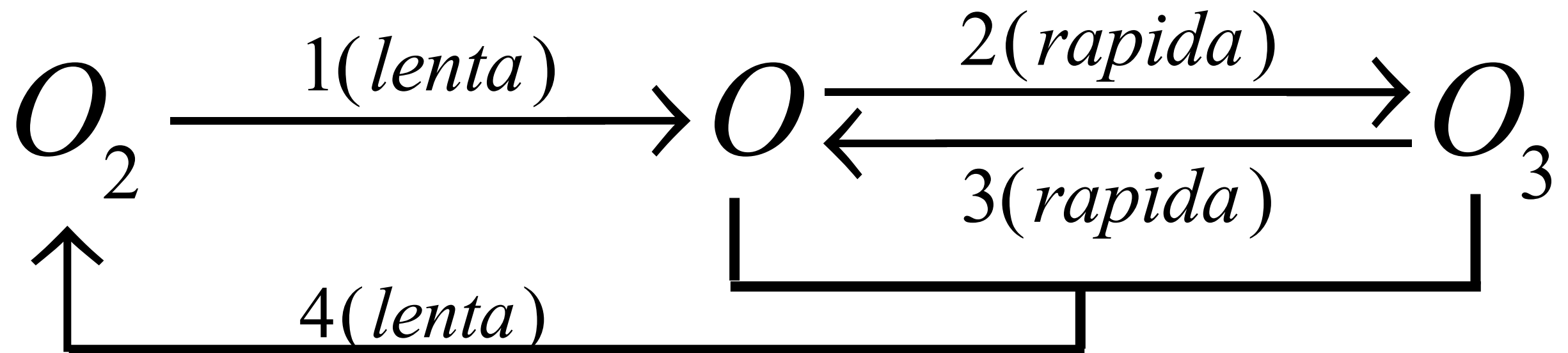
Química del Ozono Estratosférico

Ciclo de Chapman

Reacción		Velocidad
(Rxn 1)	$O_2 + h\nu(< 240nm) \rightarrow O + O$	Lenta
(Rxn 2)	$O + O_2 + M \rightarrow O_3 + M$	Rapida
(Rxn 3)	$O_3 + h\nu(< 310nm) \rightarrow O_2 + O$	Rapida
(Rxn 4)	$O + O_3 \rightarrow 2O_2$	Lenta

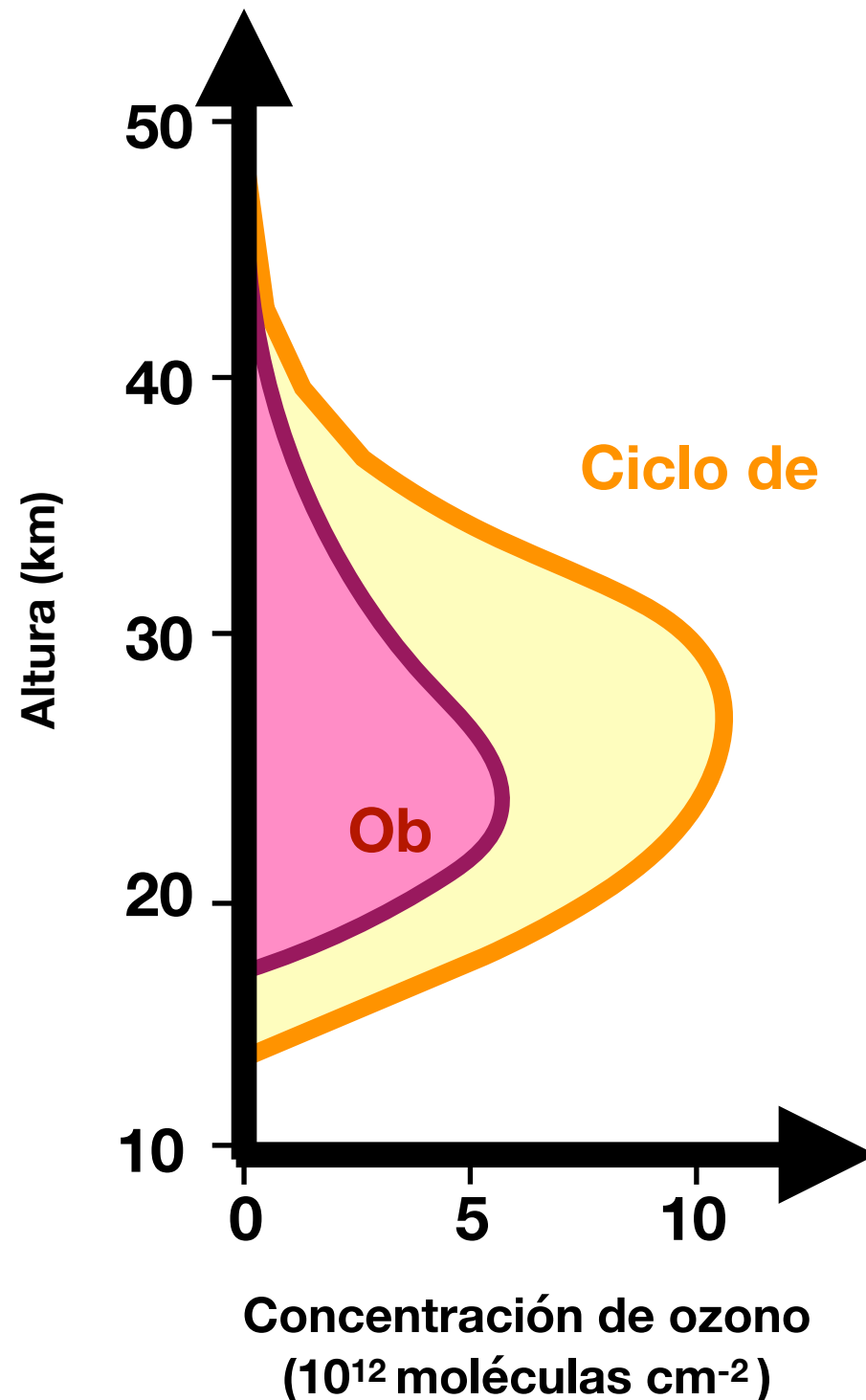
Química del Ozono Estratosférico

Ciclo de Chapman



Química del Ozono Estratosférico

Ciclo de Chapman



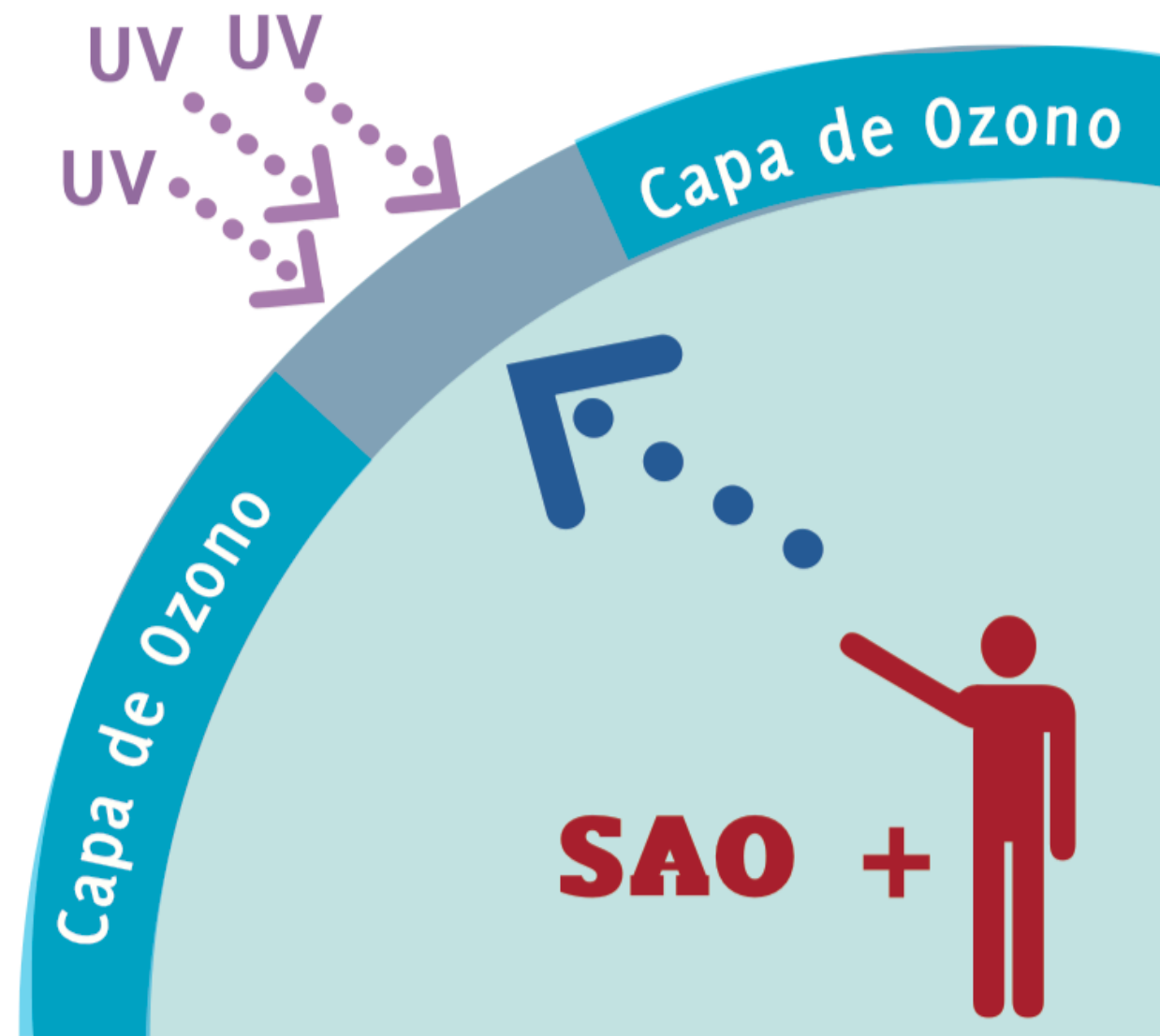
El *ciclo de chapman* da cuenta del **perfil vertical del ozono**, pero *NO* de los valores de concentración de Ozono.

No solo las reacciones que hemos revisado **en el ciclo de Chapman** son responsables de la producción y destrucción del Ozono

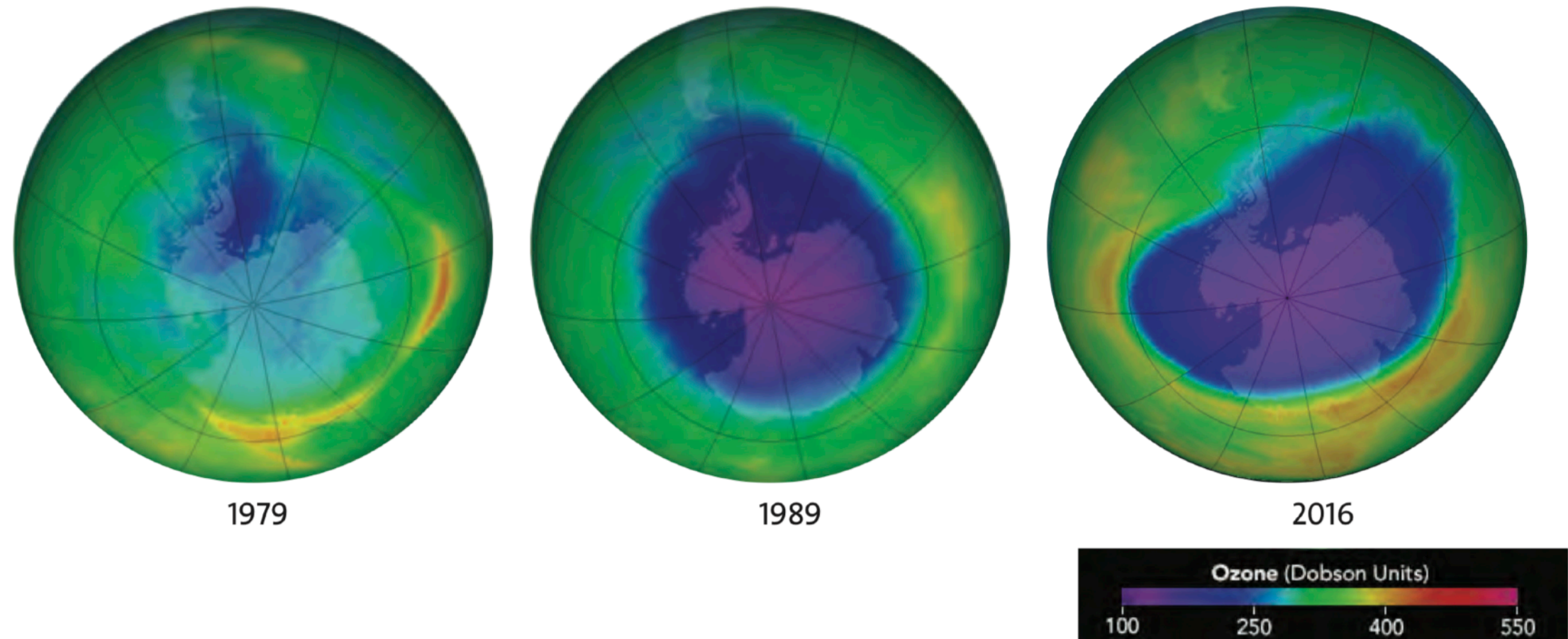
¿Cuándo se reconoció por primera vez el problema del agotamiento de la capa de ozono?

1974

Los científicos descubrieron que los clorofluorocarbonos (CFC) o, más genéricamente, las sustancias agotadoras de ozono (SAO) estaban destruyendo el ozono en la estratosfera.



¿Cuándo se reconoció por primera vez el problema del agotamiento de la capa de ozono?



Se observa un adelgazamiento de la capa de ozono sobre la Antártida, y la gente comenzó a describir este fenómeno como un "agujero de ozono".

1980
A principios de la década



PREMIO NOBEL EN QUÍMICA 1995

La importancia de Química Atmosférica del ozono
ha sido reconocida otorgando el Premio Nobel en Química 1995



P. Crutzen (1933-)



M. Molina (1943-)



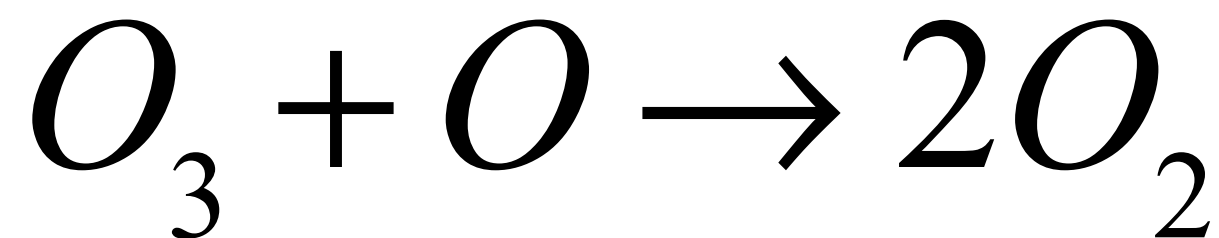
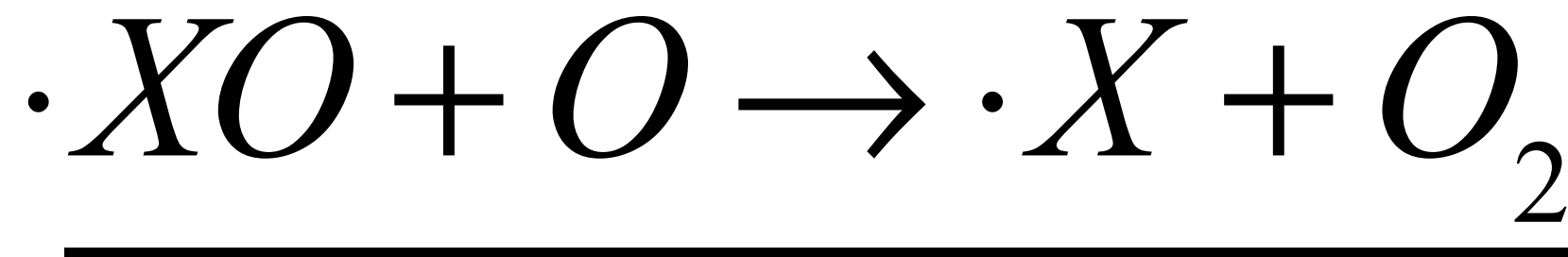
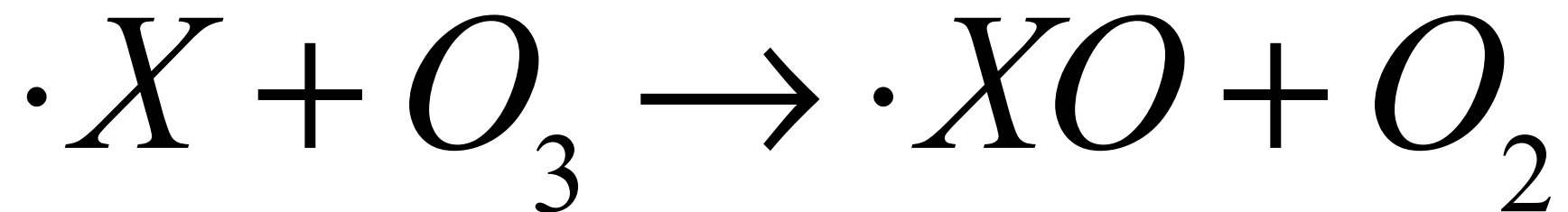
F. S. Rowland (1927-2012)

