



**Universidade de São Paulo**  
**Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas**  
**Departamento de Ciências Atmosféricas**  
**DCA/IAG/USP**

# Evolução da atmosfera terrestre

**Adalgiza Fornaro**

Departamento de Ciências Atmosféricas, IAG/USP

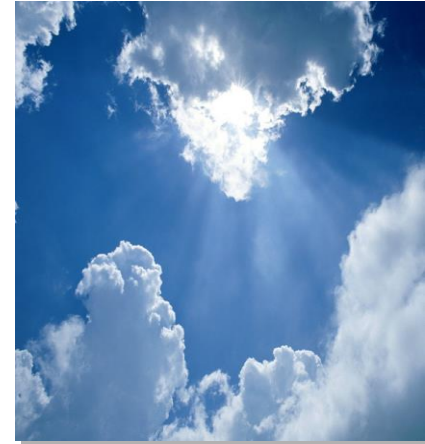
[adalgiza.fornaro@iag.usp.br](mailto:adalgiza.fornaro@iag.usp.br)

# A atmosfera atual

Desconsiderando a umidade (ar seco), a composição percentual média dos constituintes atmosféricos ao nível do mar é atualmente:

99,999%

- **Nitrogênio** ( $N_2$ ) - 78,084%
- **Oxigênio** ( $O_2$ ) - 20,948%
- **Argônio** (Ar) - 0,934%
- **Gás carbônico** ( $CO_2$ ) - 0,038% (400 ppm)
- **Neônio** (Ne) - 0,001818% (18 ppm)
- **Hélio** (He) - 0,000524% (5 ppm)
- **Metano** ( $CH_4$ ) - 0,0002% (2 ppm)
- **Kriptônio** (Kr) - 0,000114%
- **Hidrogênio** ( $H_2$ ) - 0,00005%
- **Xenônio** (Xe) - 0,0000087%



Também há traços de :

- **Óxidos de nitrogênio** (NO,  $NO_2$  e  $N_2O$ )
- **Monóxido de carbono** (CO)
- **Ozônio** ( $O_3$ )
- **Amônia** ( $NH_3$ )
- **Dióxido de enxofre** ( $SO_2$ )
- **Sulfeto de hidrogênio** ( $H_2S$ )

# Composição atual do ar atmosférico seco ao nível do mar:

Gases majoritários

99,999%



Gases traço

vapor de água - H<sub>2</sub>O 0-5%

Material particulado 0,01 ppm

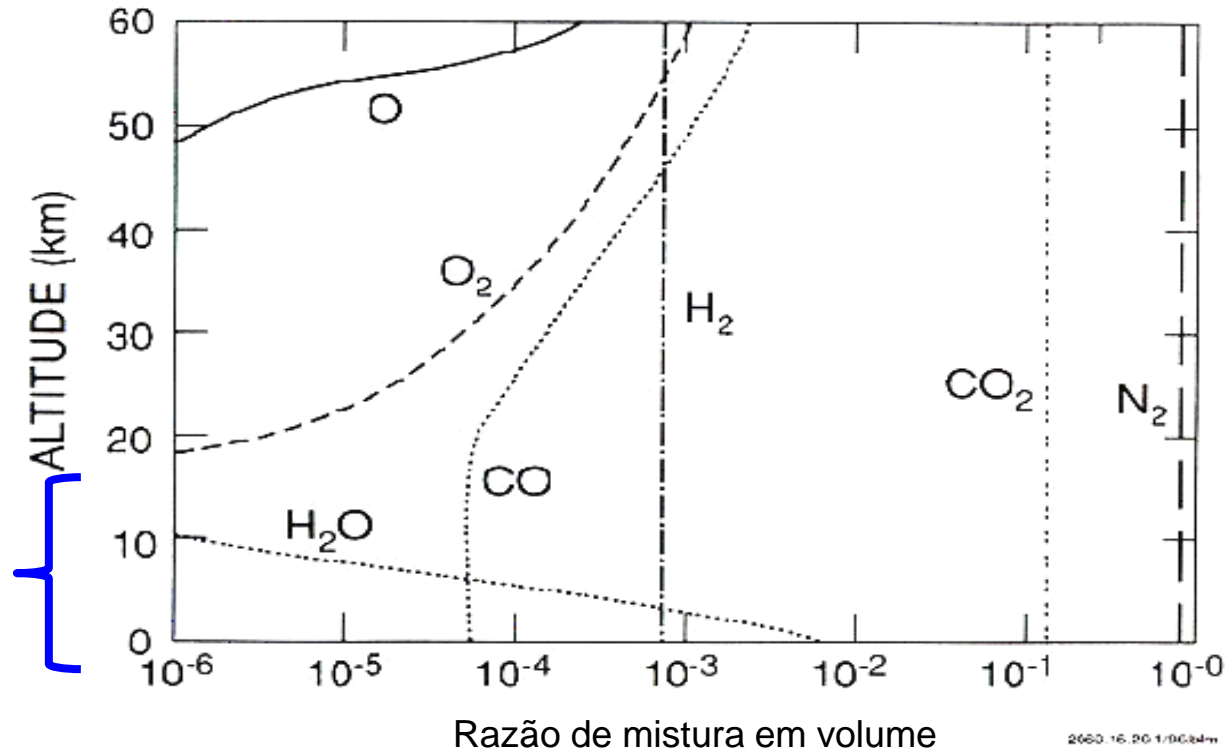
~ 10-20 µg m<sup>-3</sup>

Gás		% volume
Nitrogênio	N <sub>2</sub>	78,084
Oxigênio	O <sub>2</sub>	20,948
Argônio	Ar	0,934
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	0,033*
Neônio	Ne	0,00182
Hidrogênio	H <sub>2</sub>	0,0010
Hélio	He	0,00052
Metano	CH <sub>4</sub>	0,0002*
Criptônio	Kr	0,0001
Monóxido de carbono	CO	0,00001*
Xenônio	Xe	0,000008
Ozônio	O <sub>3</sub>	0,000002*
Amônia	NH <sub>3</sub>	0,000001
Dióxido de nitrogênio	NO <sub>2</sub>	0,0000001*
Dióxido de enxofre	SO <sub>2</sub>	0,00000002*

\* Gases traço de importância ambiental.

