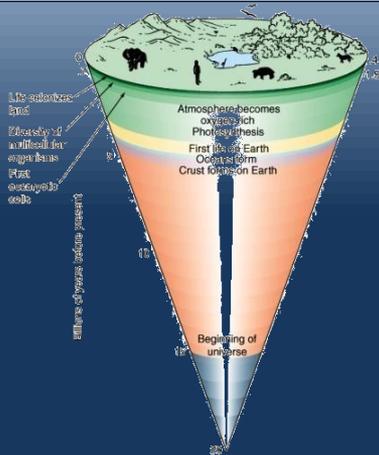
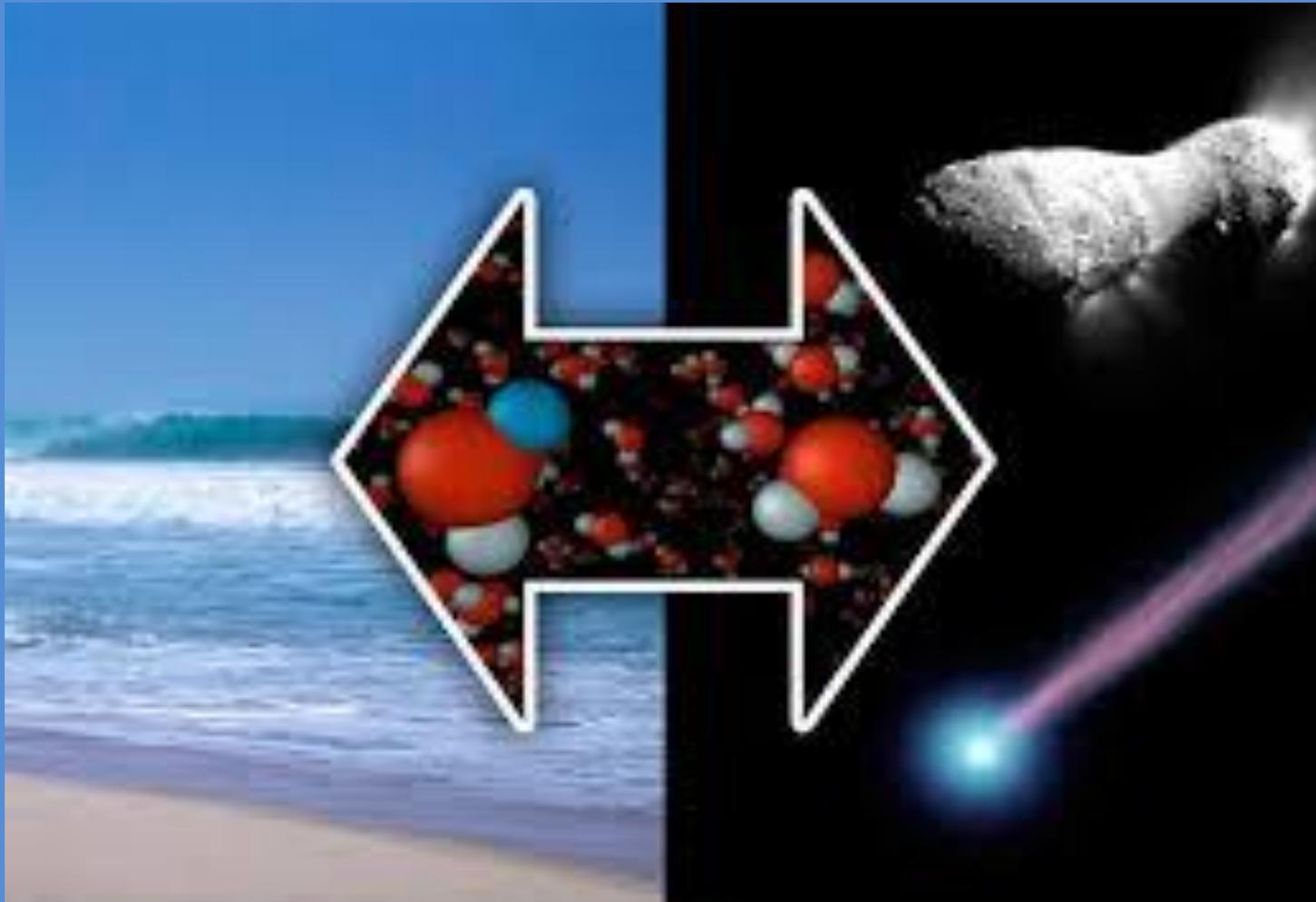


Origem geoquímica dos oceanos



Profa. Rosalinda C. Montone
IOUSP

Origem geoquímica dos oceanos



<https://www.youtube.com/watch?v=1S5RmoXjtLM>

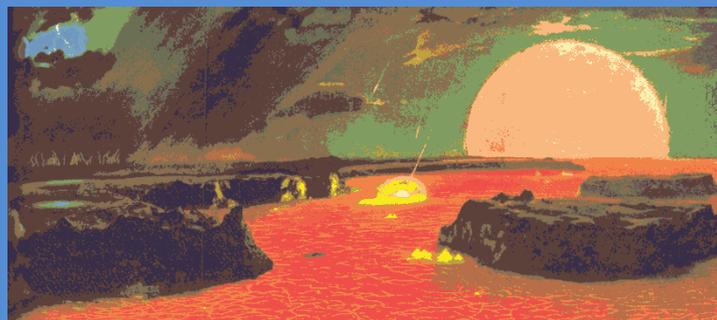
Origem geoquímica dos oceanos

2 hipóteses:

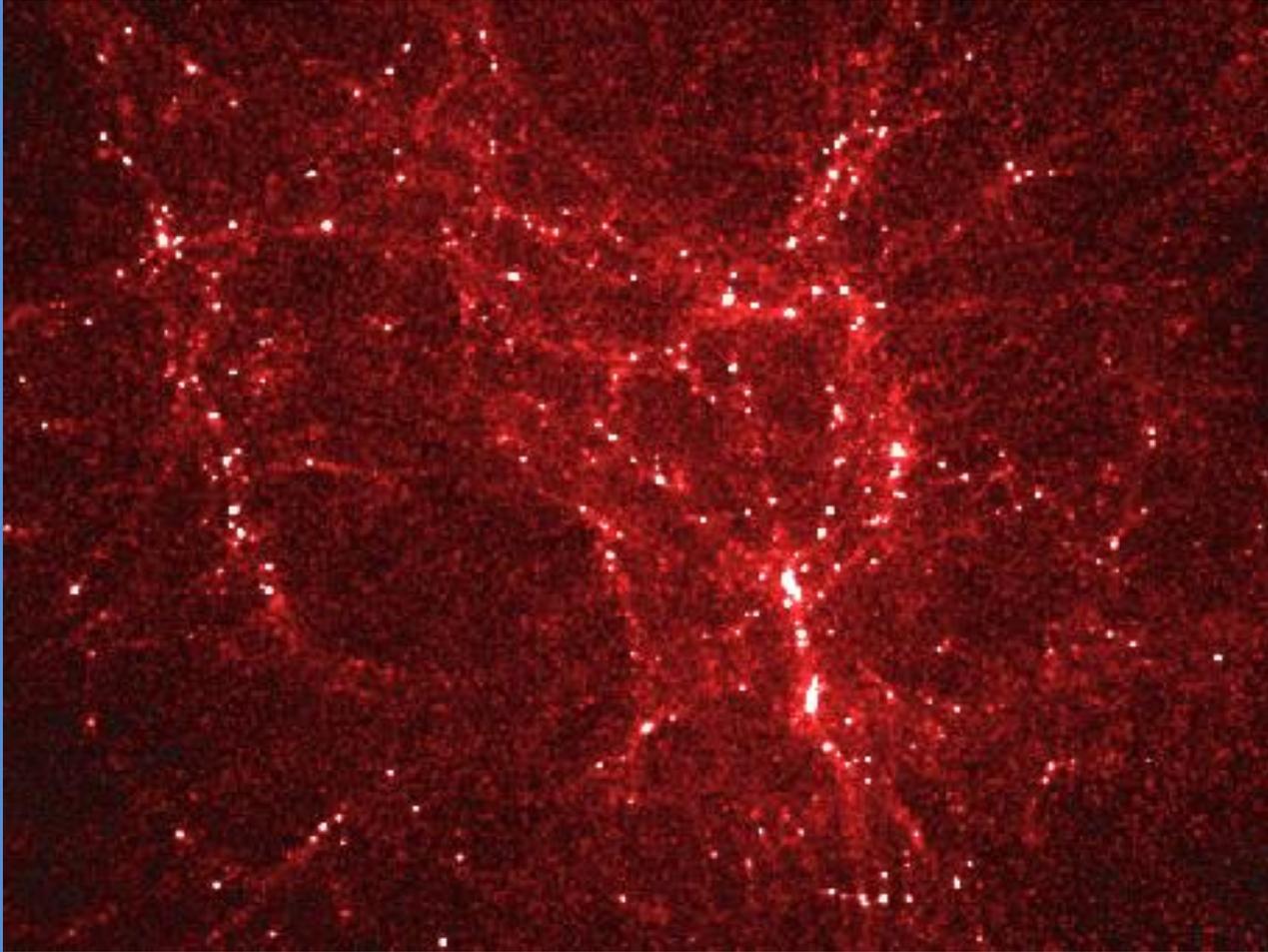
1) Vulcanismo

- a. Desgaseificação gradual da Terra
- b. condensação
- c. Intemperismo da crosta terrestre