Nivel de
Ozono



Química del Ozono Estratosférico

Destrucción catalítica

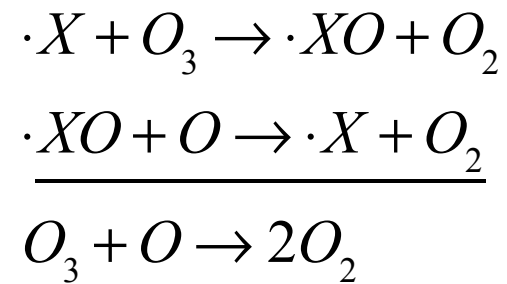
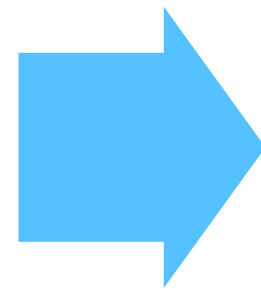
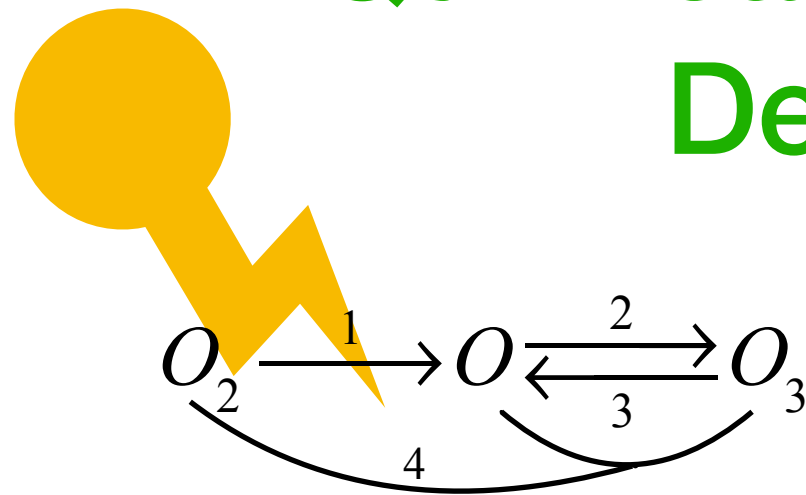


X es regenerado en el proceso.

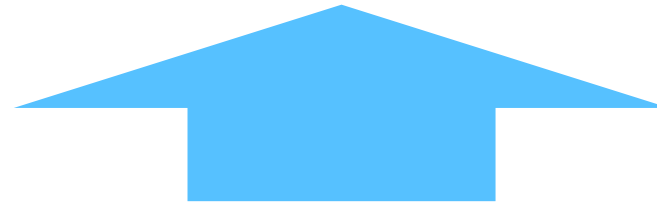
La reacción en cadena continúa hasta que X es removido por alguna reacción lateral.

Química del Ozono Estratosférico

Destrucción catalítica



reacciones
catalíticas



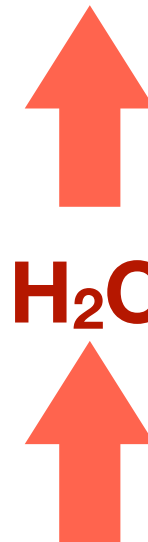
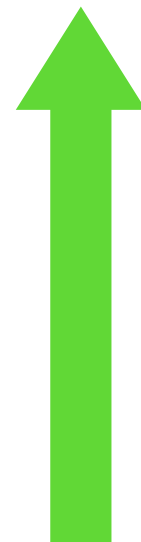
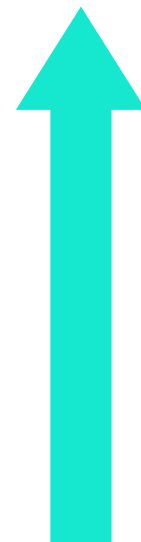
Sustancias de tiempo de vida largo, emitidas en la troposfera y que son transportada a la estratosfera

NO_x

ClO_x

HO_x

BrO_x



N_2O

CFCs

CH_4

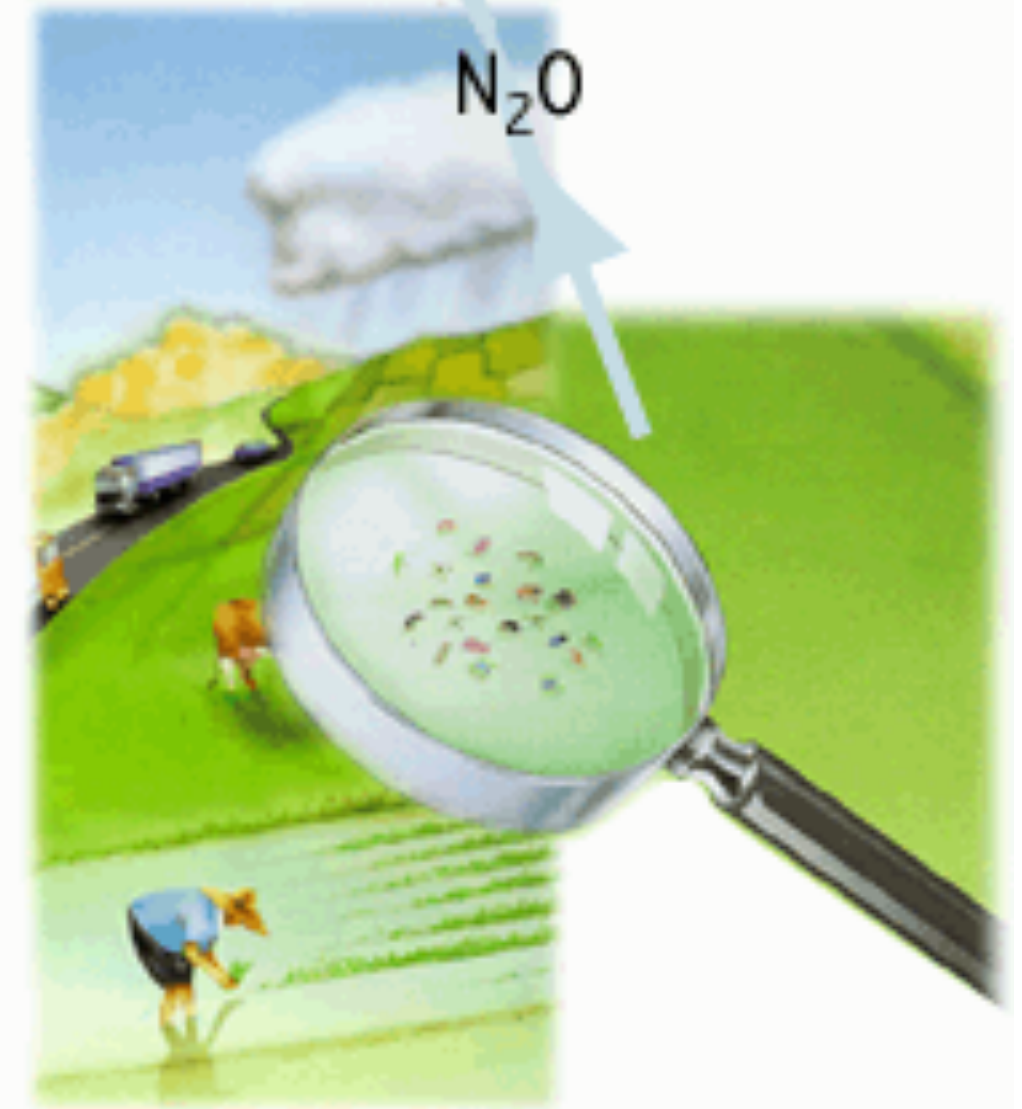
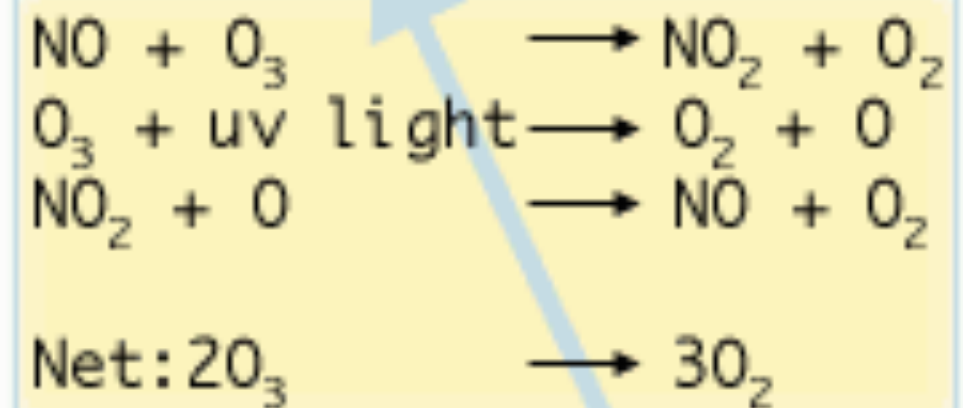
Halones
 $BrCH_3$



Química del Ozono Estratosférico

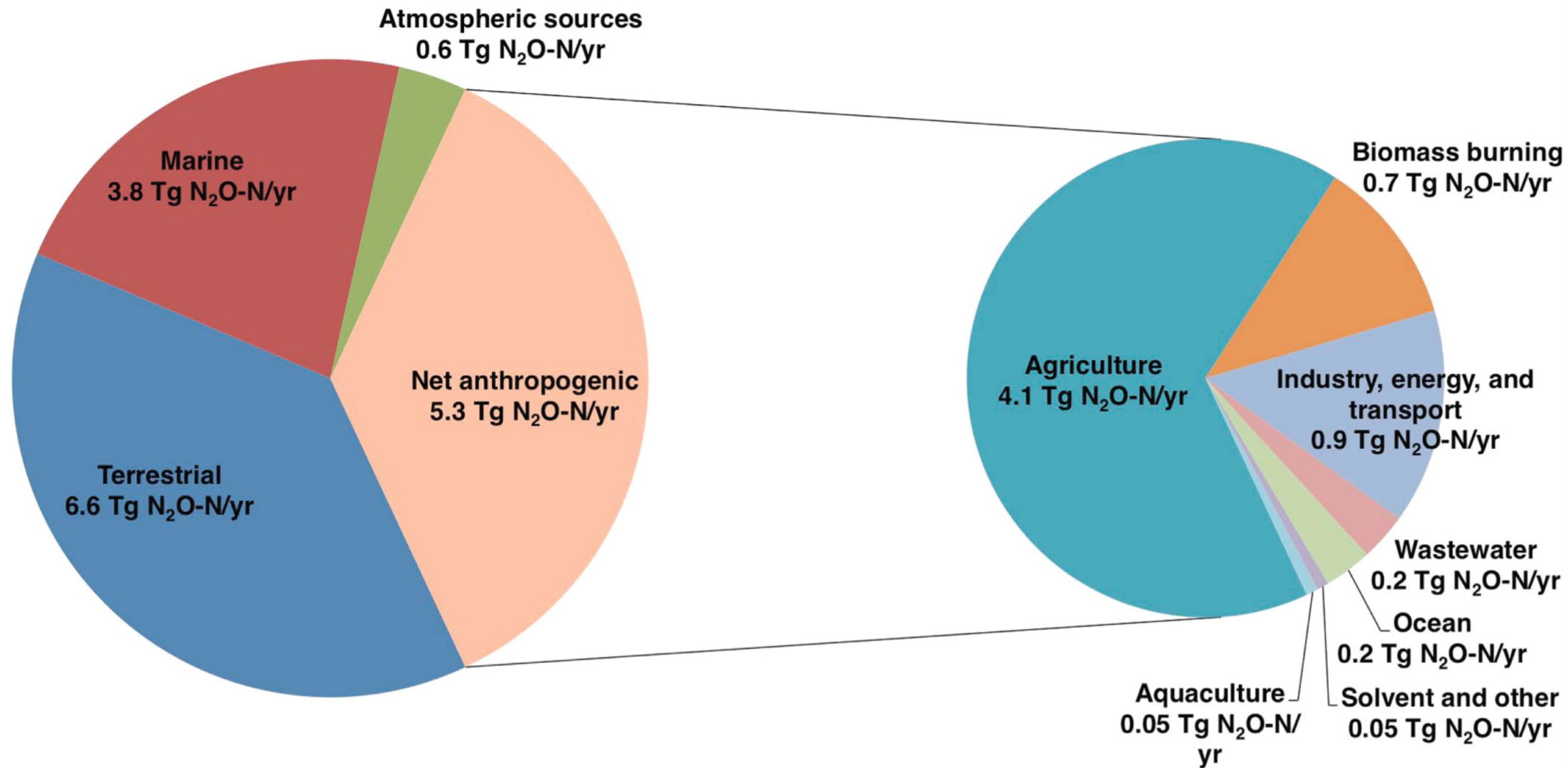
Destrucción catalítica (NOx)

En 1970, Paul Crutzen demostró que los NOx reaccionan catalíticamente con ozono, así se acelera el índice de reducción del contenido del ozono.



Química del Ozono Estratosférico

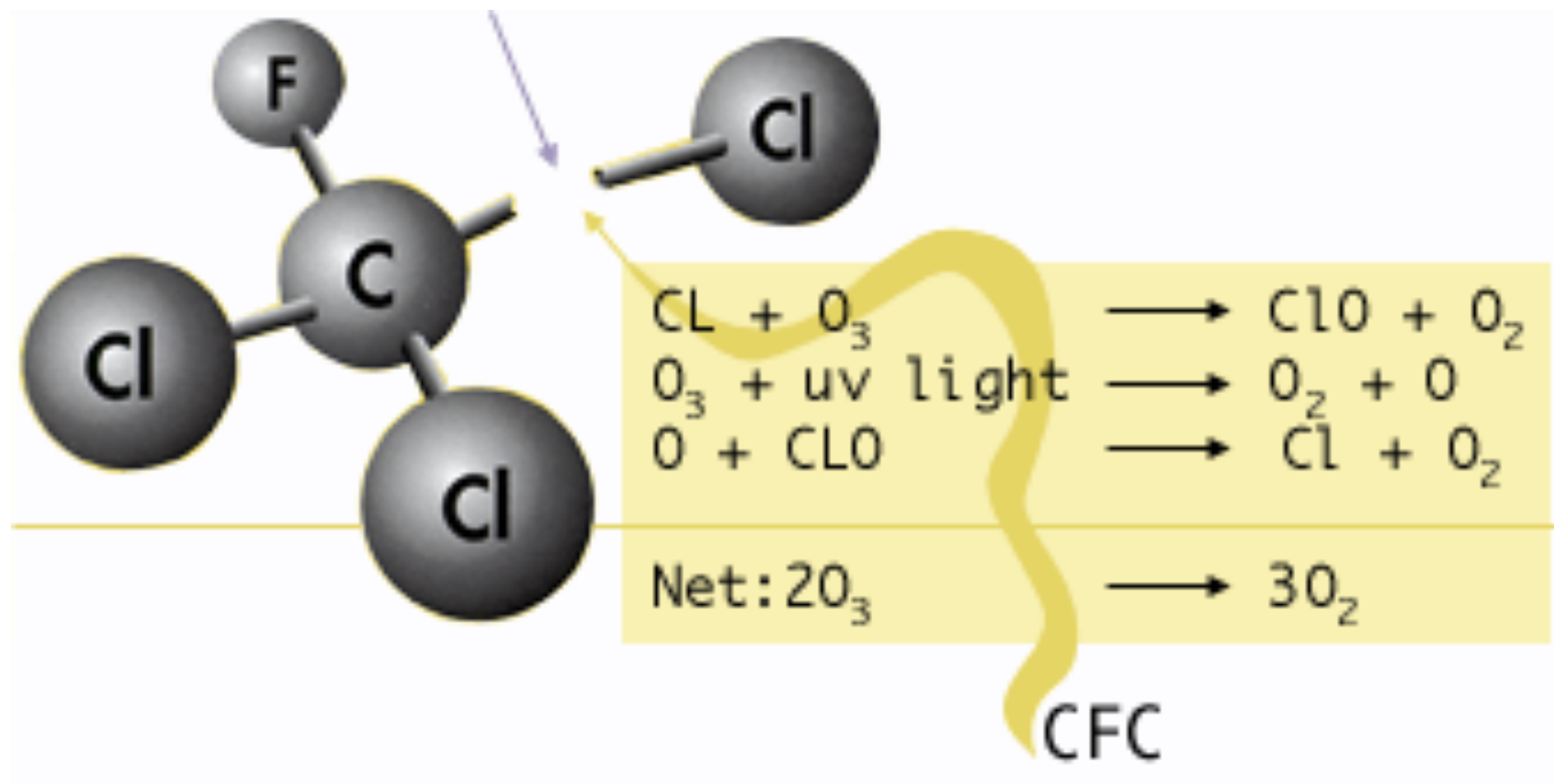
Destrucción catalítica (NO_x)