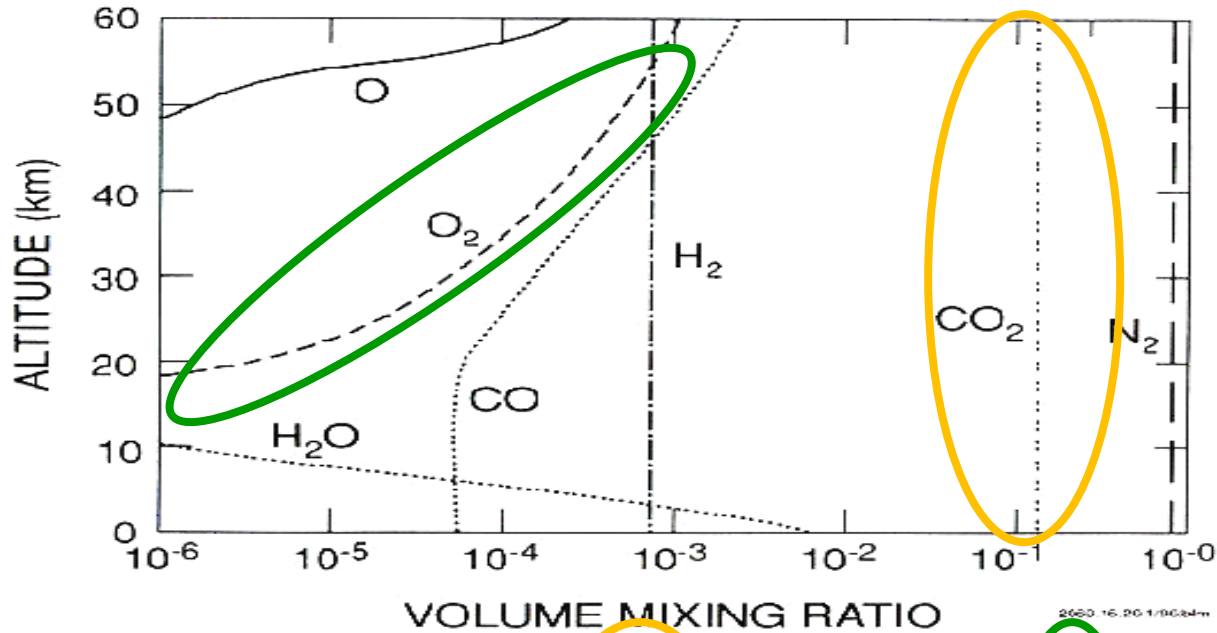
# Constituição da atmosfera pré-biótica (~4 bilhões de anos atrás)

Não há O<sub>2</sub>  
abaixo  
de 20 km!!!

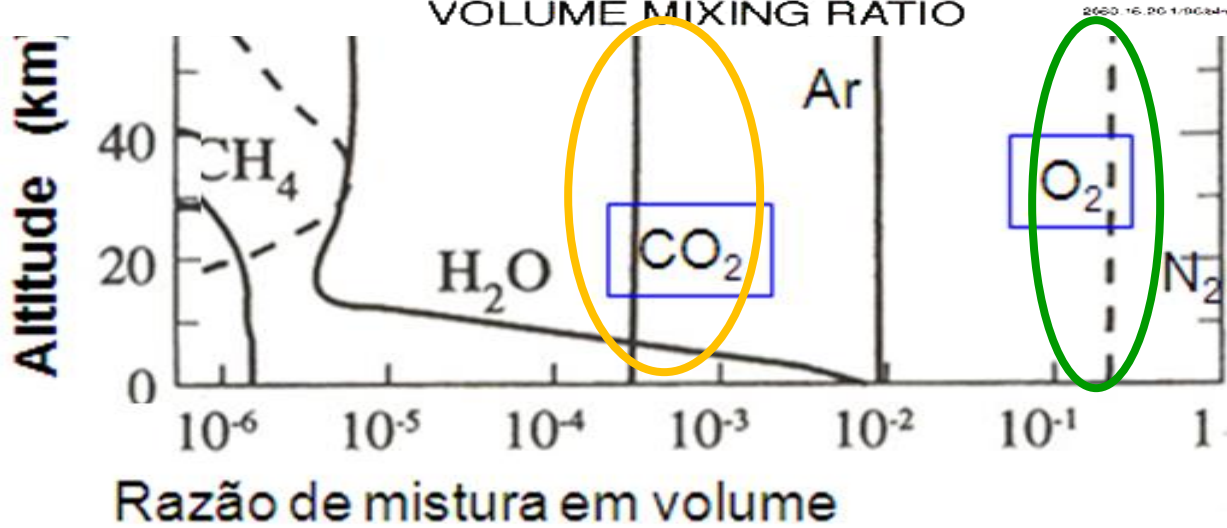


Distribuição vertical dos principais constituintes na atmosfera pre-biótica. Os gases principais eram N<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>. Temperatura e pressão na superfície terrestre: ~85 °C e 11 bars, respectivamente. Destruição fotoquímica do CO<sub>2</sub> aumentou a produção de O e O<sub>2</sub> na atmosfera superior (Kasting, 1990).

# Evolução da composição química da atmosfera:



primitiva



atual

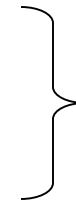
## Atmosfera pre-biótica

•  $H_2$     $CH_4$     $NH_3$     $N_2$     $H_2S$



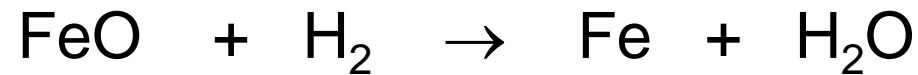
Atmosfera  
reduzida

•  $CO_2$     $CO$     $H_2O$     $NO_2$     $SO_2$



Atmosfera  
oxidada

Atmosfera redutora: presença de hidrogênio:



Contribui para mais água na superfície do planeta e o ferro foi, gradualmente, incorporado para o manto e núcleo quente.

# O oxigênio na atmosfera

**A questão importante é como ocorreu a adição de  $O_2$  livre na atmosfera, que hoje é da ordem de  $\sim 21\%$ .**

O mecanismo inicial que conduziu à formação de oxigênio molecular foi provavelmente a fotólise do vapor de água na alta atmosfera seguido pelo escape de átomos de hidrogênio ao espaço.