2) Cometas e meteoros

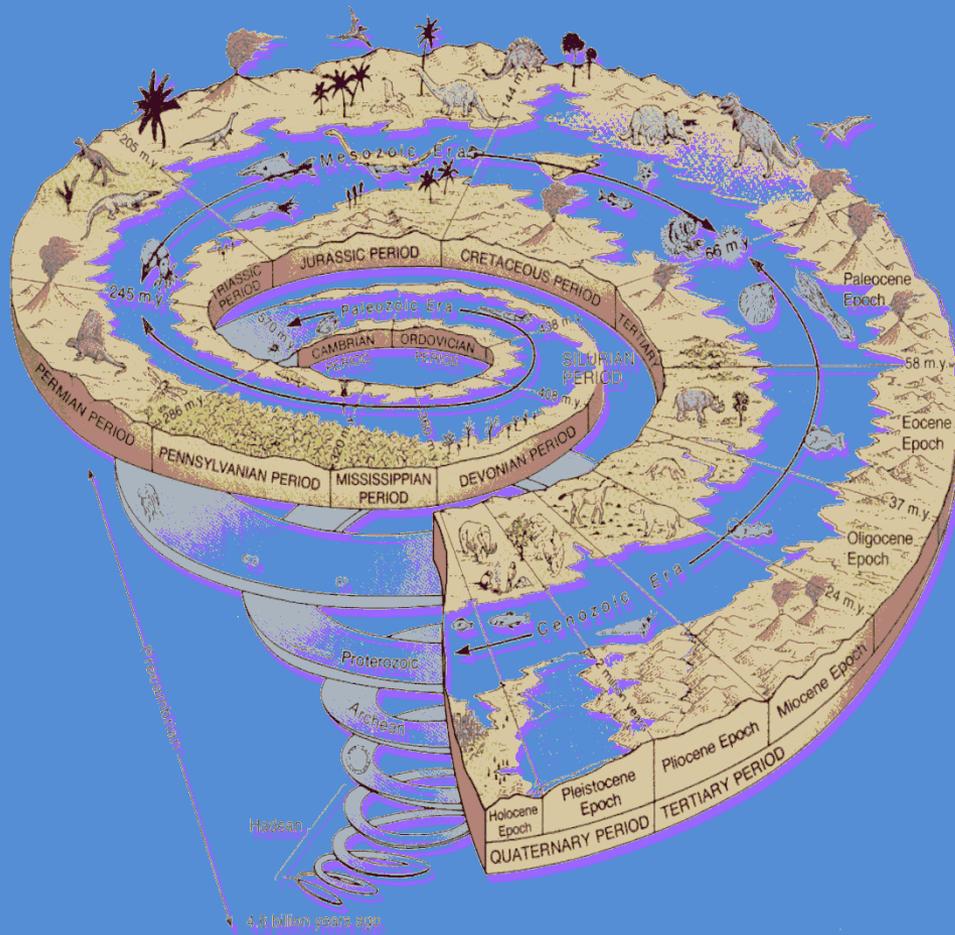


Origem geoquímica dos oceanos



- origem do Universo

Origem geoquímica dos oceanos

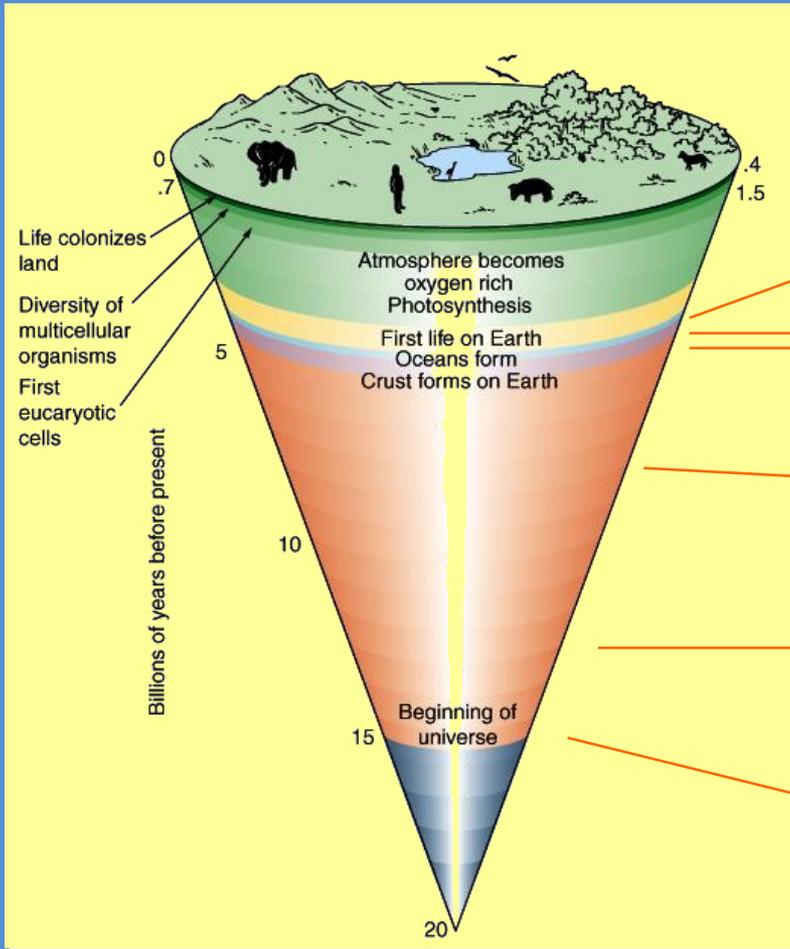


Para entender a origem dos oceanos é necessário entender a formação da atmosfera e biosfera durante as eras geológicas

• evolução da Terra

A Terra formou-se de material interestelar

Origem geoquímica dos oceanos



~ 3,0 bi - formação oceanos

~ 5 bi - formação Sistema Solar

~ 4,5 bi - formação planeta Terra

~ 7 bi - formação Via Láctea

~13 bi - Primeiras estrelas & galáxias

~14 bi Big Bang
Início do universo

De: Thurman & Burton

Origem geoquímica dos oceanos

- como surgiram os oceanos?

Atmosfera inicial da Terra
Gases inertes
Kr, Xe, Ne, Ar, He
H₂, NH₃ e CH₄

É o resultado de um longo
processo geológico



4,5 bi

T = 8000°C

T° muito altas ∴ H₂O ausente

**Processos
de
resfriamento**

Origem geoquímica dos oceanos



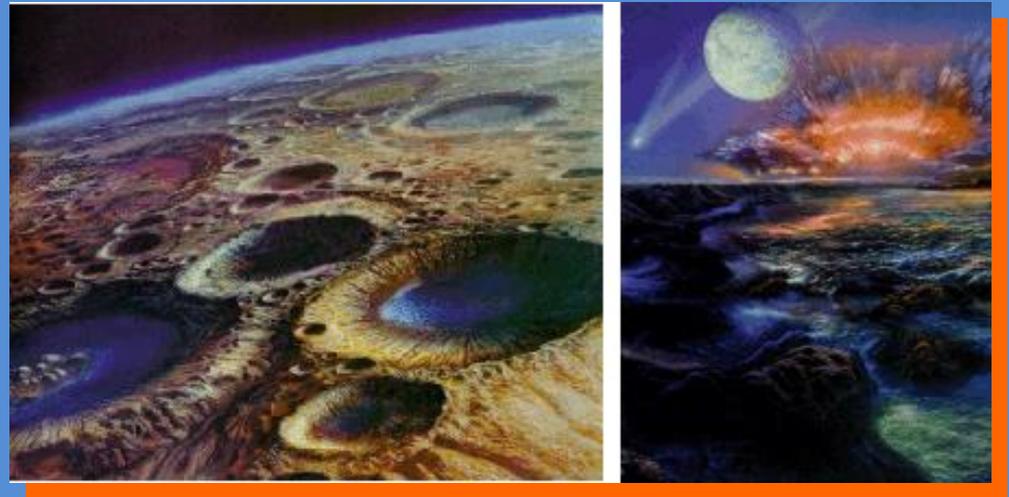
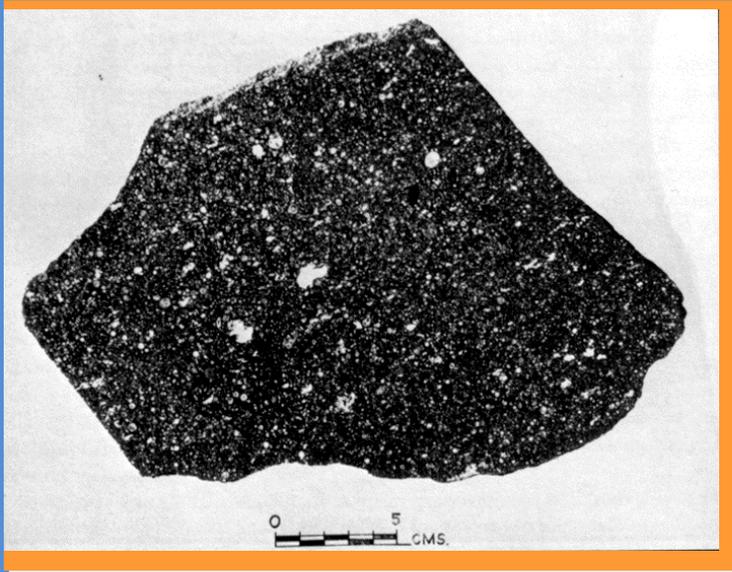
**Sabe-se que a Terra sofreu impactos de asteróides e meteoritos
Superfície da Terra destruída várias vezes**