Química del Ozono Estratosférico

Destrucción catalítica (CFCs)

En 1974, Molina y Rowland propusieron que los CFCs, compuesto químicamente inerte, producían una disminución en la capa de ozono



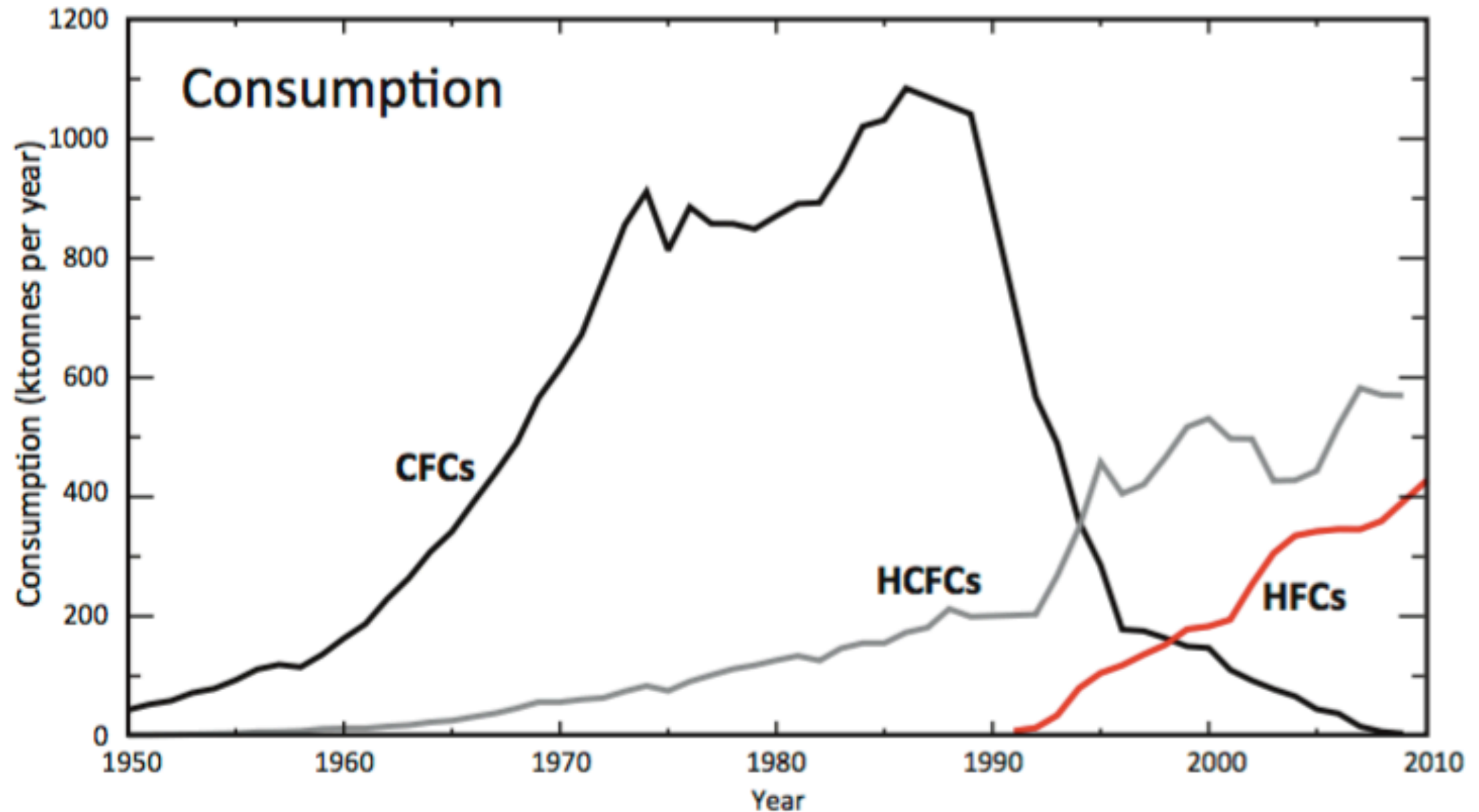
Química del Ozono Estratosférico

Destrucción catalítica (CFCs)



Química del Ozono Estratosférico

Destrucción catalítica (CFCs)



3

Agujero de ozono



cca Centro de
Ciencias Ambientales

Joe Farman, el científico que supo ver el agujero en la capa de ozono

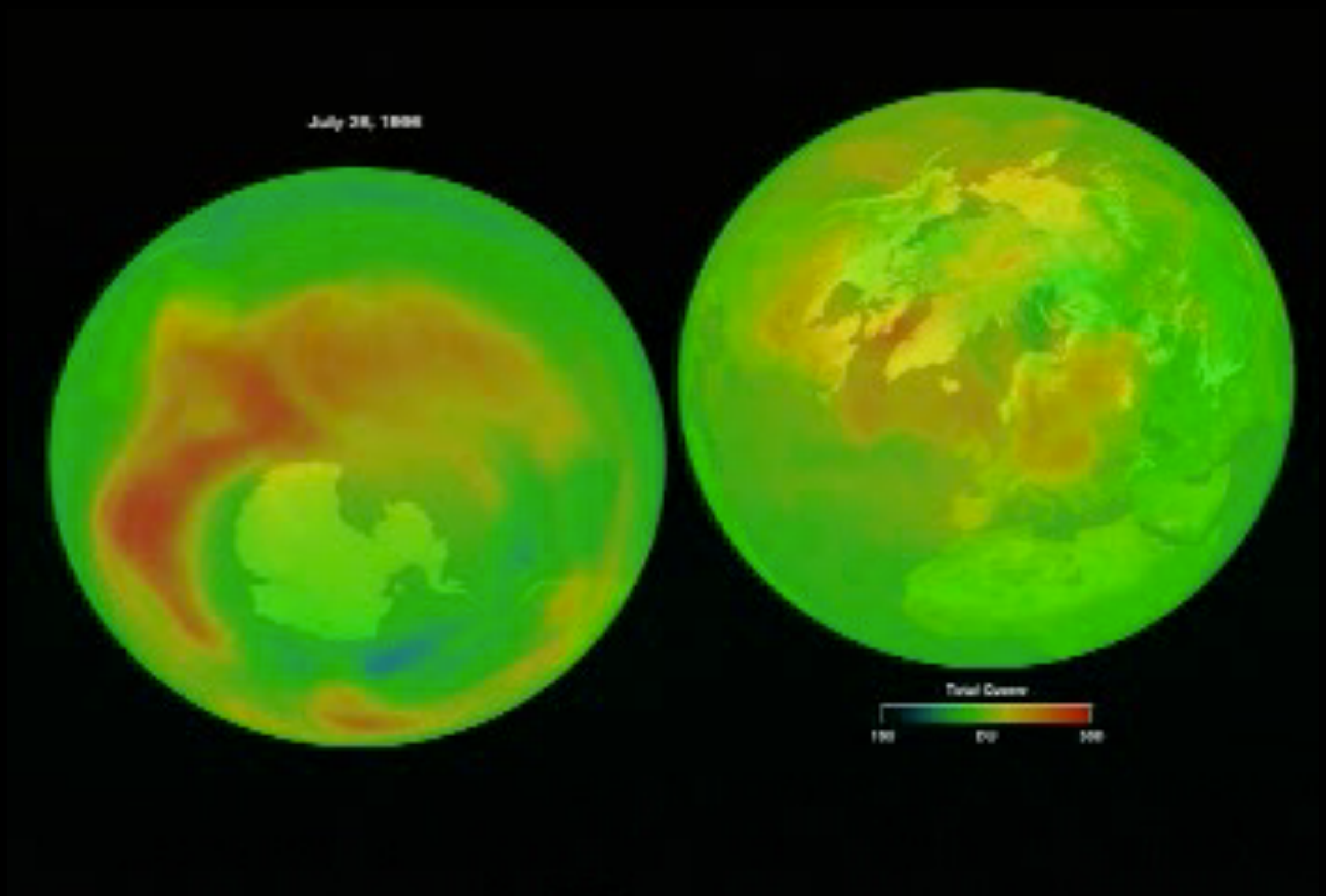
- En 1985, Joe Farman **describió una pérdida sin precedente del ozono sobre el antártida**. Lo que publico en el artículo: ***Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClOx/NOx interaction; Nature, 207(315) 1985***



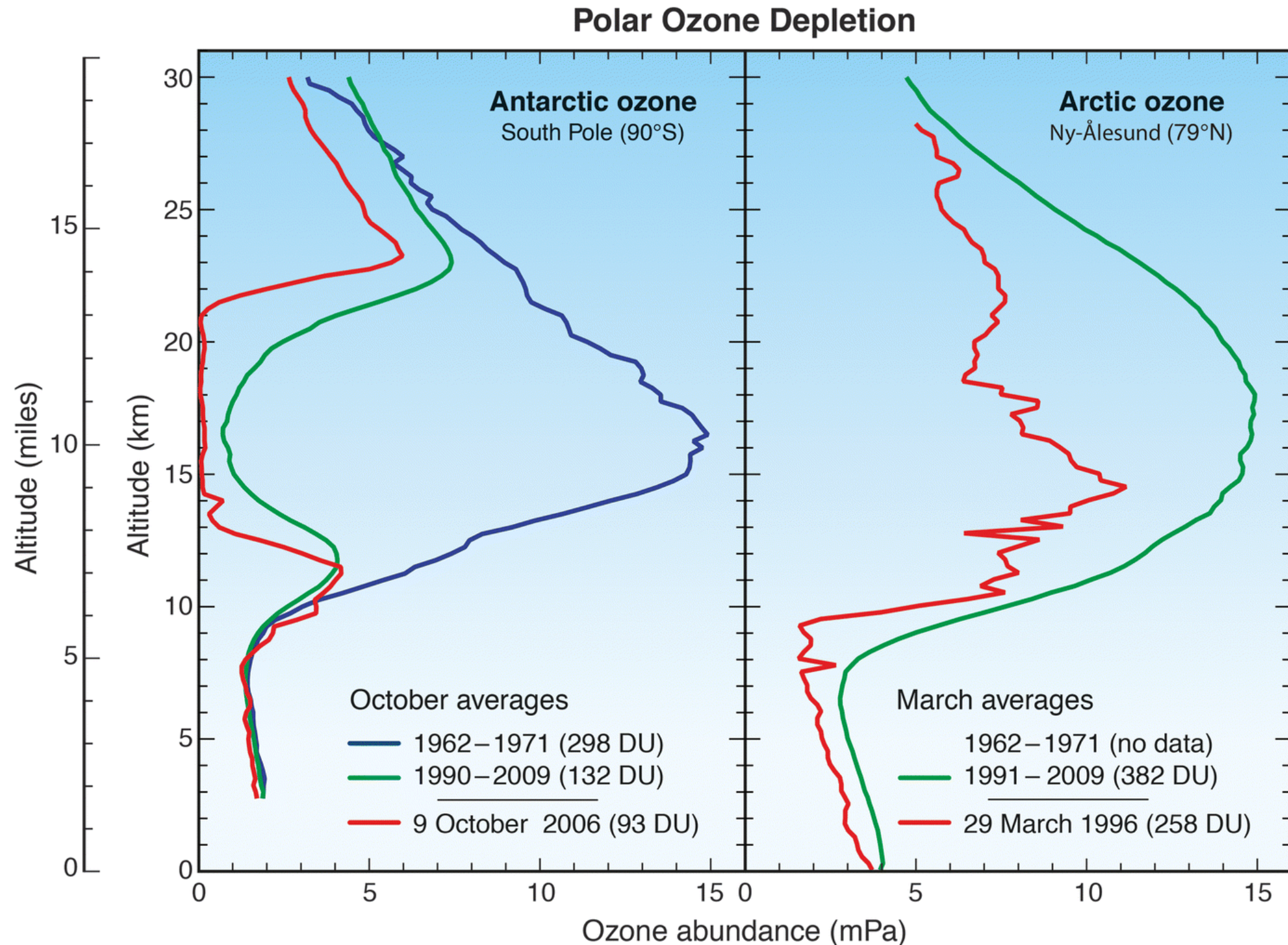
Joe Farman (1930-2013)

- Por más de una década se observó una pronunciada disminución en el ozono total durante el mes de octubre de cada año, lo cual corresponde a la salida del sol luego de la larga noche polar.
- Aunque similar, pero menos dramático, resulta ser el fenómeno sobre el ártico.