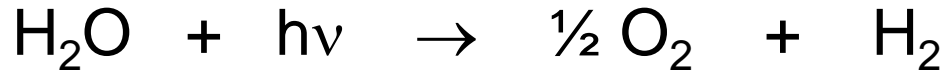
A quantidade de  $O_2$  permaneceu baixa na atmosfera devido à captura desse elemento por íons de ferro dissolvidos no oceano, servindo como um eficiente mecanismo de remoção.

O oxigênio começou a acumular por volta de dois bilhões de anos atrás, permitindo o desenvolvimento de organismos que fossem capazes de utilizá-lo.

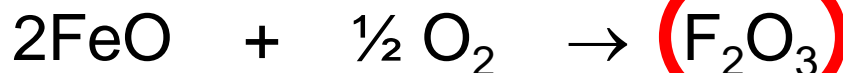
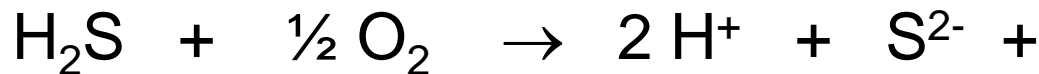
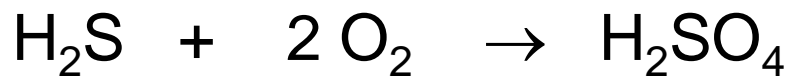
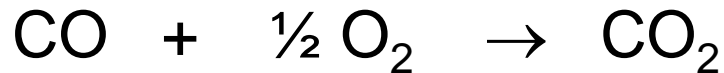


# Formação de O<sub>2</sub> - evolução química

## 1 - Dissociação fotoquímica - fotólise



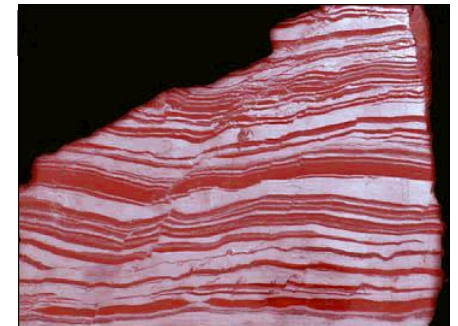
## Consumo de O<sub>2</sub>



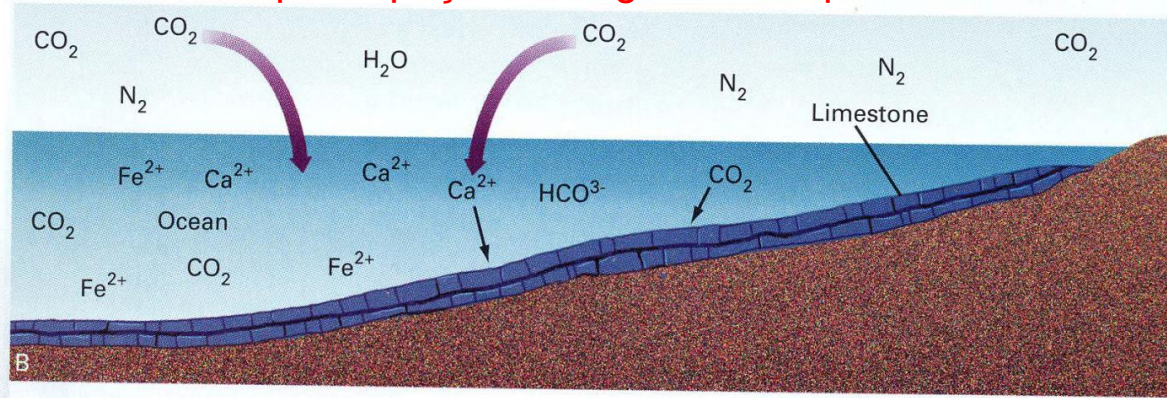
“camas vermelhas” = depósitos de óxidos de ferro (III)



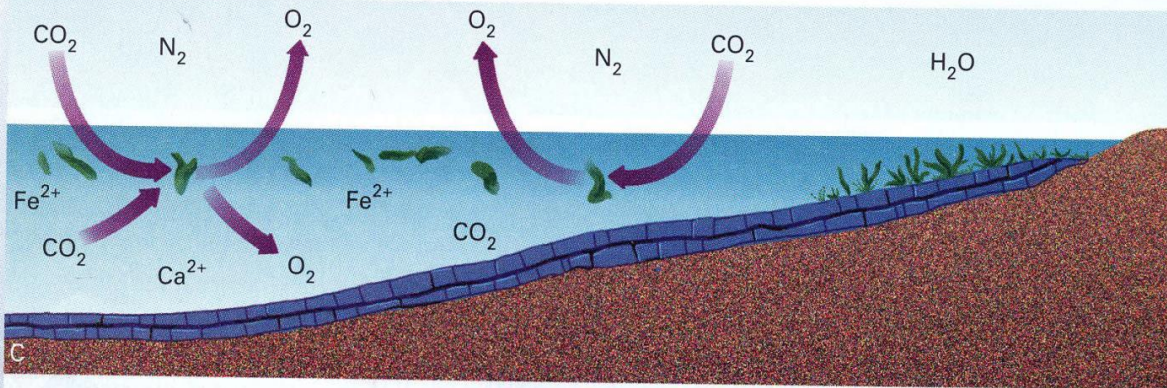
Copyright R. R. Dickerson 2011



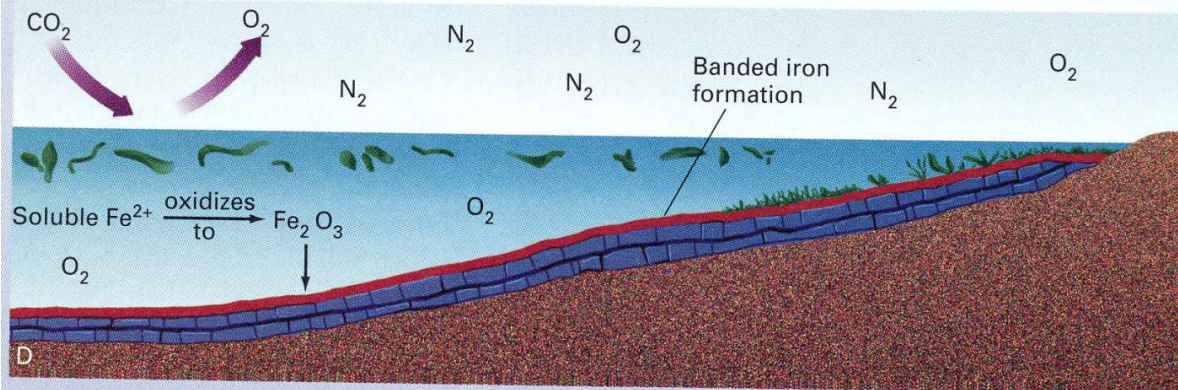
# Formação das “camas vermelhas” = depósitos de óxidos de ferro (III) Com participação de organismos que fazem fotossíntese