Origem geoquímica dos oceanos

C/ este impacto de energia seria suficiente para expelir gases para o espaço

3,8 bi

T = 374°C



Origem geoquímica dos oceanos

Processos de resfriamento

nova atmosfera

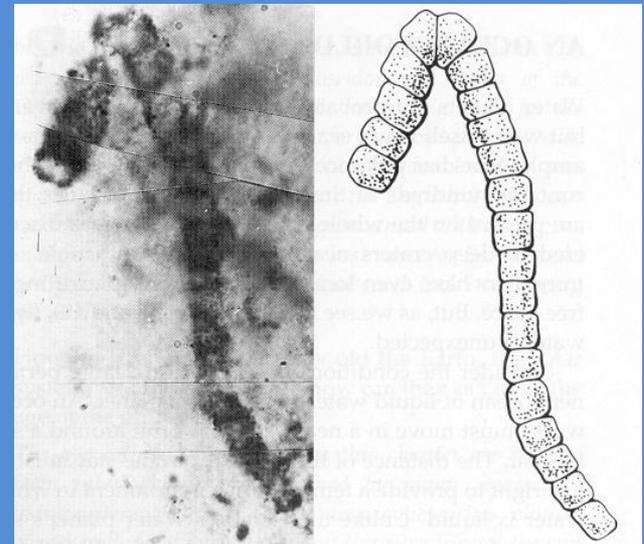
**H₂, N₂, H₂S, CO, Cl₂,
CO₂ Vapor d'água**

Voláteis ocluídos em rochas
igneas (FeO e Fe₂O₃) sofreram
processos de desgasificação
“**Voláteis em excesso**”



3,6 bi

Registro dos primeiros organismos celulares
“**fósseis de estromatólitos**”
e tem sido usados em estudos da origem da
vida primitiva e variações das condições
ambientais pretéritas



~ cm de espessura

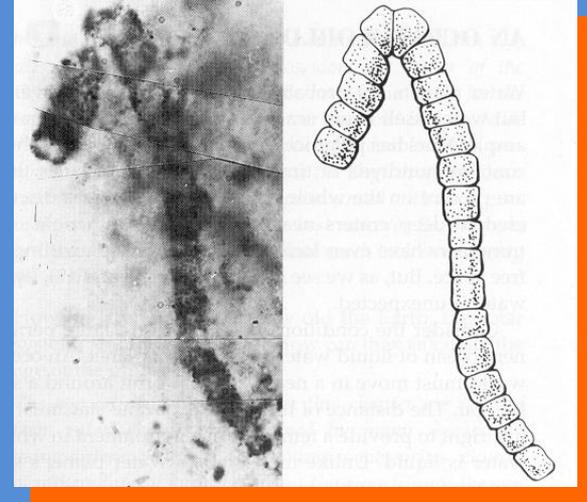
Origem geoquímica dos oceanos

Estromatólitos

são estruturas biosedimentares formadas através da precipitação do carbonato de cálcio, por atividade de cianobactérias

(grupo de bactérias fotossintetizantes)

Microrganismos sem membrana nuclear que obtêm energia por fotossíntese semelhante ao das algas.



Estromatólitos do [Lago Thetis](#), na [Austrália](#) Ocidental, Oceania.
Fonte: Wikipedia

Ainda existem no planeta!! Têm sido descritos em regiões marinhas, hipersalinas e ambientes lacustres, assim como em riachos calcários.

Ex: Na Austrália

Crescem em comunidades que se assemelham a um recife de coral

Origem geoquímica dos oceanos

Estromatólito - Groenlândia

Depósito de rochas sedimentares abaixo da camada de gelo

datação: **3,7 bilhões de anos**



Foto: Laure Gauthiez/The Australian National University via AP

Foto: Allen Nutman/University of Wollongong via AP.

Allwood et al. 2018. Reassessing evidence of life in 3,700-million-yearold rocks of Greenland. Nature, 563 – 241-257.

<https://doi.org/10.1038/s41586-018-0610-4>

<http://g1.globo.com/ciencia-e-saude/noticia/2016/08/cientistas-dizem-ter-encontrado-fossil-mais-antigo-do-mundo-na-groenlandia.html>

Origem geoquímica dos oceanos

- como surgiram os oceanos?

nova atmosfera

**H₂, N₂, H₂S, CO, Cl₂,
CO₂ Vapor d'água**

Água na forma líquida passou a existir quando a temperatura atingiu 100°C

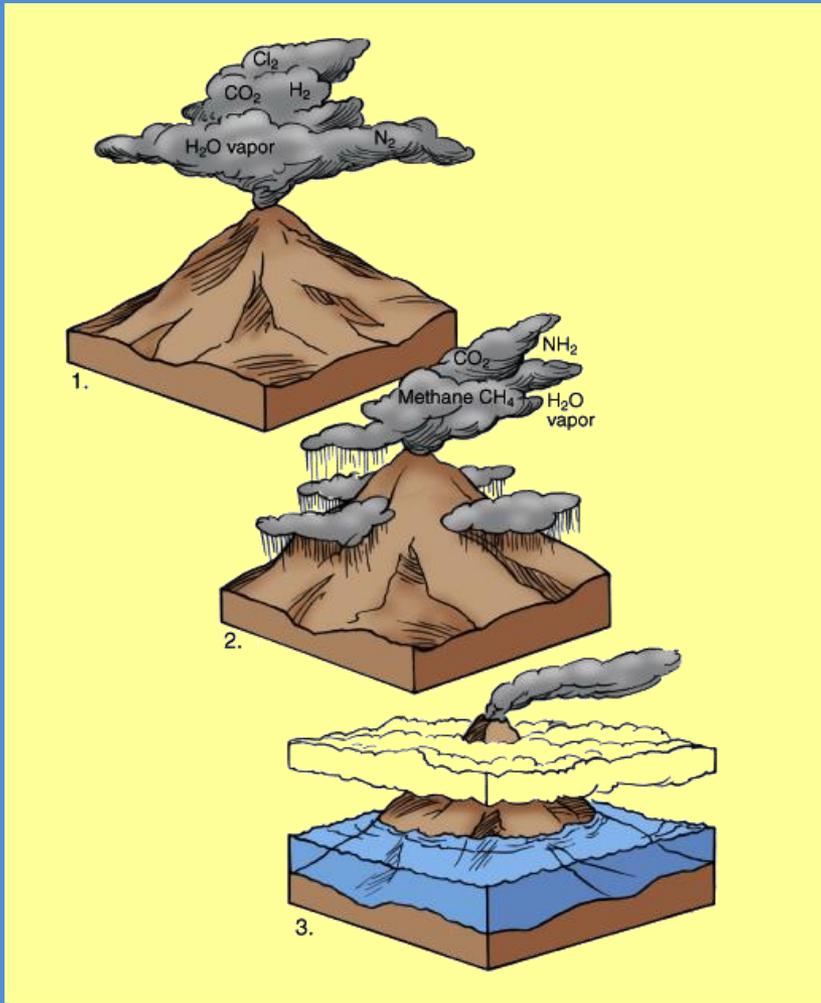
3,0 bi

T ≤ 100°C



Origem geoquímica dos oceanos

Teoria do geólogo americano Rubey (1951)