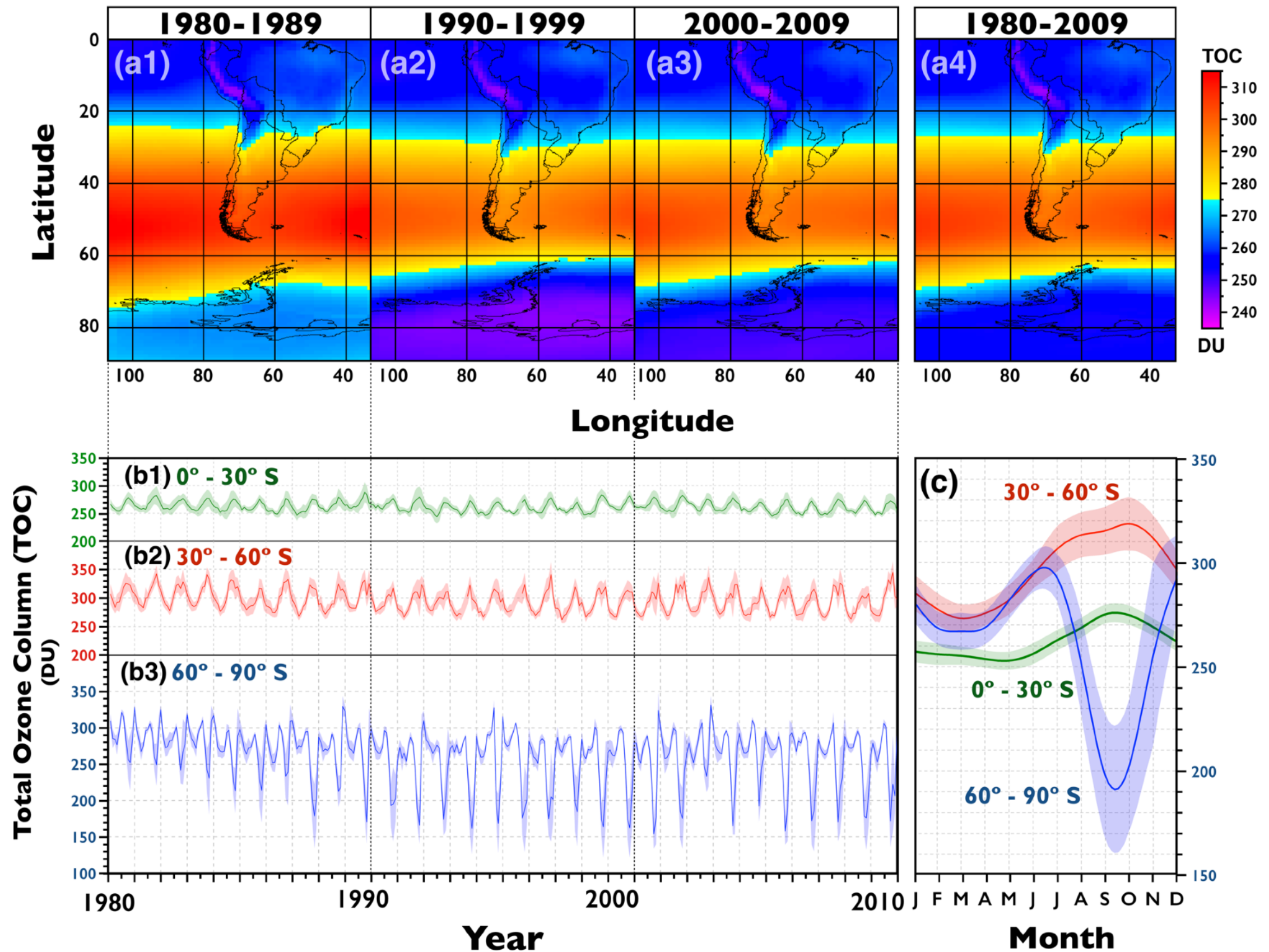
Dinámica del agujero de ozono



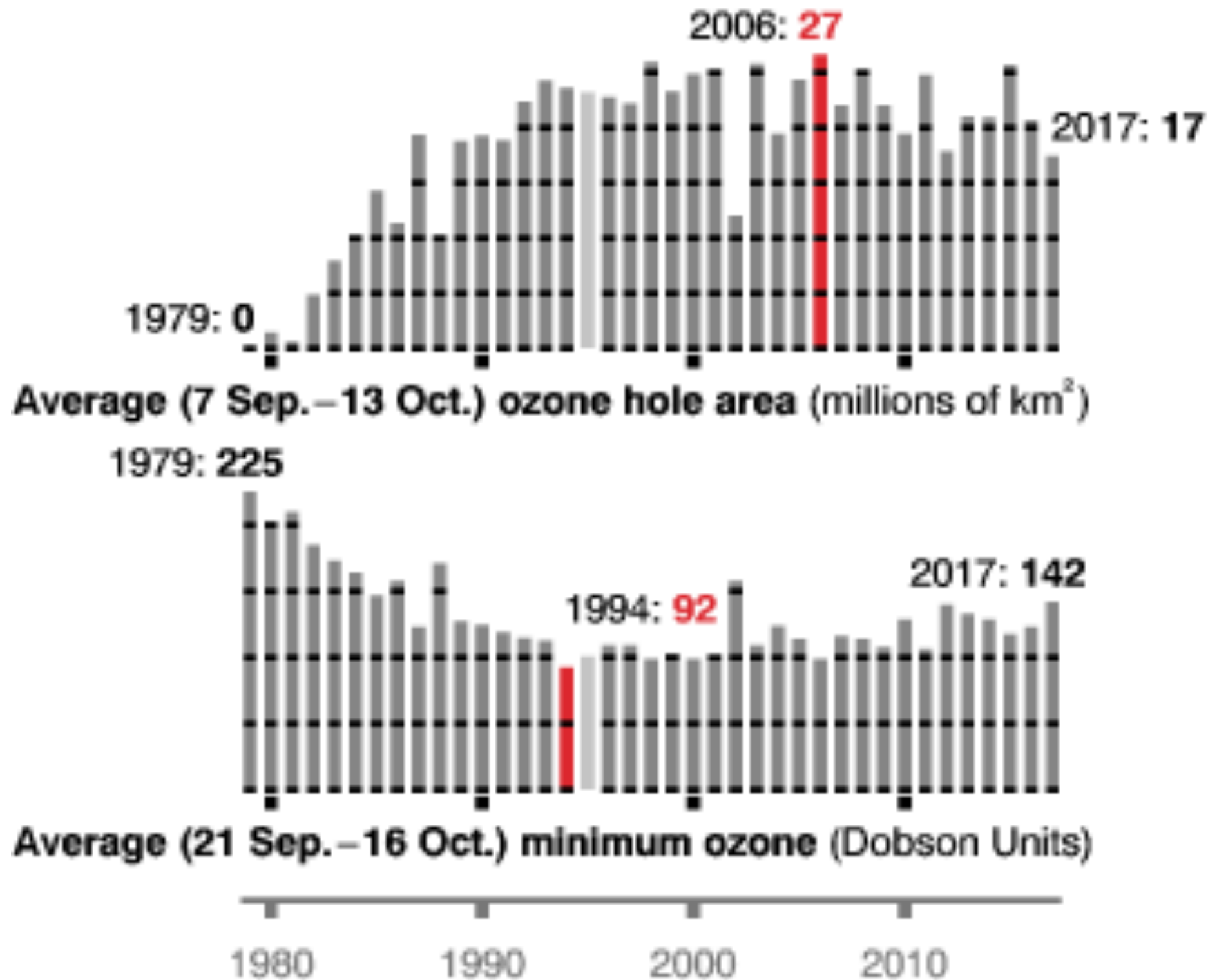
Dinámica del agujero de ozono



Dinámica del agujero de ozono



Dinámica del agujero de ozono



Note: No data were acquired during the 1995 season

Dinámica del agujero de ozono

A pesar de la extensa investigación realizada sobre química del ozono en décadas pasadas este descubrimiento, la pérdida polar del ozono, resultó ser completa sorpresa, y el mecanismo no era había sido anticipado en ningún experimento teórico o de laboratorio.



Dinámica del agujero de ozono

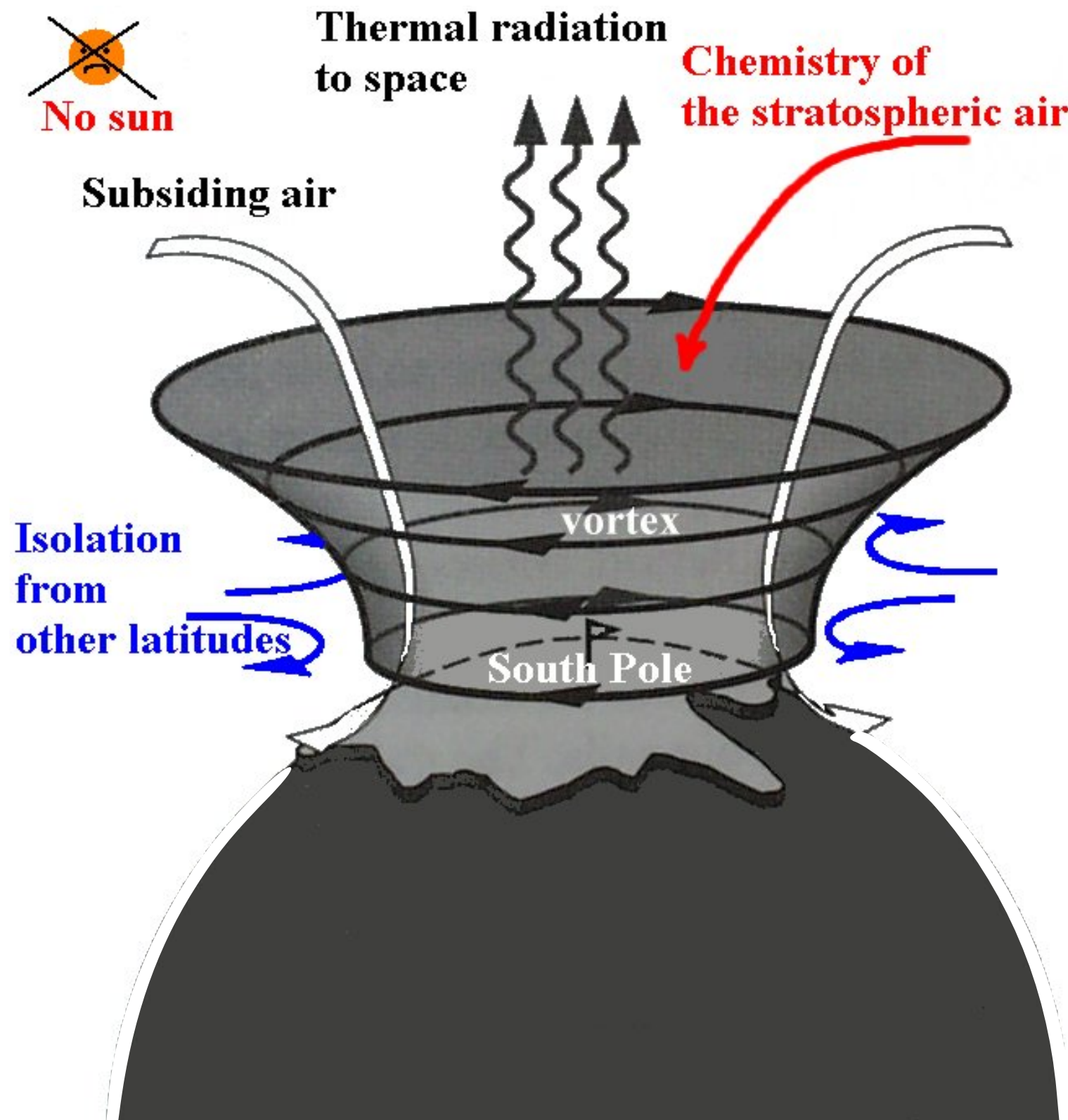
Factores Físicos

"Polar Vortex"

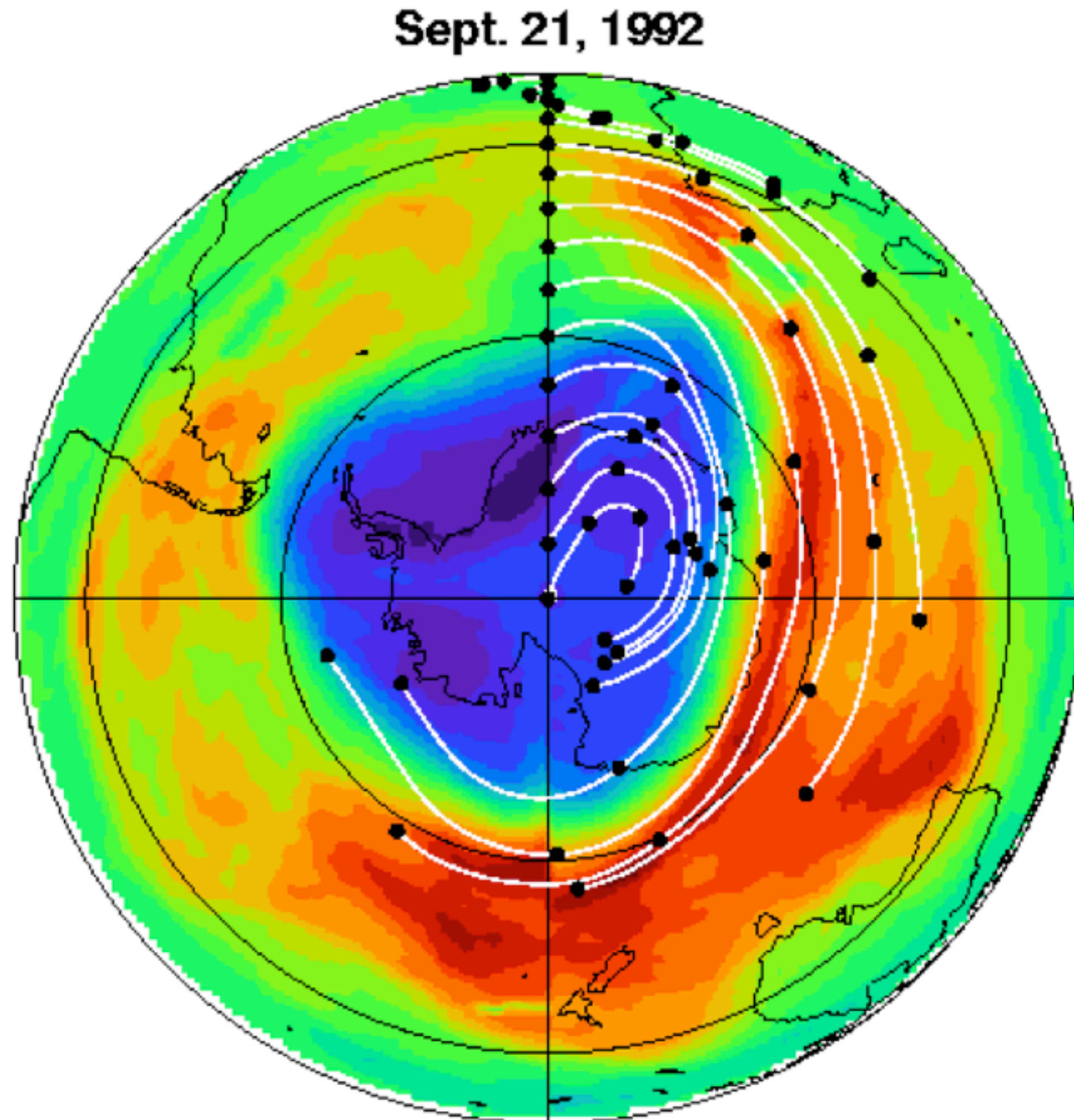
Invierno polar (antártida), zona muy estable de temperaturas muy frías

Temperatura de la estratosfera, normalmente (-50 °C), antártida (-80 °C).

Gigantesca "Vasija de reacción" aislada del resto, que se rompe en primavera

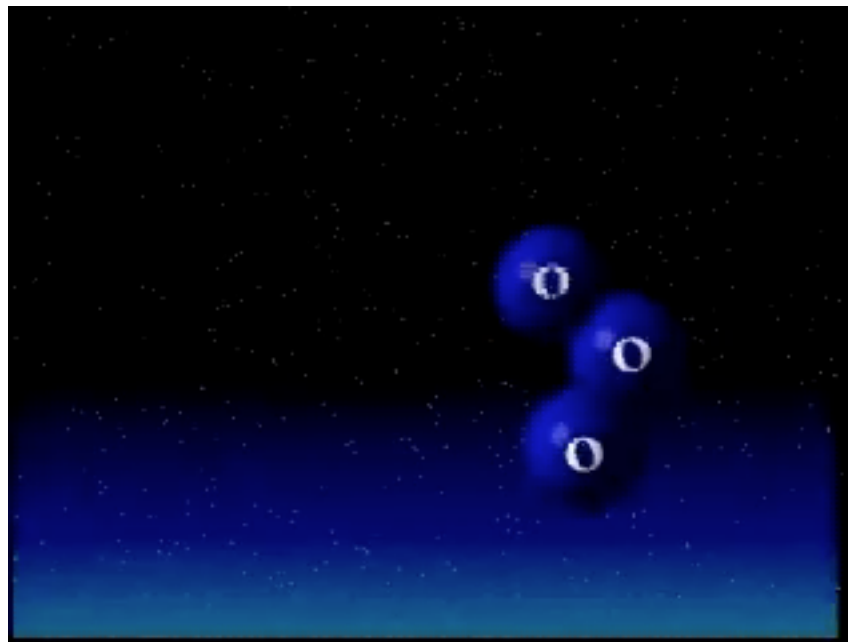
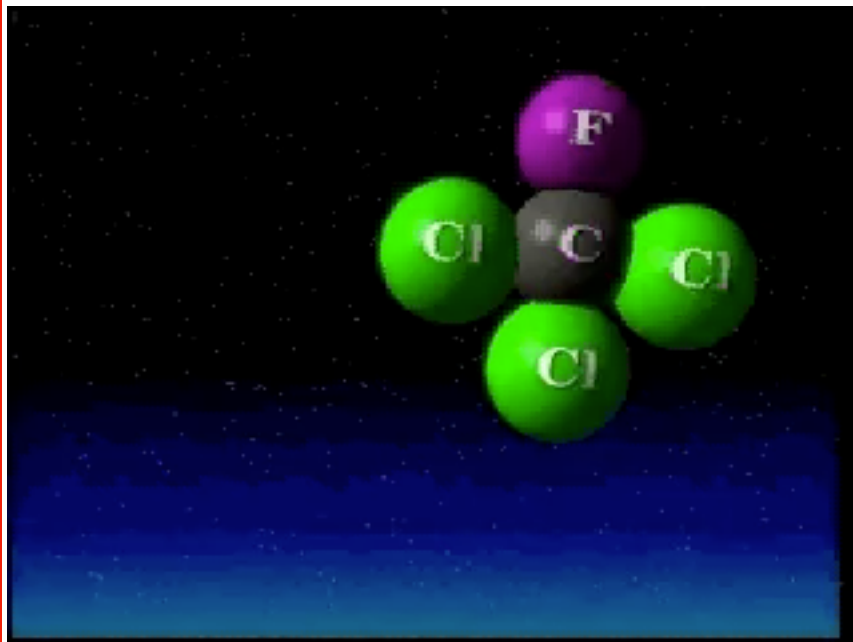
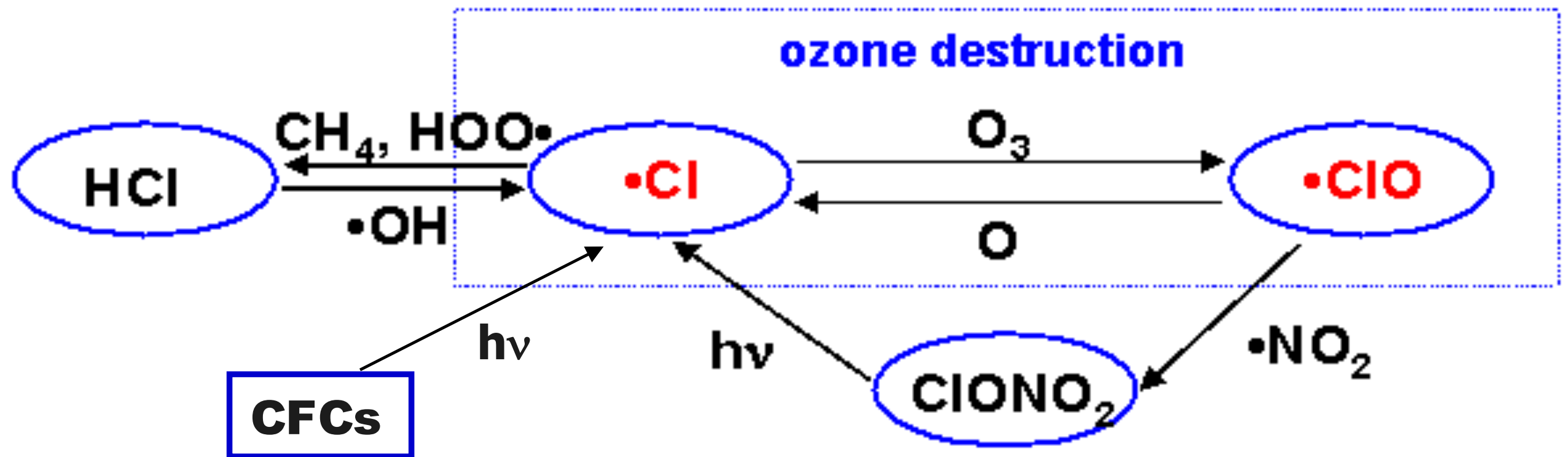


Dinámica del agujero de ozono



Las trayectorias (de 4 días) fuera de la zona azul no son incorporadas

Dinámica del agujero de ozono



¿Debido a que las concentraciones de ClO son altas en la antartica?