Dissolução do  $\text{CO}_2$  e precipitação de calcário (branco) → diminuição de  $\text{CO}_2$  atmosférico



Fotossíntese: liberação de  $\text{O}_2$



concentração de  $\text{O}_2$  aumenta = precipitação de óxido de ferro (vermelho)

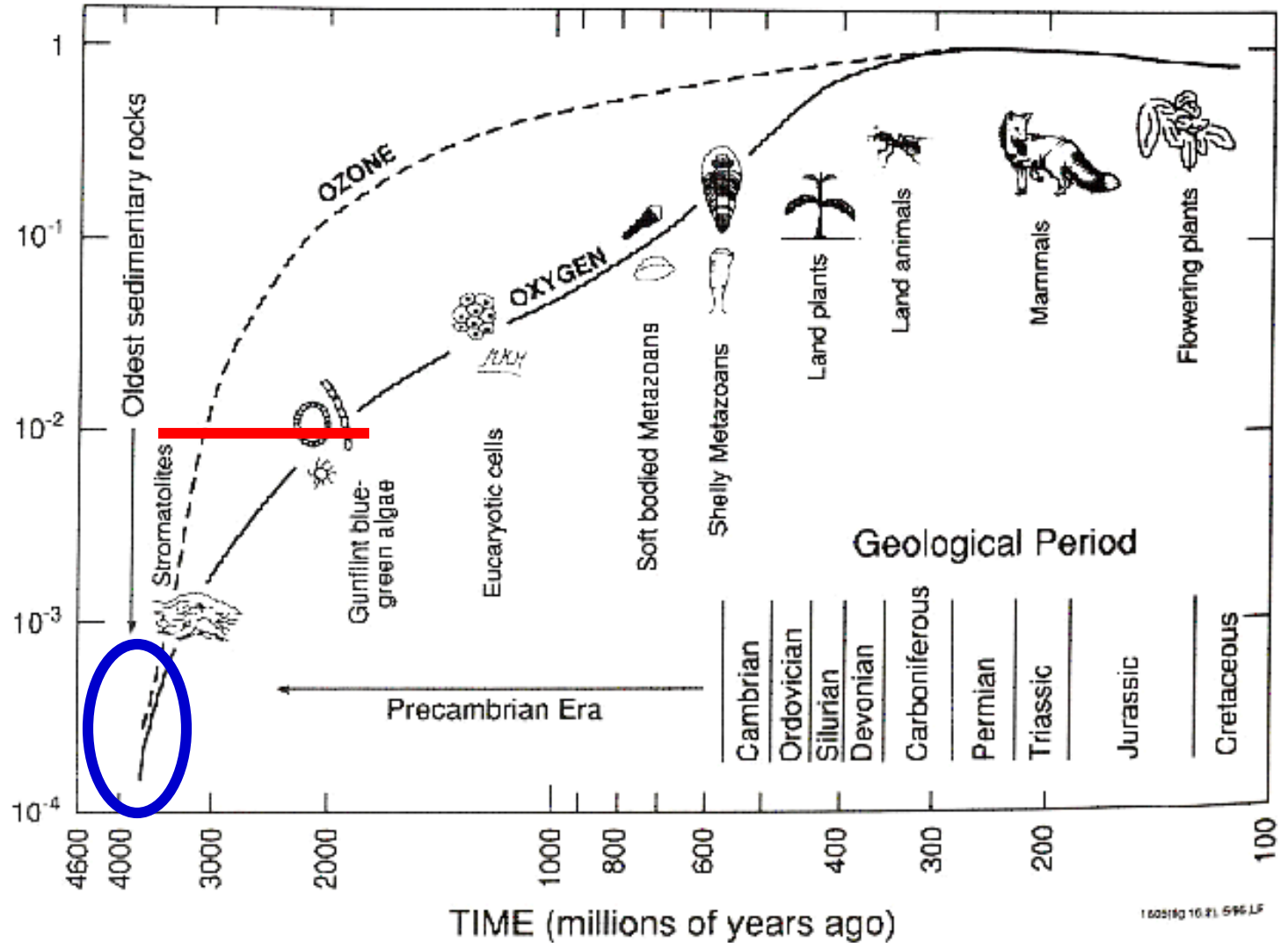
# Oxigênio e ozônio

100%

10%

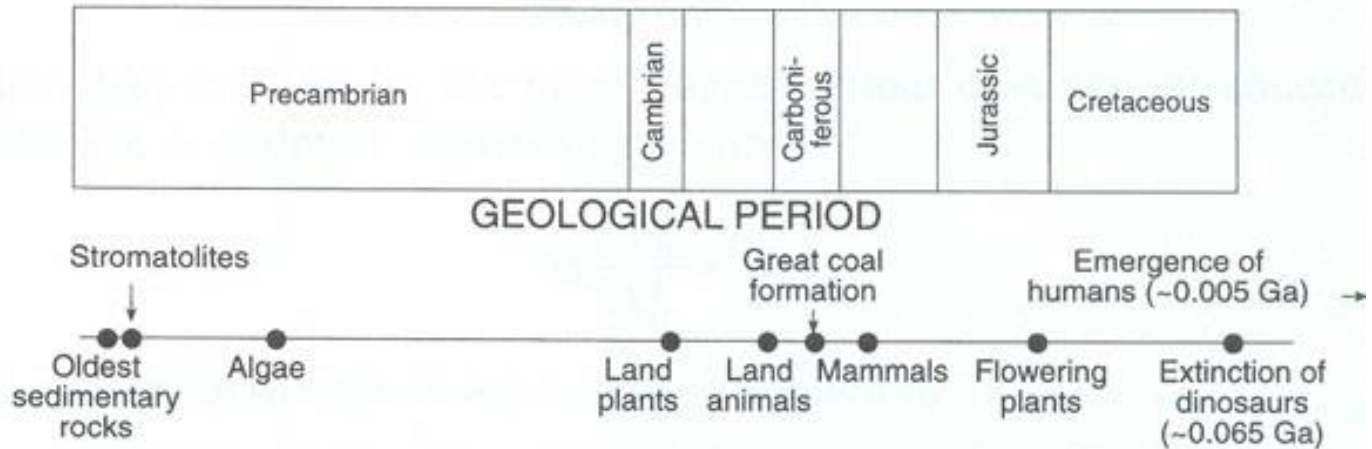
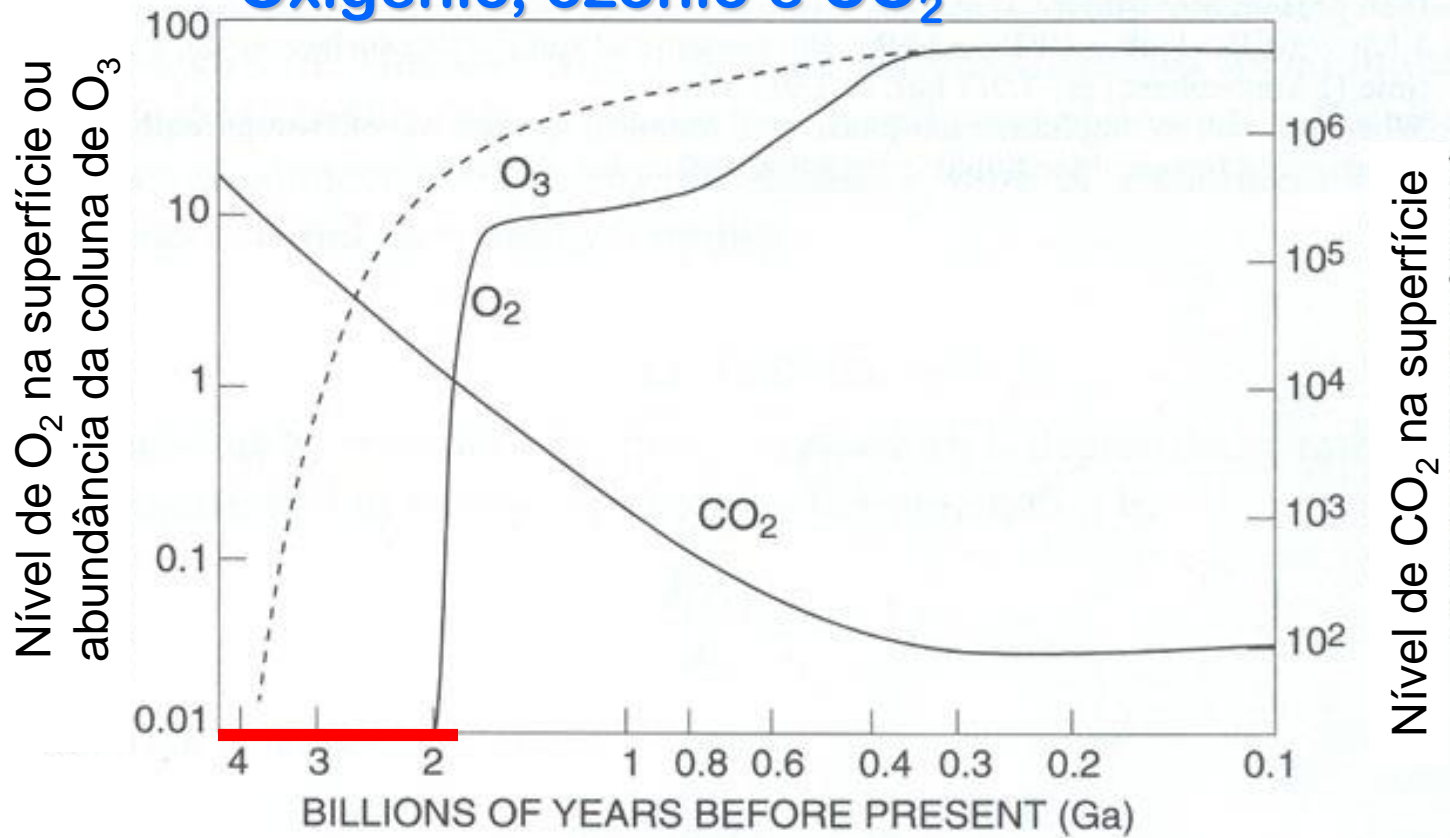
1%