- **formação dos oceanos**

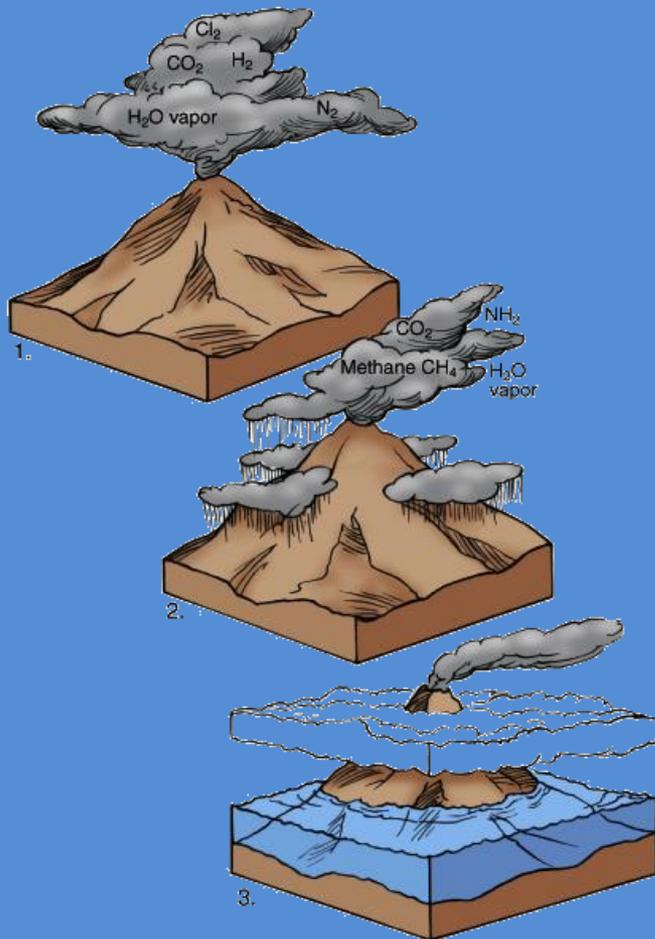
Toda água do planeta originou-se do interior da Terra por atividade vulcânica

E os oceanos começaram a se formar com o resfriamento da Terra e condensação da água

Primeiro oceano é formado!

Origem geoquímica dos oceanos

- teoria dos voláteis em excesso



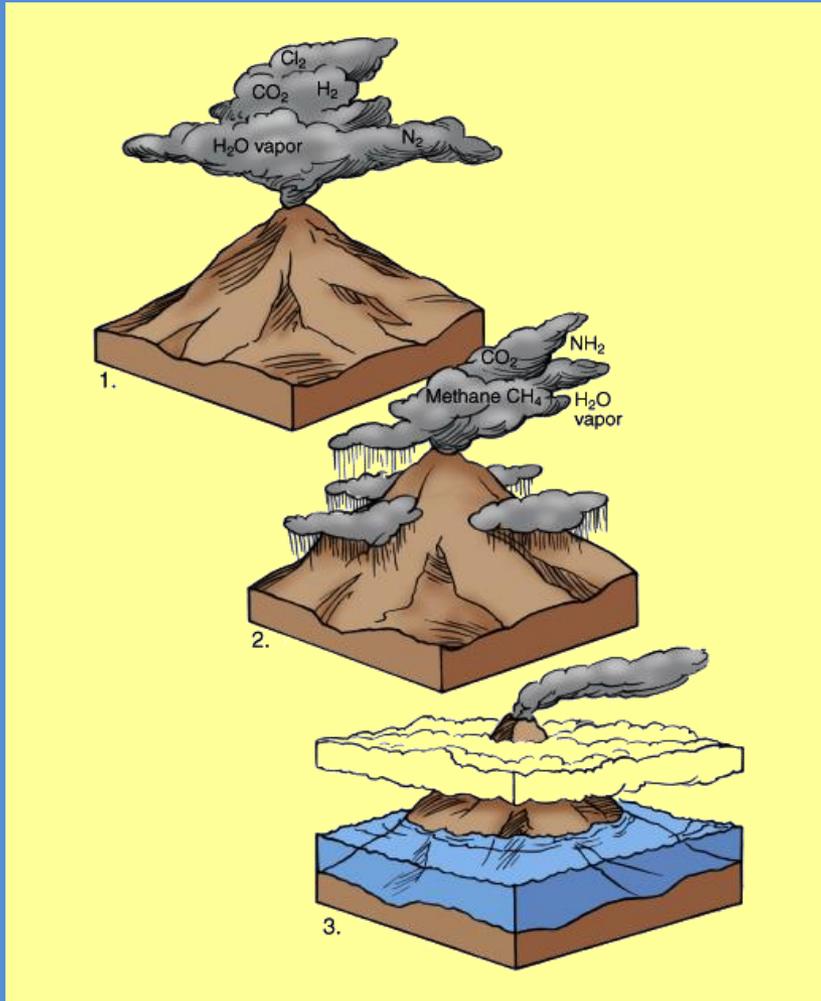
O vapor condensava e formava verdadeiros **dilúvios**

Processo intermitente durou \sim 100 milhões de anos

Evaporação/precipitação auxiliou no abaixamento da temperatura do planeta

Origem geoquímica dos oceanos

Teoria do geólogo americano Rubey (1951)