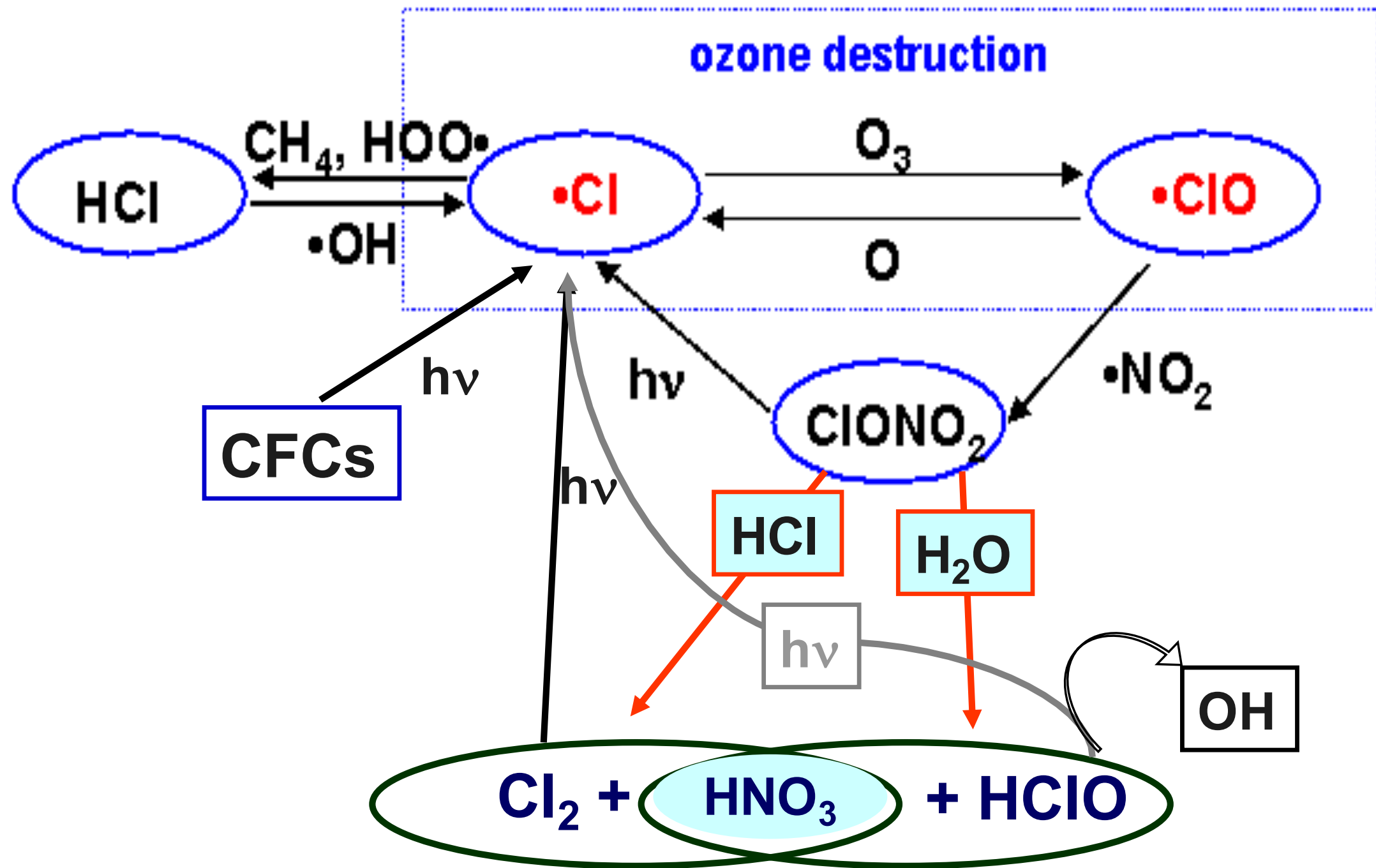
Afines de los 90s que se demostró el critico rol que desempeñan las reacciones que ocurren en los aerosoles estratosfericos y a baja temp.

En la antártica la temperaturas en invierno son lo suficientemente bajas para permitir la formación de partículas de hielo en las nubes llamadas nubes polares estratosferas o PSCs.

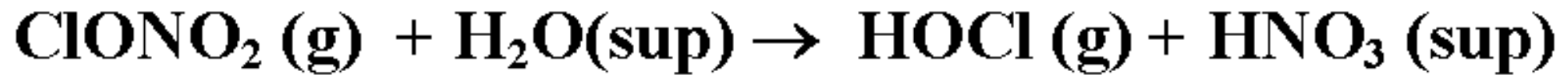


Las PSCs proveen superficie para la conversion de ClOx en reservorios de HCl y ClONO₂ a Cl₂

Dinámica del agujero de ozono

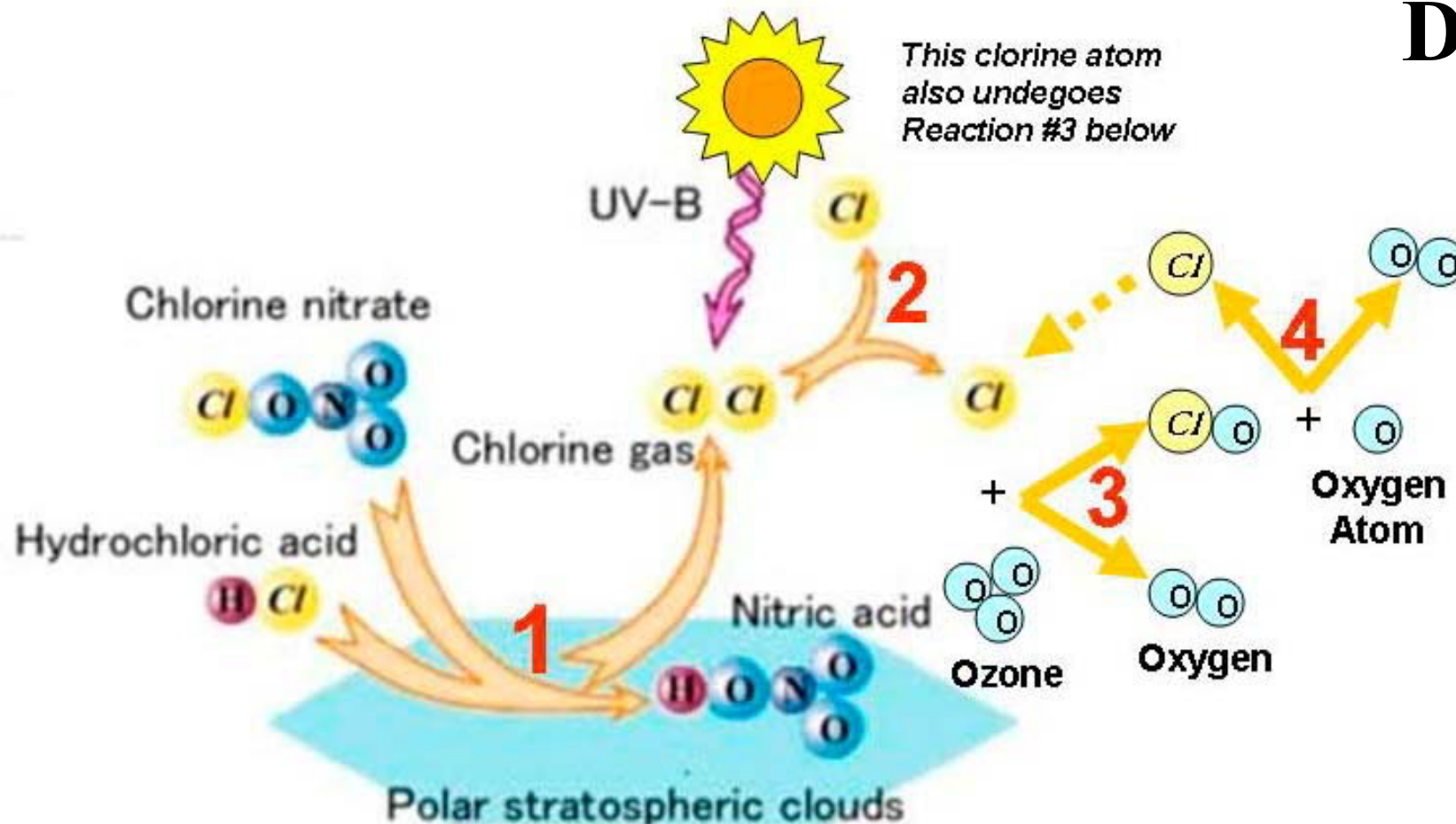
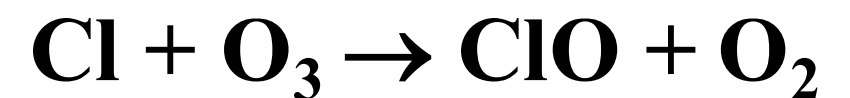
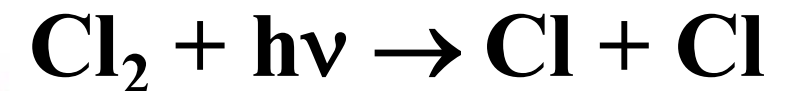


Dinámica del agujero de ozono

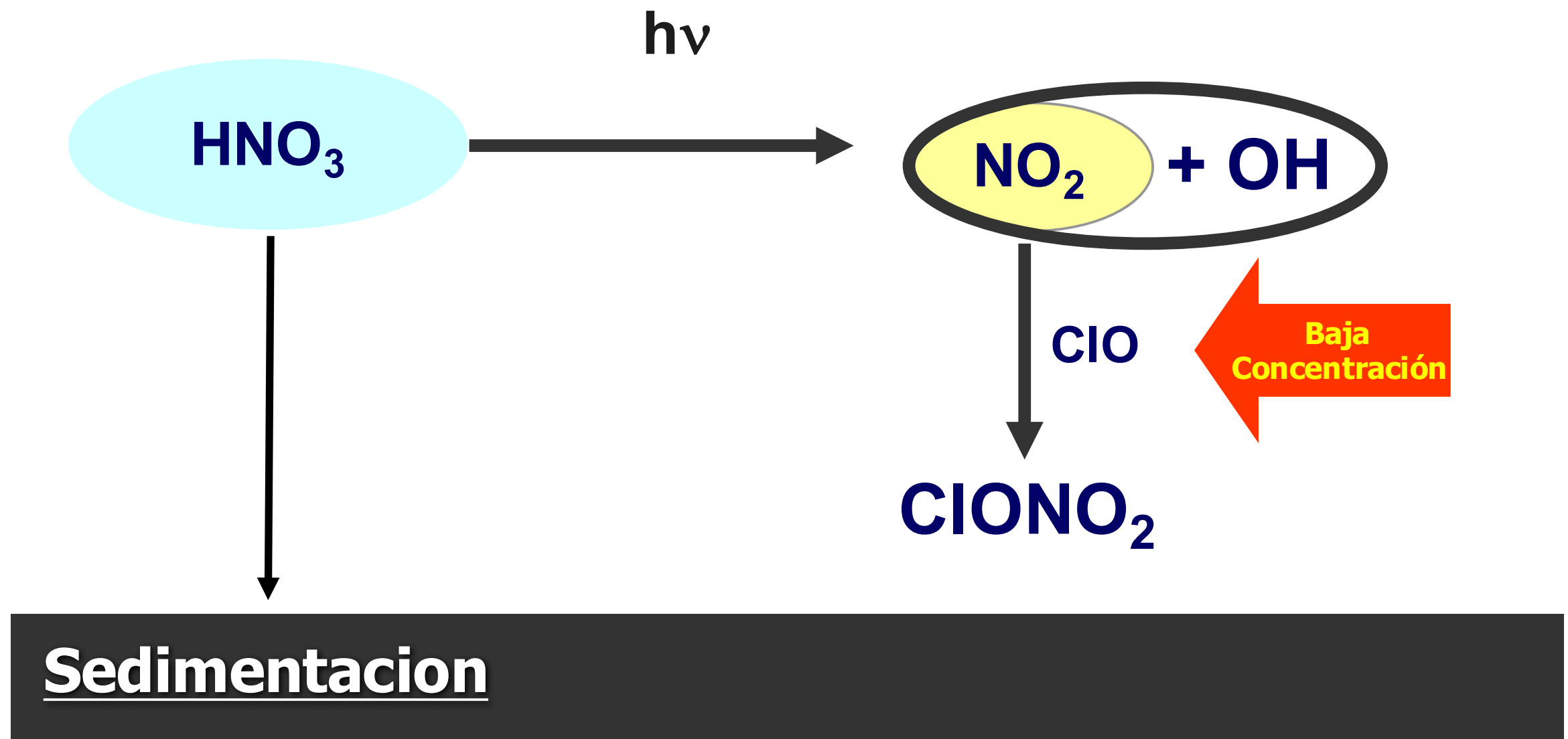


Libera Cl a la fase gas y retiene N. El Cl_2 y HOCl se fotolizan muy rápidamente

Destrucción de ozono



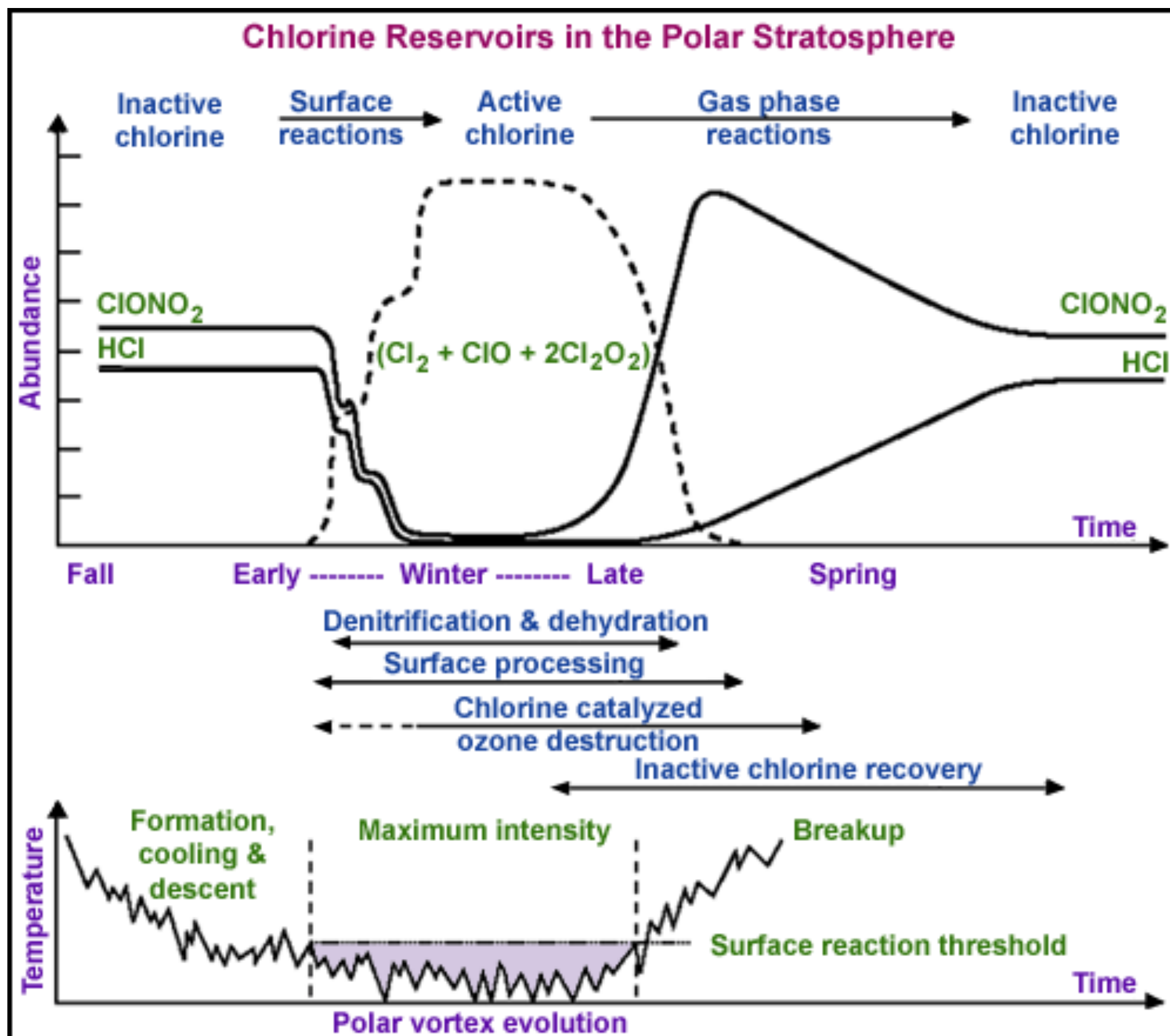
Dinámica del agujero de ozono



Dinámica del agujero de ozono



Dinámica del agujero de ozono



“Ingredientes” para la formación del agujero de ozono

1.- Un vortice polar, para “atrapar” los CFCs

2.- Nubes polares estratosfericas, en las cuales se producen reacciones heterogeneas

Las reacciones en fase gas resultan desfavorables termodinamicamente.
Con alta E_a y mas aun a baja temperatura resultan ser muy lentas.