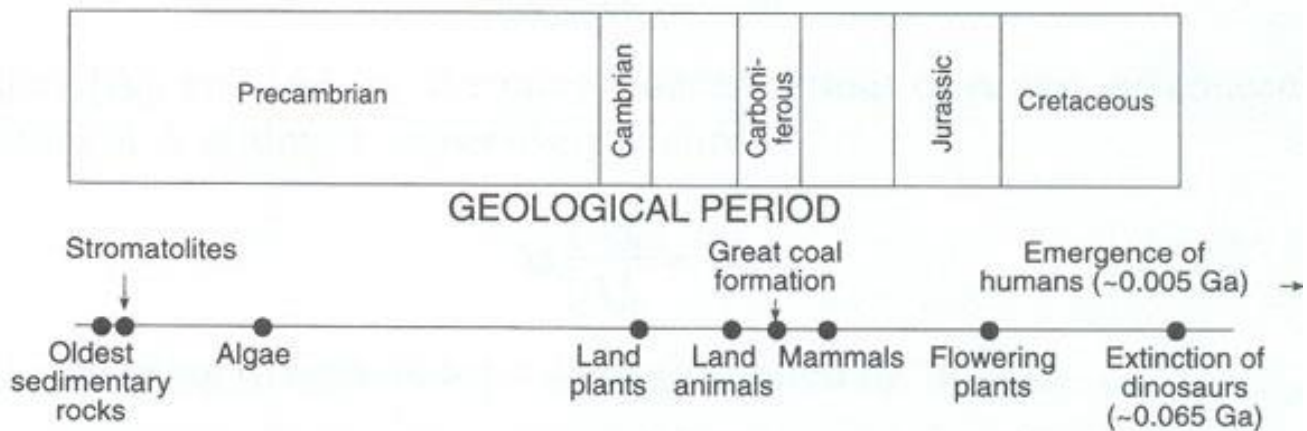
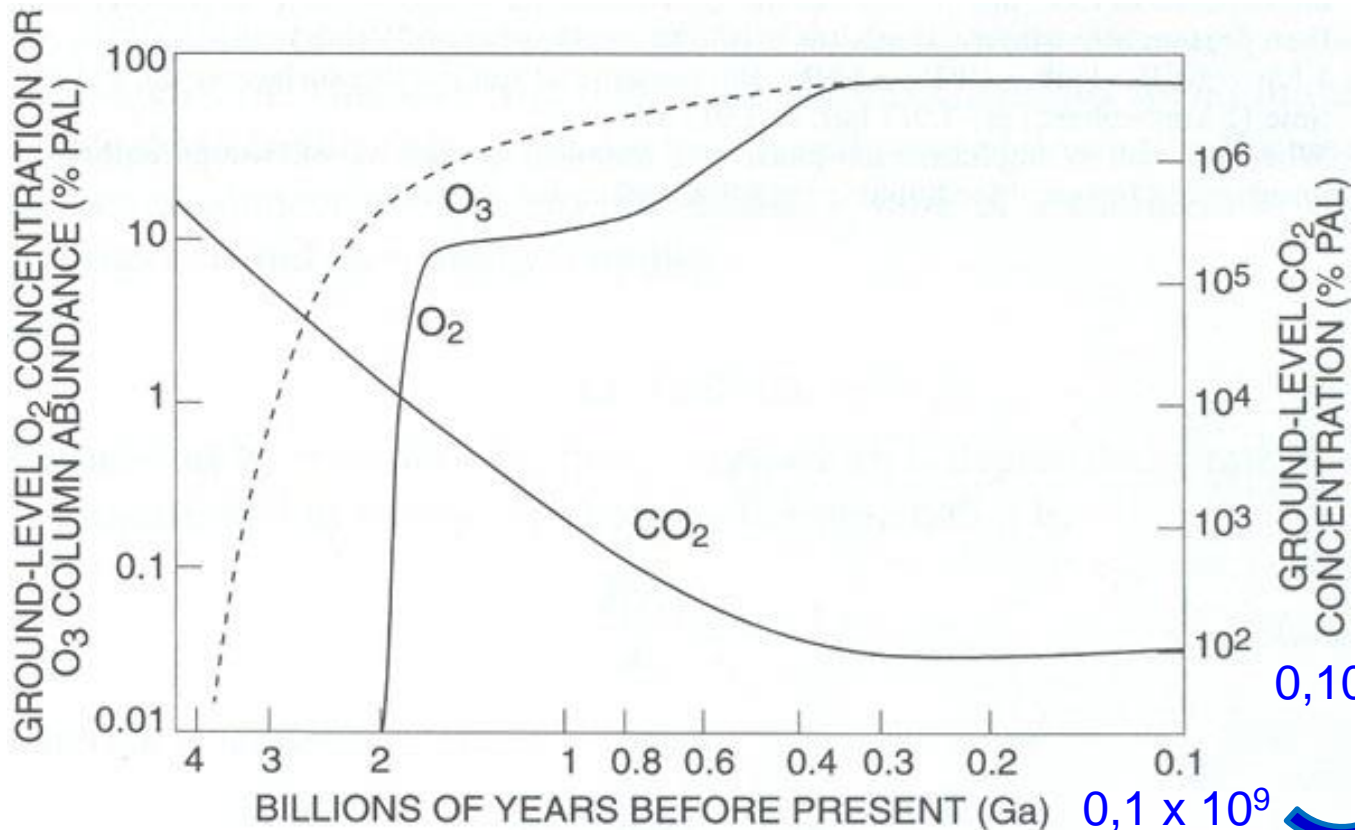
Nível de  $O_2$  na superfície ou  
abundância da coluna de  $O_3$



Provável evolução da abundância do oxigênio e do ozônio na atmosfera (frações dos níveis atuais) durante os diferentes períodos geológicos da história da Terra (Wayne, 1991).

# Oxigênio, ozônio e CO<sub>2</sub>





0,8 x 10<sup>6</sup>



800.000

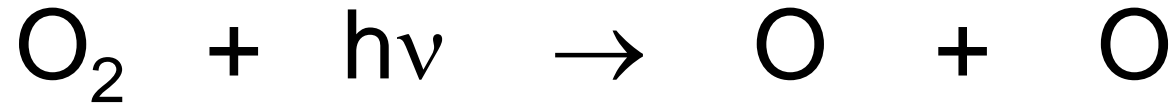
<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>