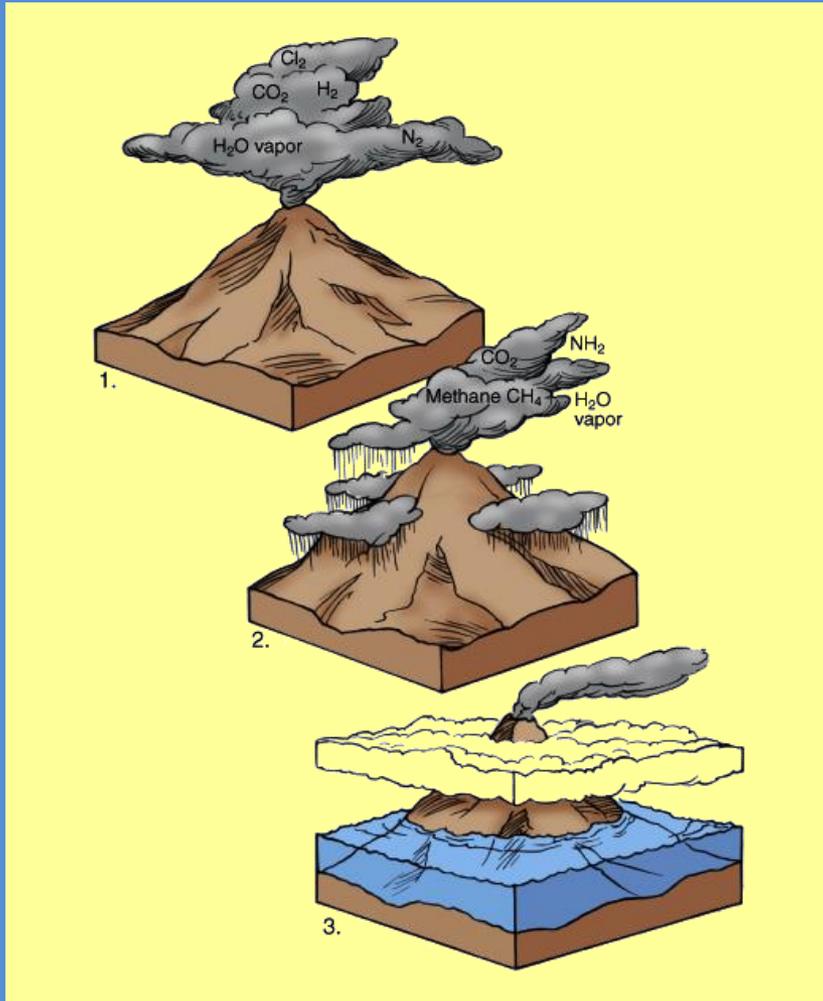


- primeiros ciclos geodinâmicos

Formação dos primeiros solos, erosão, transporte, depósitos marinhos e formação dos primeiros sedimentos

Origem geoquímica dos oceanos

Teoria do geólogo americano Rubey (1951)



- Interação da hidrosfera, atmosfera e litosfera

Ciclos geoquímicos dominantes:

Dissolução dos gases atmosféricos
formando: HCl , H_2S e H_2CO_3

Alteração dos silicatos da crosta terrestre fornecendo sílica, cátions básicos e argila

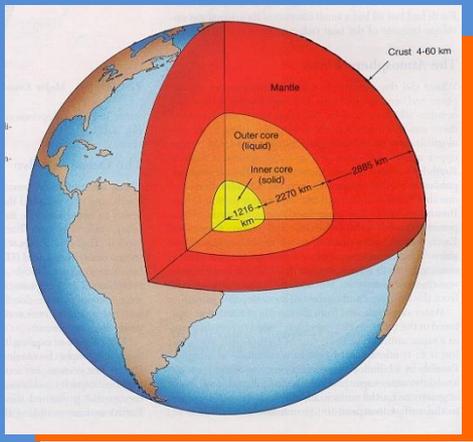
Origem geoquímica dos oceanos

- formação dos oceanos

A quantidade de água formada era suficiente para formar os oceanos???

$$M_{\text{manto}} = 4,0 \times 10^{27} \text{ g}$$
$$M_{\text{oceano}} = 1,4 \times 10^{24} \text{ g}$$

$$\frac{M_{\text{oceano}}}{M_{\text{manto}}} = 0,035\%$$



Conteúdo de água do manto = 0,5 %

14 x a quantidade necessária

∴ o manto teria água suficiente para formar os oceanos

Origem geoquímica dos oceanos

- teoria dos voláteis em excesso



A desgaseificação após a formação da Terra seria uma consequência de:

- 1. Metamorfose termal rápida da Terra ou**
- 2. Processo contínuo da ação vulcânica durante as escalas de tempo geológico**

Origem geoquímica dos oceanos

- **ainda não existe uma evidência inequívoca**

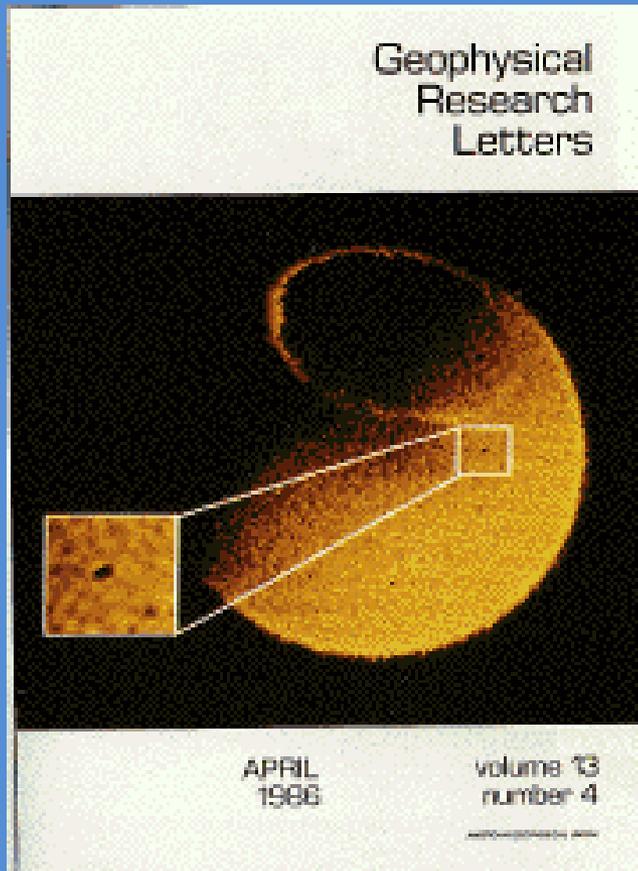


- **Idade da Terra inferida por meteoritos
~4,5 bilhões de anos, enquanto que rochas
mais antigas datam de 4,0 bilhões de anos.
E o registro dos 0,5 bilhões de anos???**
- **Não existem evidências claras da emissão
dos voláteis do manto da Terra a partir de
vulcões e fontes termais (dificuldade para
quantificar)**