3.- Un aumento de intensidad de luz solar, para fotolizar especies claradas



Respuesta internacional. Protocolo de Montreal



cca Centro de
Ciencias Ambientales

Respuesta Internacional:

- Convenio de Viena
- Protocolo de Montreal



Convenio de Viena

- Insta a las Partes a proteger al ambiente y la salud humana de los efectos del adelgazamiento de la capa de ozono
- Provee la participación de los países para cooperar en la investigación, observación e intercambio de información

¿Qué busca?



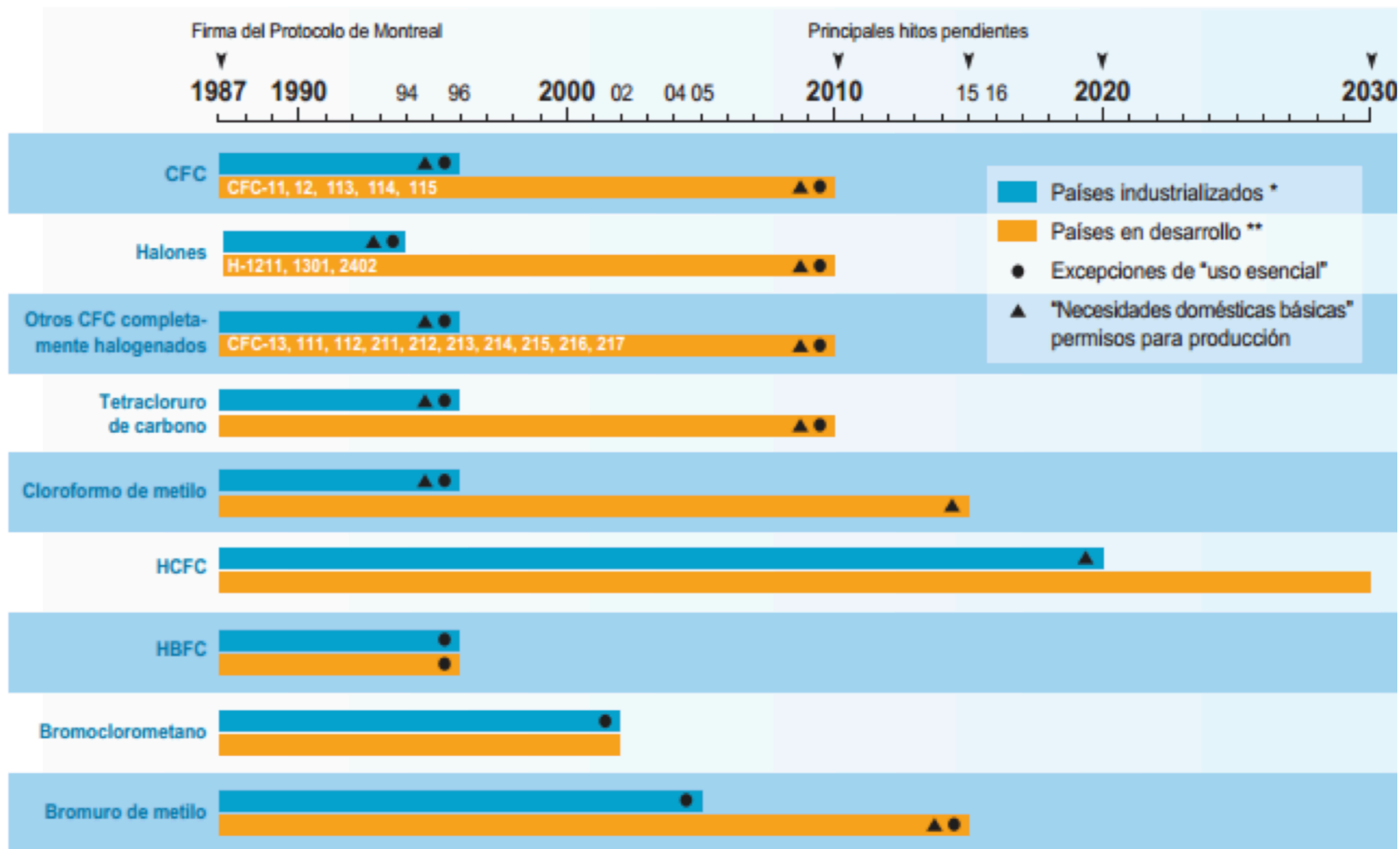
Eliminación de la producción y consumo de las principales sustancias agotadoras de la capa de ozono.

Principales medidas:

- ✓ Establecimiento de cronogramas de eliminación del consumo y producción de las SAO.
- ✓ Restricciones al comercio con estados que no sean partes en el Protocolo.
- ✓ Reconversión de la industria manufacturera que usa SAO.
- ✓ Fortalecimiento de políticas y regulaciones de los países para la implementación del Protocolo de Montreal

FECHAS LIMITE PARA LA PRODUCCIÓN Y CONSUMO DE SUSTANCIAS DESTRUCTORA DE OZONO

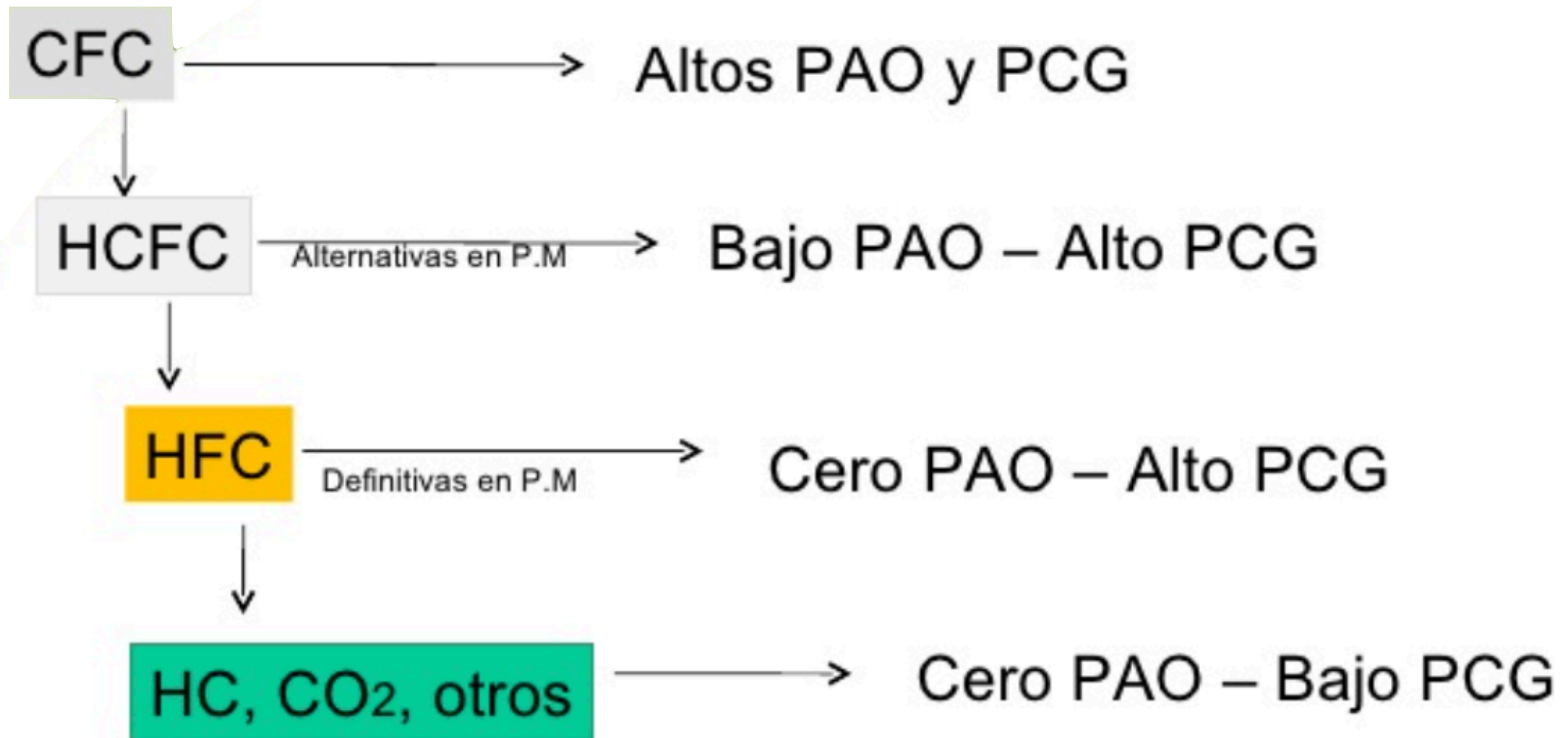
definidas para eliminación en el Protocolo de Montreal



* Países no comprendidos en el Artículo 5; ** Países del Artículo 5.

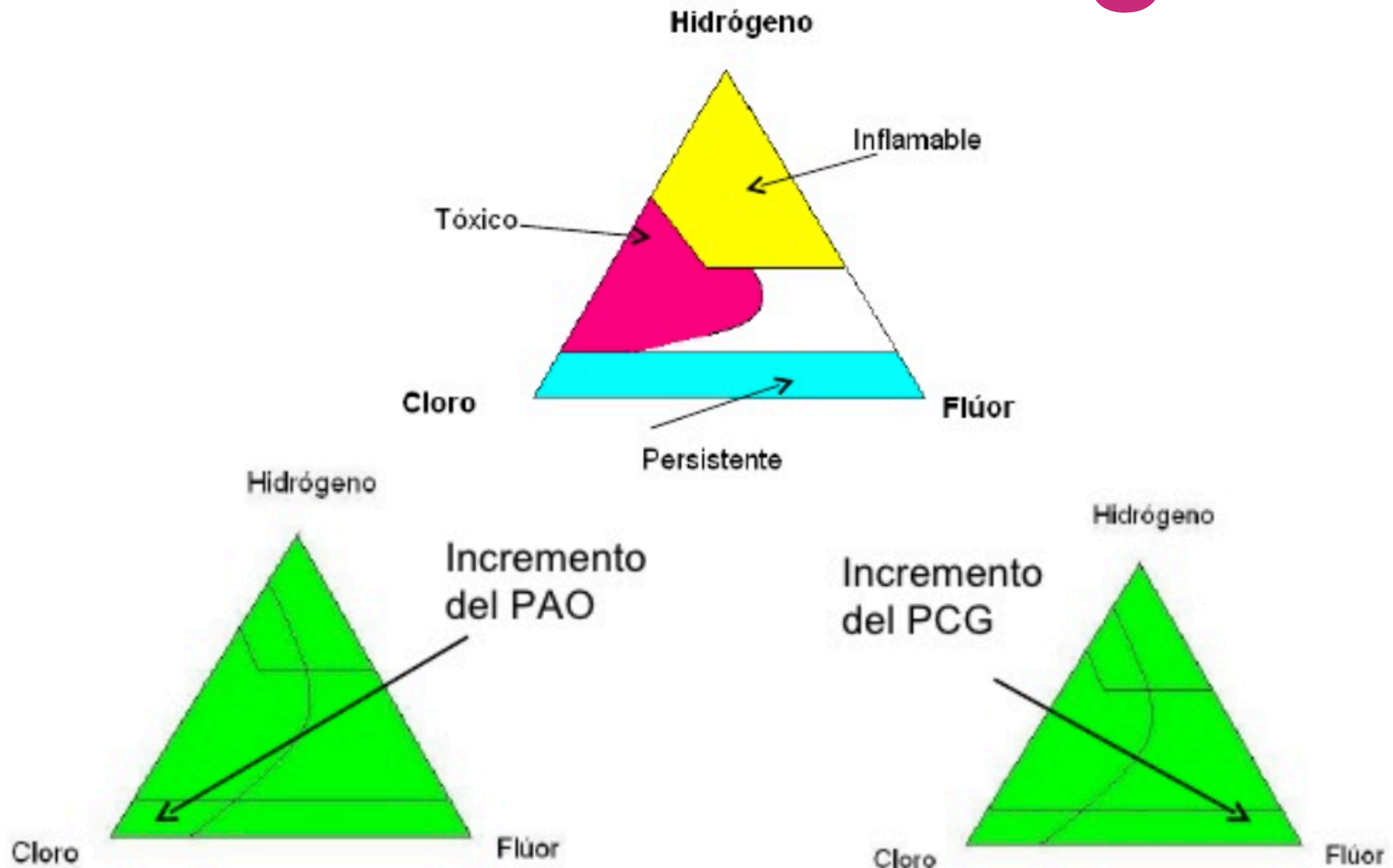
Fuente: Secretaría de Ozono del PNUMA, 2009.