<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/history.html>

**História do CO<sub>2</sub> atmosférico a partir de 800.000 anos atrás até Janeiro, 2014.**

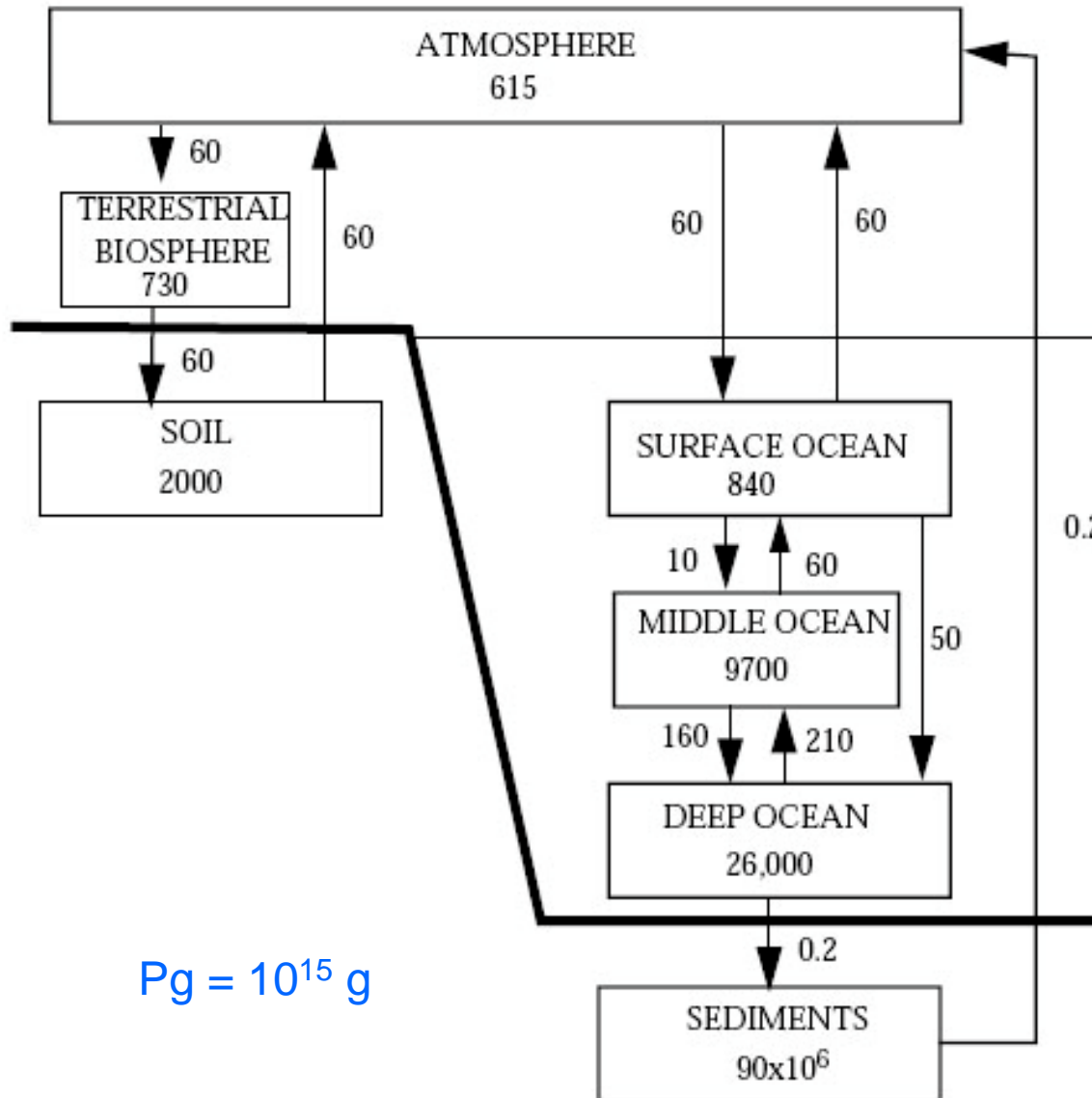
# O oxigênio na atmosfera

## Camada de ozônio



No mesmo período, o ozônio foi formado, devido à dissociação fotoquímica das moléculas de oxigênio pela radiação ultravioleta. A camada de ozônio originada ofereceu a proteção necessária contra radiação ultravioleta, permitindo o desenvolvimento de vida na superfície.

# Carbono nos compartimentos terrestres



Com o tempo, o carbono excedente ficou confinado em rochas sedimentares (calcário), combustíveis fósseis (carvão, petróleo, gás natural) e conchas de animais.

Ao longo dos períodos geológicos, a quantidade de  $\text{CO}_2$  na atmosfera tem sido regulada por remoção úmida e processos de liberação associados com vulcanismo e metamorfismo (mudanças na estrutura ou constituição das rochas devido à pressão e temperatura).

Figure 6-10 The preindustrial carbon cycle. Inventories are in Pg C and flows are in  $\text{Pg C yr}^{-1}$ . Adapted from McElroy, M.B., op.cit.



# O oxigênio na atmosfera

A transição da atmosfera primitiva redutora, sem oxigênio, para uma atmosfera oxidante que sustente a vida para grandes organismos foi, inquestionavelmente, o estágio mais importante da evolução da atmosfera terrestre.



## A teoria de Gaia

A presença de oxigênio molecular na atmosfera é instável, devida a propriedade do oxigênio reagir (oxidar) com várias moléculas e compostos. Por exemplo, o dióxido de carbono é a forma totalmente oxidada do carbono.

Ao contrário das atmosferas presentes em outros planetas do sistema solar, a da Terra não se encontra em equilíbrio químico, pois as concentrações de  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CH_4$ ,  $N_2O$  e  $NH_3$  são muito maiores do que deveriam ser para se obter o perfeito equilíbrio.

Isso se deve aos processos biológicos, uma vez que os quatro mais abundantes elementos químicos presentes na atmosfera (nitrogênio, oxigênio, hidrogênio e carbono) também são os mais abundantes da biosfera.

A composição da atmosfera terrestre é única em todo sistema solar



**Terra:** 78,08% de Nitrogênio, 20,95% de Oxigênio e 0,93% de Argônio

**Vênus & Marte:** Predominância do Dióxido de Carbono

**Gigantes gasosos:** Principalmente Hidrogênio e Hélio

# Características das atmosferas atuais de Vênus, Terra e Marte.

	Venus	Earth	Mars
Radius (km)	6100	6400	3400
Mass of planet ( $10^{23}$ kg)	49	60	6.4
Acceleration of gravity ( $m\ s^{-2}$ )	8.9	9.8	3.7
Surface temperature (K)	730	290	220
Surface pressure (Pa)	$9.1 \times 10^6$	$1.0 \times 10^5$	$7 \times 10^2$
Atmospheric composition (mol/mol)			
CO <sub>2</sub>	0.96	$4 \times 10^{-4}$	0.95
N <sub>2</sub>	$3.4 \times 10^{-2}$	0.78	$2.7 \times 10^{-2}$
O <sub>2</sub>	$6.9 \times 10^{-5}$	0.21	$1.3 \times 10^{-3}$
H <sub>2</sub> O	$3 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-2}$	$3 \times 10^{-4}$

**Terra antes da presença de vida**

**0,98**

**1**

**traços**

**~85**

Temperatura (°C)

400 a 550

-20 a 40

-130 a 25

# Referências bibliográficas

John F. Nunn, **Evolution of the atmosphere**,  
*Proceedings of the Geologists' Association*, 109, 1-13, 1998

KASTING, J. F. 1993. **Earth's early atmosphere**. *Science*, 259, 920-926

James F. Kasting and M. Tazewell Howard, **Atmospheric composition and climate on the early Earth**, *Phil. Trans. R. Soc. B* (2006) 361, 1733–1742

**“Atmospheric Chemistry and Global Change”, 2000**

Guy P. Brasseur; John J. Orland; Geoffrey S. Tyndall

**“Principles of Atmospheric Physics and Chemistry”**

Richard Goody

**“As eras de Gaia”**

James Lovelock

# Referências da Internet

## **Niel Brandt's Astronomy 1 Page: Astronomical Universe**

*<http://www.astro.psu.edu/users/niel/astro1/astro1.html>*

## **Earth's Early Years: Differentiation, Water and Early Atmosphere**

*[http://www.globalchange.umich.edu/globalchange1/current/lectures/first\\_billion\\_years/first\\_billion\\_years.html](http://www.globalchange.umich.edu/globalchange1/current/lectures/first_billion_years/first_billion_years.html)*