Origem geoquímica dos oceanos

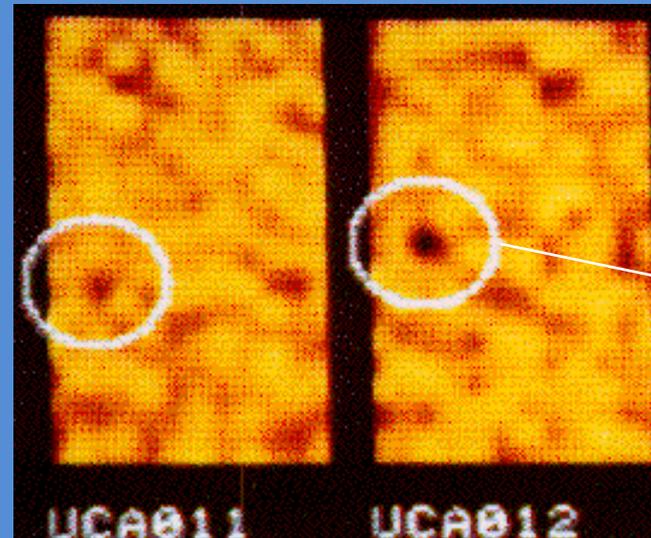
Outra teoria:

do astrônomo Louis A. Frank - Universidade Iowa – USA (1986)



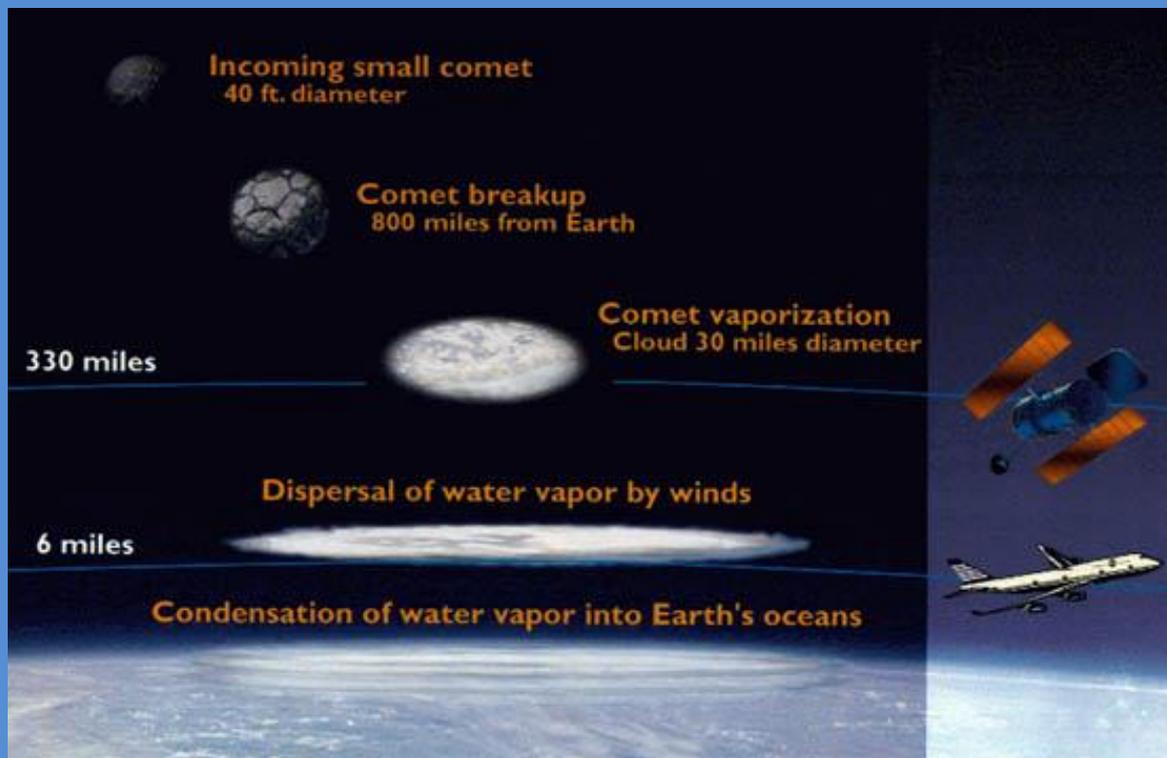
Mini-cometas
Bolas de gelo $\varnothing = 9$ m
Taxa = 20/minuto

- Terra receberia 0,0025 mm H₂O/ano



Cometas
vaporizando

Origem geoquímica dos oceanos



A luz solar é uma fonte de energia muito eficiente para converter o gelo do cometa em uma nuvem de água

Seqüência de eventos para a quebra de um pequeno cometa à medida que mergulha em direção à atmosfera da Terra

<http://sdrc.lib.uiowa.edu/preslectures/frank99/>

limitações das hipóteses

➤ Vulcanismo

Degaseificação gradual da Terra
-> **salinidade deveria aumentar**

Condensação

-> **atmosfera não poderia conter toda água dos oceanos**

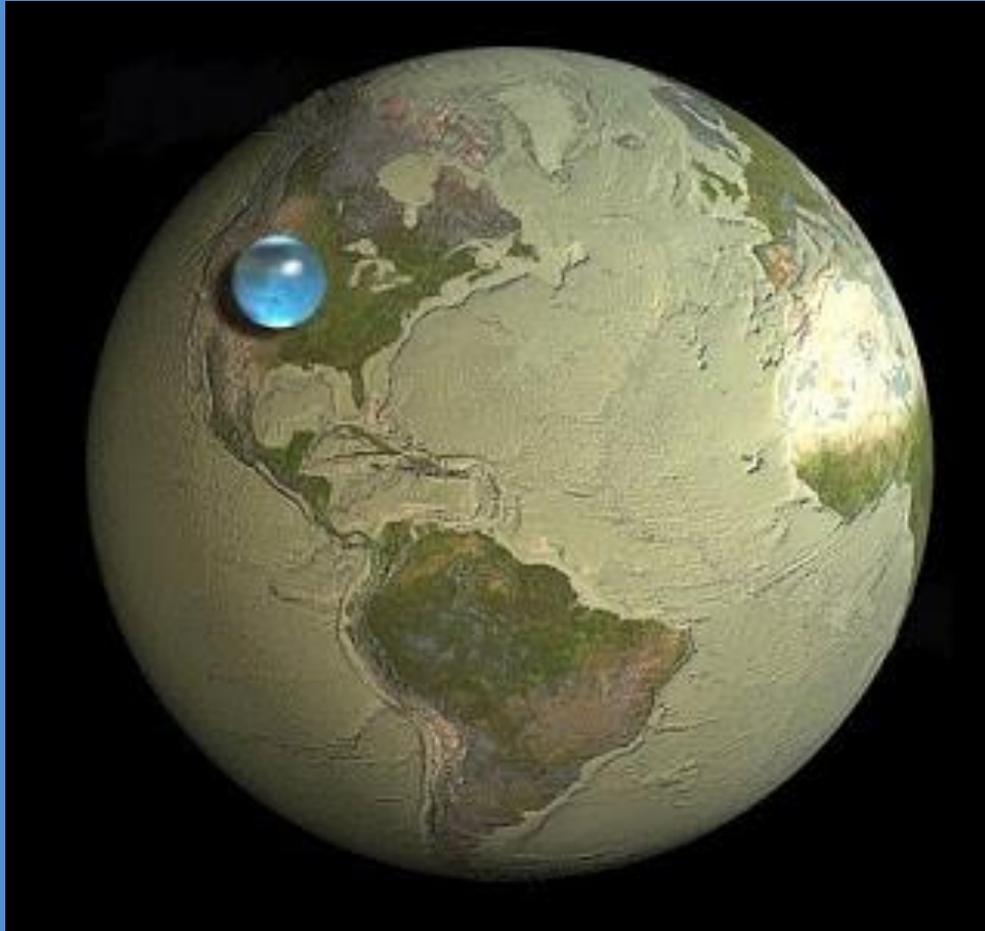
Intemperismo da crosta terrestre -> **apenas os íons da crosta não explicam a composição da água do mar**