Desafio tecnologico



PAO: Potencial de Agotamiento de Ozono
PCG: Potencial de Calentamiento Global

Desafio tecnologico



PAO: Potencial de Agotamiento de Ozono

PCG: Potencial de Calentamiento Global

Desafio tecnologico

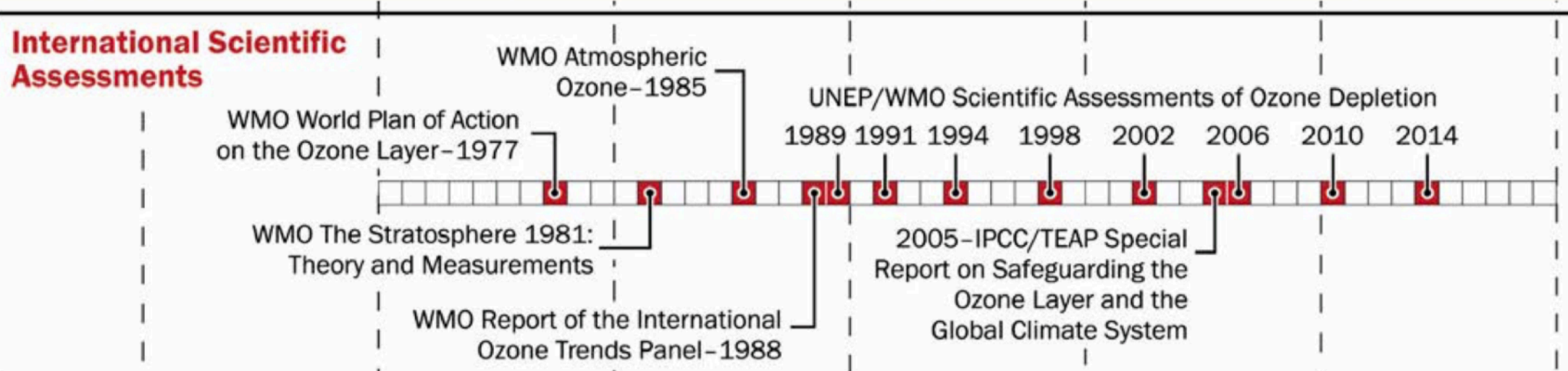
Sustancia	PAO	PCG	Tiempo de Vida (años)
CFC-12	1,0	10.720	100
CFC-11	1,0	4.680	45
HCFC-141b	0,11	713	9,3
HCFC-22	0,055	1.780	12
HCFC-123	0,02	76	1,3
HFC-134a	0,0	4.400	14
HFC-23	0,0	14.310	270
Halón 1301	10,0	7.030	65
Hidrocarburos	0,0	< 10	

PCG: Potencial de Calentamiento Global
PCG para el CO₂ = 1,0

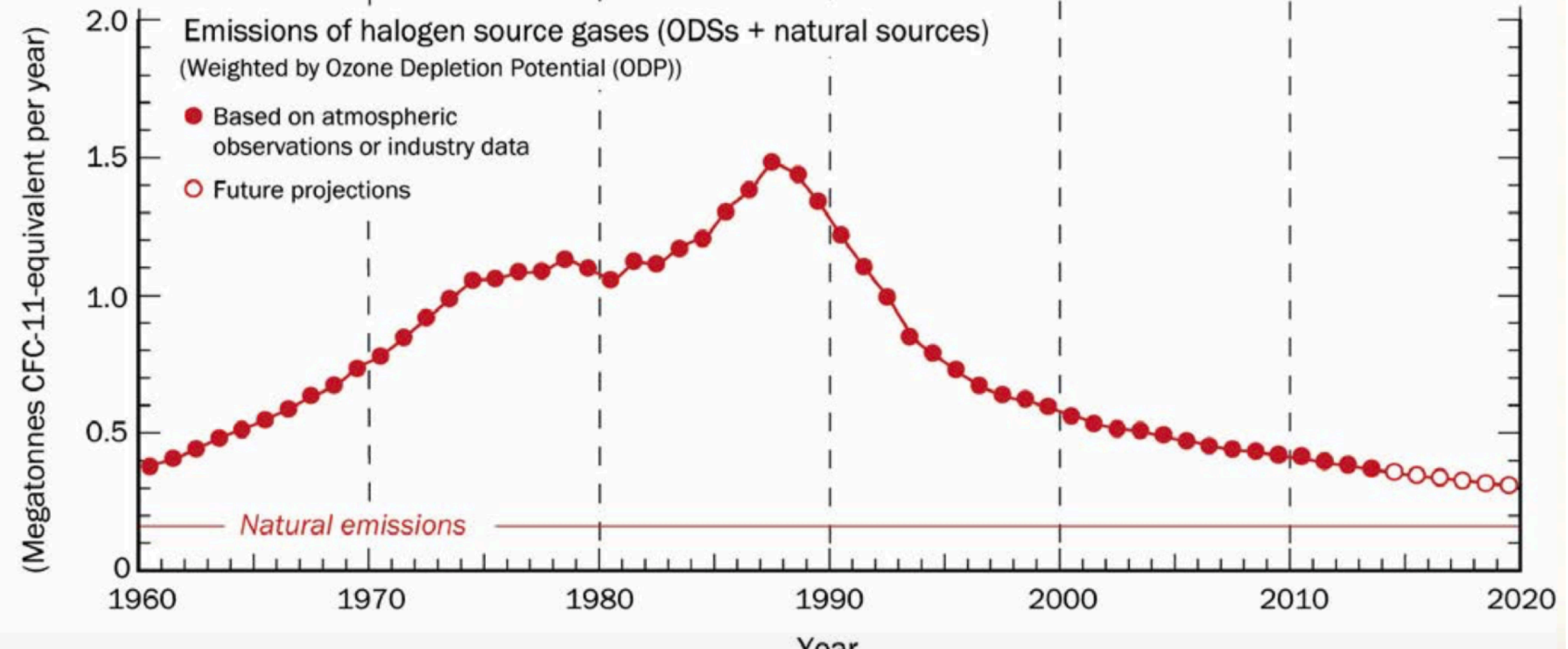
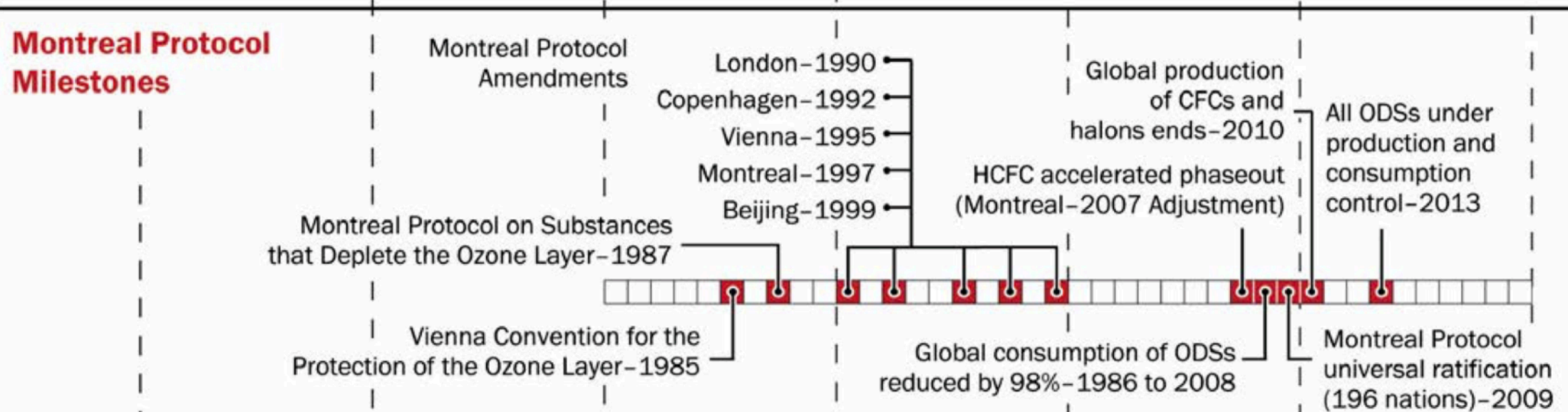
Cronograma de Protocolo de Montreal

- Mayoría de las sustancias se han eliminado en el 2010.
- Por ejemplo los CFCs:
 - Congelamiento de consumo y producción a la línea base (promedio 1995-1997): en 1999
 - 50% reducción : 1st Enero 2005
 - 85% reducción: 2007
 - 100% reducción: 2010
- Bromuro de metilo 20% 2005