## **History of Earth**

*<http://www.mansfield.ohio-state.edu/~sabedon/biol1010.htm>*

## **The Beginning of Life and Amphiphilic Molecules: an Introduction**

*<http://www.bioteach.ubc.ca/Biodiversity/origin/>*

## **Software: Gravity and Galaxies Simulation**

Stephen Brooks's Website: *<http://stephenbrooks.org>*

## **Software: Celestia**

*<http://www.shatters.net/celestia/>*

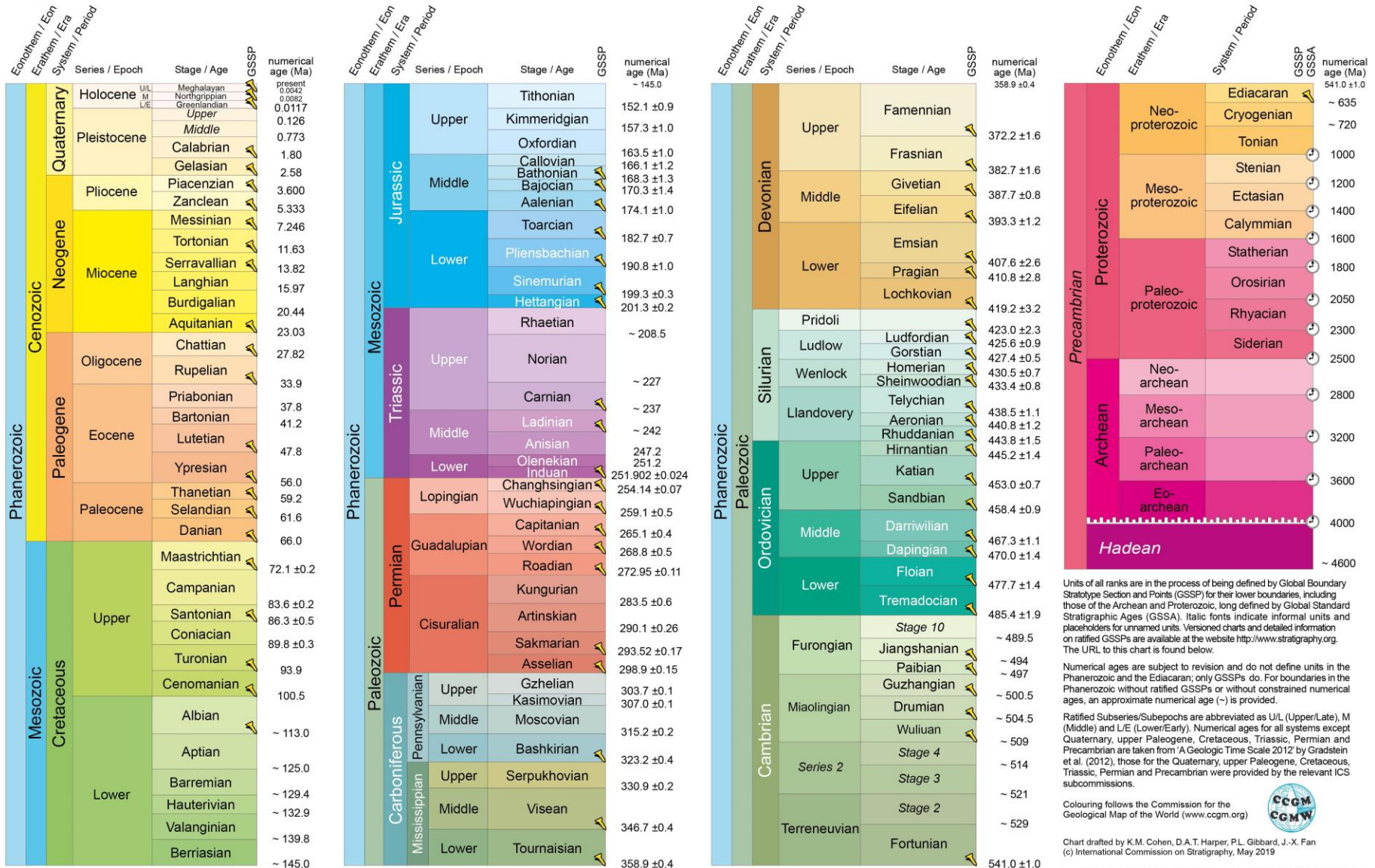


# INTERNATIONAL CHRONOSTRATIGRAPHIC CHART

www.stratigraphy.org

International Commission on Stratigraphy

v 2019/05



<http://www.stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2019-05.jpg>

Units of all ranks are in the process of being defined by Global Boundary Stratotype Section and Points (GSSP) for their lower boundaries, including those of the Archean and Proterozoic, long defined by Global Standard Stratigraphic Ages (GSSA). Italic fonts indicate informal units and placeholders for unnamed units. Versioned charts and detailed information on ratified GSSPs are available at the website <http://www.stratigraphy.org>. The URL to this chart is found below.

Numerical ages are subject to revision and do not define units in the Phanerozoic and the Ediacaran; only GSSPs do. For boundaries in the Phanerozoic without ratified GSSPs or without constrained numerical ages, an approximate numerical age (~) is provided.

Ratified Subseries/Subepochs are abbreviated as U/L (Upper/Late), M (Middle) and L/E (Lower/Early). Numerical ages for all systems except Quaternary, upper Paleogene, Cretaceous, Triassic, Permian and Precambrian are taken from 'A Geologic Time Scale 2012' by Gradstein et al. (2012), those for the Quaternary, upper Paleogene, Cretaceous, Triassic, Permian and Precambrian were provided by the relevant ICS subcommissions.

Colouring follows the Commission for the Geological Map of the World ([www.cgmw.org](http://www.cgmw.org))

Chart drafted by K.M. Cohen, D.A.T. Harper, P.L. Gibbard, J.-X. Fan (c) International Commission on Stratigraphy, May 2019

To cite: Cohen, K.M., Finney, S.C., Gibbard, P.L. & Fan, J.-X. (2013; updated) The ICS International Chronostratigraphic Chart. Episodes 36: 199-204.

URL: <http://www.stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2019-05.pdf>