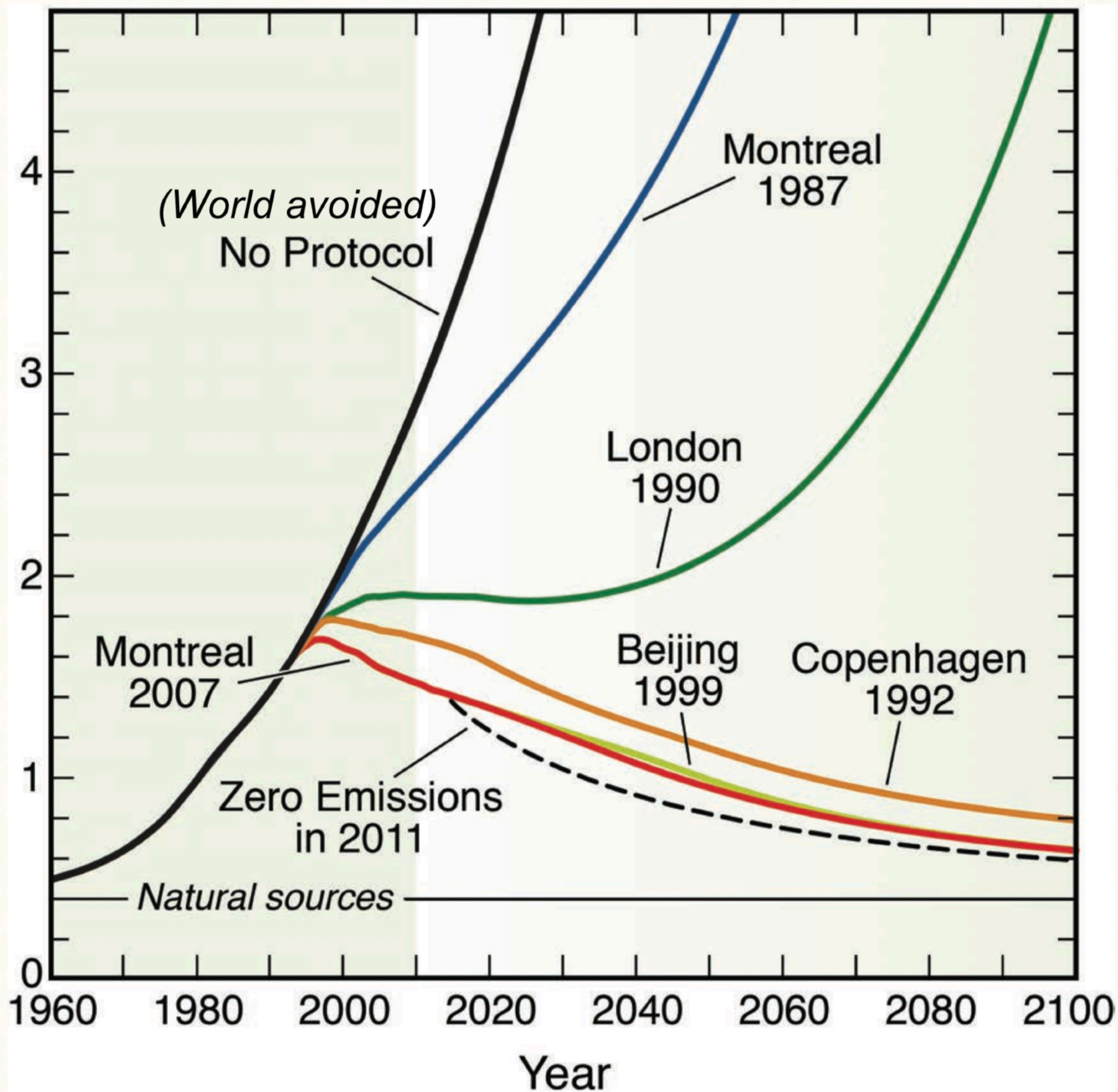
International Scientific Assessments



Montreal Protocol Milestones

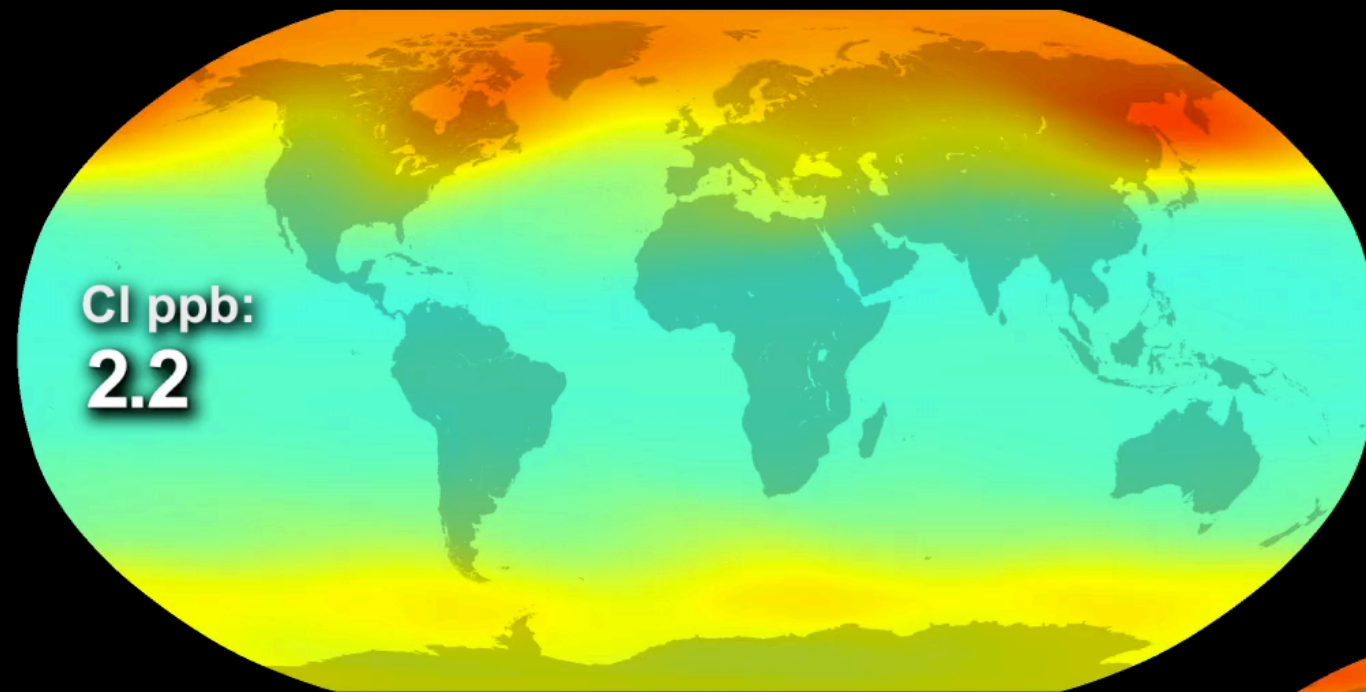


Atmospheric chlorine and bromine



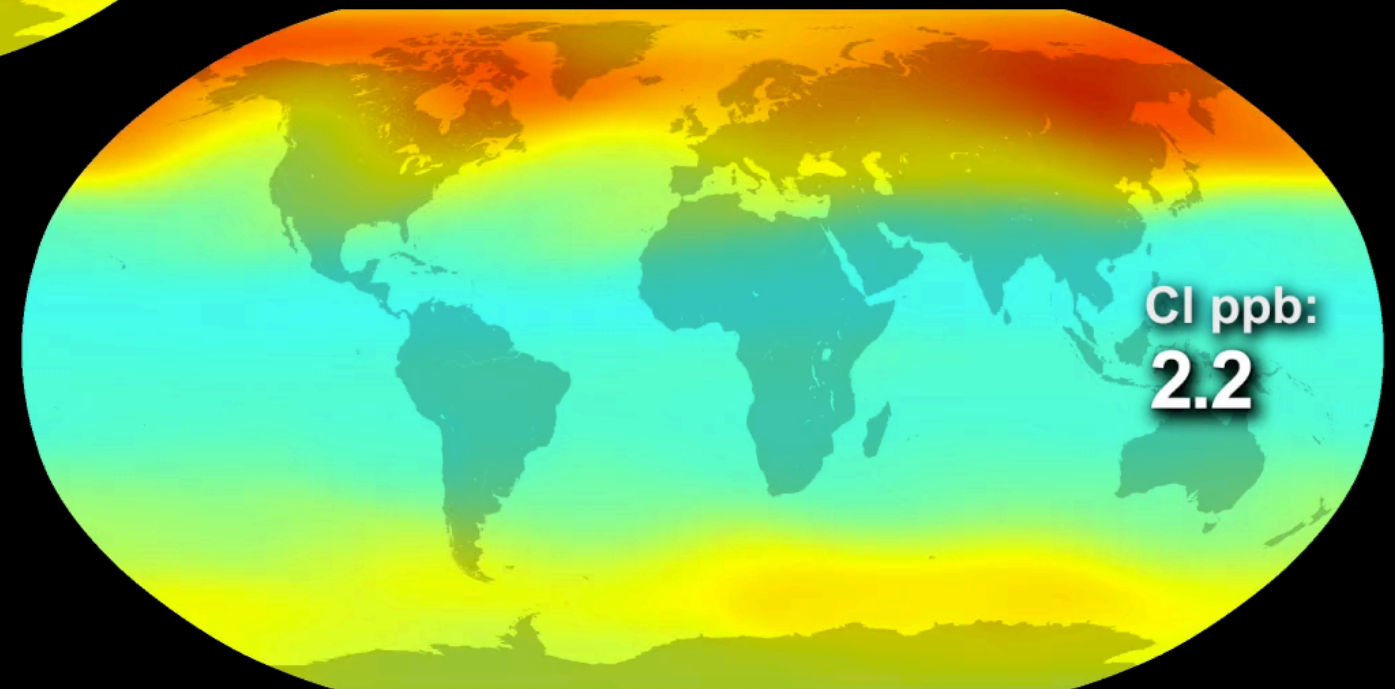
Dinámica del agujero de ozono

1974

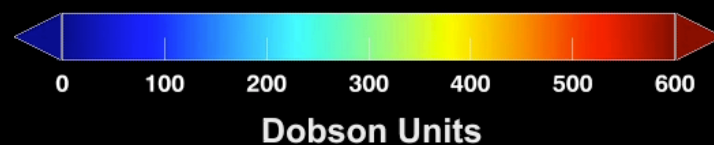


World Expected

World Avoided

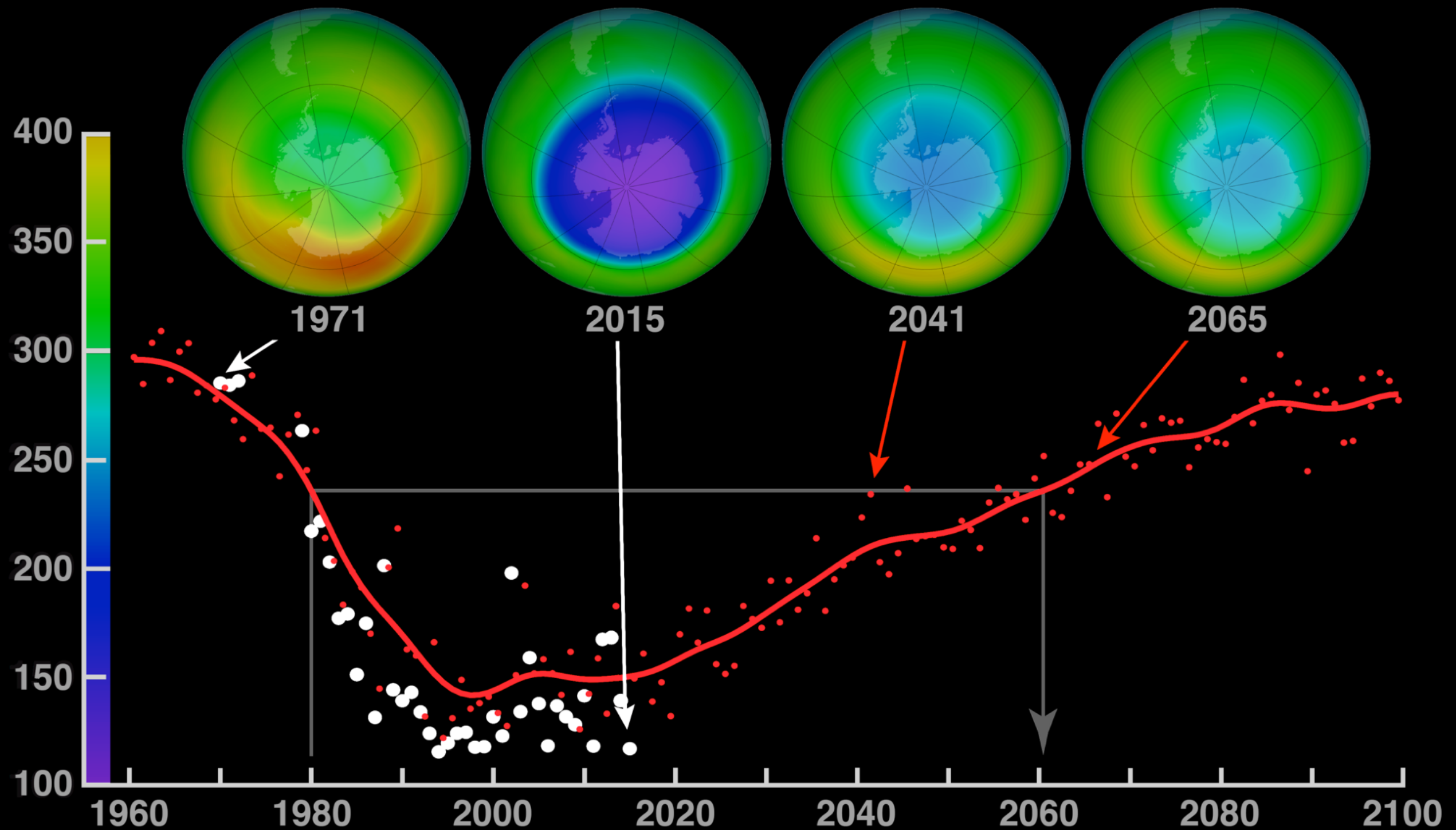


Ozone Concentration



Dobson Units

Dinámica del agujero de ozono



MEDIO AMBIENTE Informe de la ONU

La capa de ozono, en el camino de la recuperación

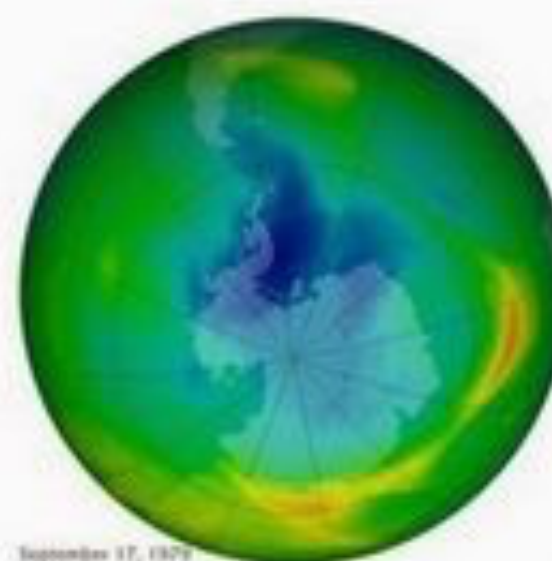
EL MUNDO > Madrid

Actualizado: 11/09/2014 17:53 horas

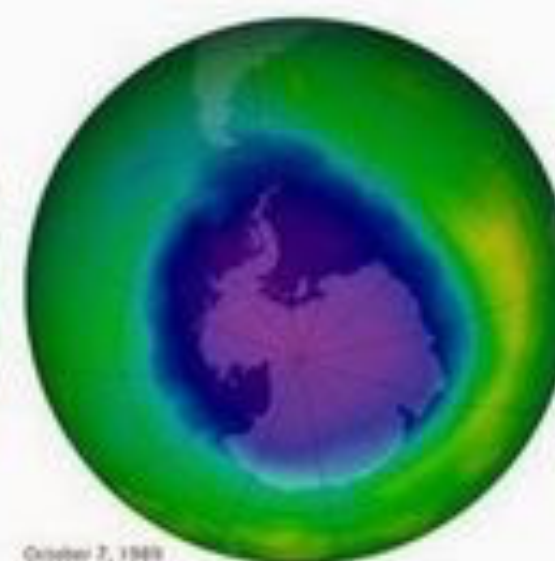
19

Un nuevo análisis del estado la capa de ozono ha determinado que este 'escudo natural' de la Tierra **podría recuperarse a mediados de siglo** si continúan las medidas de restricción de emisiones de los productos que la destruyen.

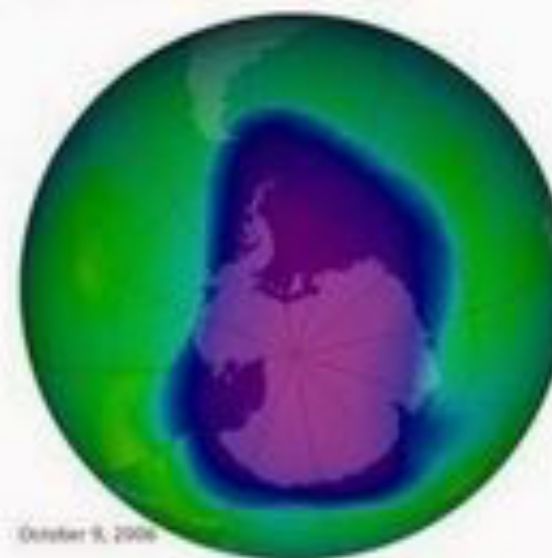
El estudio ha estado avalado por la [Organización Meteorológica Mundial \(WMO\)](#) y por el [Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente \(PNUMA\)](#). En la elaboración de la primera **evaluación exhaustiva** realizada en los últimos cuatro años han participado **300 reputados científicos**, que han concluido que gracias a las medidas adoptadas por el "[Protocolo de Montreal relativo a las Sustancias que Agotan la Capa de Ozono](#)", en vigor desde 1989, se está cumpliendo el objetivo de recuperar los **niveles de referencia de 1980**, cuando aún no había indicios considerables de agotamiento.



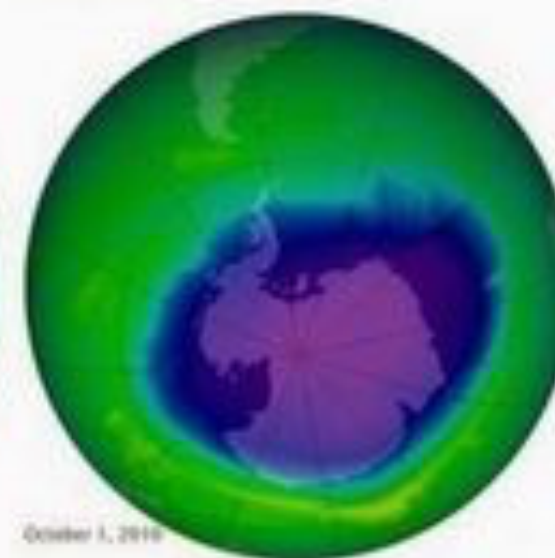
September 17, 1979



October 7, 1989



October 9, 2000



October 1, 2010

Simulación de la evolución de la capa de ozono. NASA

a+ a- [icon] [icon]

Atmospheric Data Analysis

Trend and recovery of the total ozone column in South America and Antarctica

Richard Toro A.¹ · Consuelo Araya¹ · Felipe Labra O.² · Luis Morales² · Raúl G. E. Morales¹ · Manuel A. Leiva G.¹ 

Received: 4 February 2015 / Accepted: 15 January 2017
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017

Abstract South America is one of the most vulnerable areas to stratospheric ozone depletion; consequently, an increased amount of UV radiation reaches the Earth's surface in this region. In this study, we analyzed the long-term trend in the total ozone column (TOC) over the southern part of the South American continent from 1980 to 2009. The database used was obtained by combining several satellite measurements of the TOC on a 1° (latitude) $\times$ 1.25° (longitude) grid. Analysis of the long-term trend was performed by applying the Theil-Sen estimator and the Mann-Kendall significance test to the deseasonalized time series. The long-term trend was also analyzed over several highly populated urban zones in the study area. Finally, multiple linear regression (MLR) modeling was used to identify and quantify the drivers of interannual variability in the TOC over the study area with a pixel-by-pixel approach. The results showed a decrease in the TOC ranging from -0.3 to -4% dec^{-1} from 1980 to 2009. On a decadal timescale, there is significant variability in this trend, and a decrease of more than -10% dec^{-1} was found at high latitudes (1980–1989). However, the trends obtained over much of the study area were not statistically significant. Considering the period from 1980 to 1995, we found a decrease in the TOC of $-2.0 \pm 0.6\%$ dec^{-1} at latitudes below 40° S and $-6.9 \pm 2.0\%$ dec^{-1} at latitudes above 40° S, for a 99.9% confidence level over most of the study area. Analysis of

the period from 1996 to 2009 showed a statistically significant increase of $2.3 \pm 0.1\%$ dec^{-1} at high latitudes ($> 60^\circ$ S), confirming the initial TOC recovery in the Antarctic. Despite evidence for initial recovery of the TOC in some parts of the study area between 1996 and 2009, the long-term increase from September to November is not yet statistically significant. In addition, large parts of the study area and most of the urban areas continue to show a decreasing trend in the TOC. The MLR results show that at high latitudes, the main driver of interannual variability in the TOC is the total effective amount of halogens, followed by the eddy heat flux.

Keywords Total ozone column · Long-term trend analysis · Theil-Sen estimator · Decadal variation · Multiple linear regression

1 Introduction

Ozone (O_3) only represents 0.0012% of the total composition of the atmosphere (Iqbal 1983). Nearly 90% of atmospheric ozone is present in the stratosphere, which is located at altitudes ranging from 10 to 50 km (WMO 2010). Thus, we refer to the region of the atmosphere with the greatest proportion of ozone as the ozone layer. The ozone (O_3) layer shields Earth's living organisms from harmful ultraviolet solar radiation (UV).

The presence of the ozone layer was first determined in the 1920s based on observations of the UV solar spectrum (Lindfors and Vuilleumier 2005; Staehelin et al. 1994, 1998, 2009). The oldest and most systematic ozone column measurements were performed in Arosa, Switzerland ($46^\circ 47' \text{N}$, $09^\circ 41' \text{E}$) beginning in 1926 (Rieder et al. 2010a, b; Staehelin et al. 1998). In 1930, the British scientist

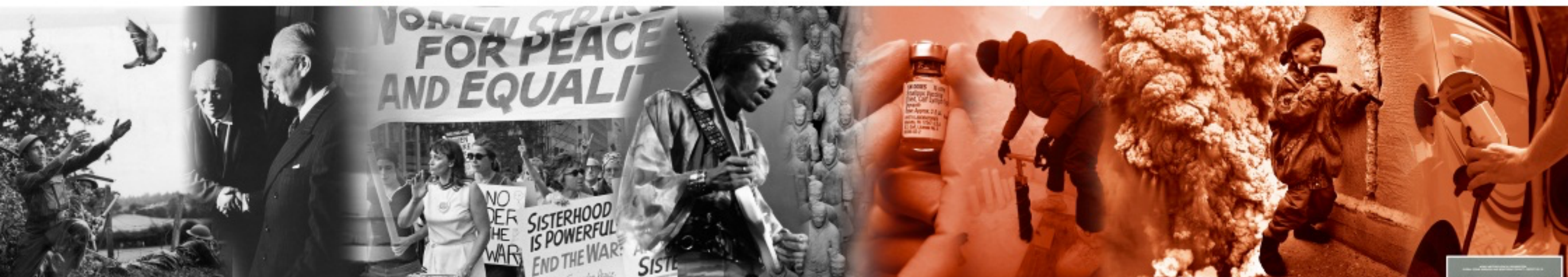
✉ Manuel A. Leiva G.
manleiva@uchile.cl; manleiva@me.com

¹ Department of Chemistry and Center for Environmental Sciences, Faculty of Science, University of Chile, Las Palmeras 3425, PO 7800003, Ñuñoa, Santiago, Chile

² Faculty of Agricultural Sciences, University of Chile, Av. Santa Rosa, 11315, PO 8820808, La Pintana, Santiago, Chile

25 Years of Protecting the Ozone Layer - A Walk Through History

MONTEAL PROTOCOL
25
1987-2012



1890s – CFCs synthesized by Frederick Swarts



1920s – CFC refrigerants developed by Charles Kettering and Thomas Midgley



1970, 1972 – Nitrogen oxides and ozone damage demonstrated by Paul Crutzen

1974 – CFC link to ozone damage found by Mario Molina and Sherwood Rowland



1975 – Chemicals like bromine and fumigants used in agriculture also found to be ozone-damaging

1976 – UNEP calls for an international ozone layer conference amid rising concern



1977 – World Plan of Action on the Ozone Layer is adopted

1978 – USA, Canada, Norway and Sweden ban CFCs as propellant in some aerosols

1981 – Global treaty to protect the ozone layer proposed by UNEP

1984 – Shigeru Chubachi reports very low ozone and a hole over Antarctica

1985 – British Antarctic Survey reports recurring springtime ozone hole over Antarctica



1985 – Vienna Convention for the Protection of the Ozone Layer is adopted



1986 – Susan Solomon finds Polar Stratospheric Clouds catalyze ozone layer depletion

1987 – Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer is adopted, 24 countries sign

1989 – First reports of Montreal Protocol Assessment Panels are issued and developed countries freeze CFCs at 1986 levels



1990 – London Amendment adds controls on CTC and MCh and establishes the Multilateral Fund

1992 – Copenhagen Amendment adds controls on HBFCs, MB, HCFCs



1994 – Developed countries phase out halons used in products such as fire-fighting equipment

1995 – Nobel prize for chemistry awarded to Rowland, Molina and Crutzen

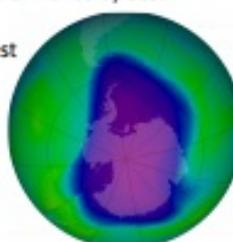
1996 – Developed countries phase out CFCs, CTC, MCh and HBFCs

1999 – Beijing Amendment adds HCFC production controls and BCM along with its immediate phase-out

2002 – Developing countries freeze MB production at 1995-8 levels

2004 – Developed countries reduce consumption of HCFCs by 35%

2006 – Largest Antarctic ozone hole, averaging 26.6 million square km, is recorded



2007 – Schedule for accelerating the phase-out of HCFCs is agreed

2007 – The significant climate change benefits of action under the Montreal Protocol assessed by Guus Velders and colleagues

2009 – Universal ratification of the Vienna Convention and the Montreal Protocol



2010 – Developing countries phase out CFCs, halons and CTC

2013 – Developing countries freeze HCFCs

2015 – Developing countries phase out MB and MCh, and reduce HCFCs by 10%

2030 – Developed countries phase out HCFC

2040 – Developing countries phase out HCFC

2050 – Expected recovery of the global ozone

2065 – Expected end of the Antarctic ozone hole





http://www.pnuma.org/ozono/publicaciones/ozzy/6204-s-edupack_secschool_teacherbook.pdf