➤ Cometas e meteoros

- > **conteúdo de água limitado**



Qual a origem dos oceanos?



esfera c/ 380 e 670 km de raio, dependendo da estimativa.
Fonte: Jack Cook, Woods Hole Oceanographic Institution; USGS.

Origem geoquímica dos oceanos

Interior da Terra tem água do mar
Equivalente a ~10% água do mar do
planeta

geólogos da Universidade Manchester

nature

Vol 441|11 May 2006|doi:10.1038/nature04761

ARTICLES

Seawater subduction controls the heavy noble gas composition of the mantle

Greg Holland¹ & Chris J. Ballentine¹

The relationship between solar volatiles and those now in the Earth's atmosphere and mantle reservoirs provides insight into the processes controlling the acquisition of volatiles during planetary accretion and their subsequent evolution. Whereas the light noble gases (helium and neon) in the Earth's mantle preserve a solar-like isotopic composition, heavy noble gases (argon, krypton and xenon) have an isotopic composition very similar to that of the modern atmosphere, with radiogenic and (in the case of xenon) solar contributions. Mantle noble gases in a magmatic CO₂ natural gas field have been previously corrected for shallow atmosphere/groundwater and crustal additions. Here we analyse new data from this field and show that the elemental composition of non-radiogenic heavy noble gases in the mantle is remarkably similar to that of sea water. We challenge the popular concept of a noble gas 'subduction barrier' — the convecting mantle noble gas isotopic and elemental composition is explained by subduction of sediment and seawater-dominated pore fluids. This accounts for ~100% of the non-radiogenic argon and krypton and 80% of the xenon. Approximately 50% of the convecting mantle water concentration can then be explained by this mechanism. Enhanced recycling of subducted material to the mantle plume source region then accounts for the lower ratio of radiogenic to non-radiogenic heavy noble gas isotopes and higher water content of plume-derived basalts.

(Holland & Ballantine, 2006. Nature)

Um oceano sob o oceano



Vulcão oceânico do Havai



Origem geoquímica dos oceanos

Estudo propõe nova teoria sobre origem da água na Terra



Centre National de Recherche Scientifique (CNRS) – Université de Lorraine (Science, 2020)

Cosmoquímica L. Piani e colaboradores água presente na Terra desde o início de sua formação

Meteoritos condritos enstatitos são responsáveis por 95% água do mar



Formados no primeiro milhão de anos do Sistema Solar

“A composição isotópica do hidrogênio dos condritos enstatites é semelhante à da água armazenada no manto terrestre”

“A composição isotópica dos oceanos foi considerada consistente com uma mistura contendo 95% de água dos meteoros, mais uma prova de que eles eram responsáveis pela maior parte da água do planeta”.

Piani et al. 2020. Earth's water may have been inherited from material similar to enstatite chondrite meteorites. Science 369, 1110–1113.

Origem geoquímica dos oceanos

**A água veio do interior da Terra? Através de cometas?
Através de asteroides carbonáceos ou enstatites?
Ou a água já estava aqui na formação da terra?**

<https://www.youtube.com/watch?v=QRhHZsWngZ8>

<https://www.youtube.com/watch?v=0O5Y74uxe84>

Origem geoquímica dos oceanos

Hipótese mais plausível para a formação dos oceanos

Balances geoquímicos:

Comparação da composição das rochas ígneas primitivas sujeitas ao intemperismo com as rochas sedimentares

- **1933 – W. M Goldschmidt propôs o método**

160 kg de rocha ígnea → 169,6 kg de rocha sedimentar

hidrosfera

composição média da rocha sedimentar

balanço geoquímico



Goldschmidt, W. M. "Osnovy kolichestvennoi geokhimii." *Uspekhi khimii*, 1934, vol. 3, issue 3. (Translated from German.)

Ronov, A. B., and A. A. Iaroshevskii. "Khimicheskoe stroenie zemnoi kory." *Geokhimiia*, 1967, no. 11.

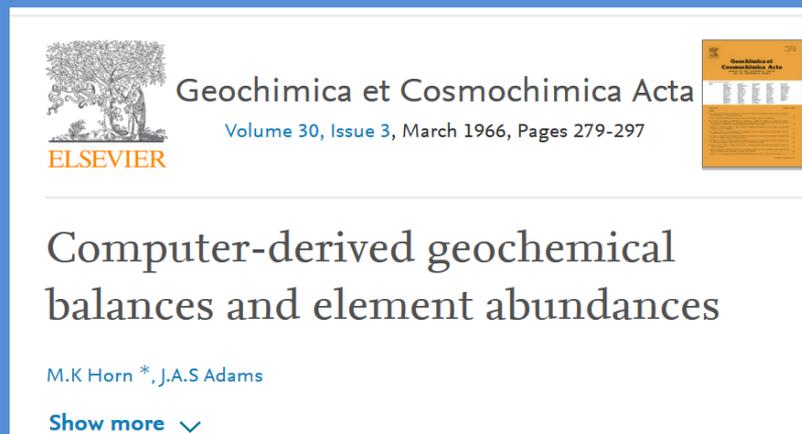
<https://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Geochemical+Balance>

Origem geoquímica dos oceanos

- **1966 – Horne & Adams demonstraram que a equação era balanceada para ~60 elementos**

Utilizando computadores digitais de alta velocidade na época, Horn & Adams propuseram uma nova abordagem para o balanceamento geoquímico foi desenvolvida. A entrada no sistema consistiu em:

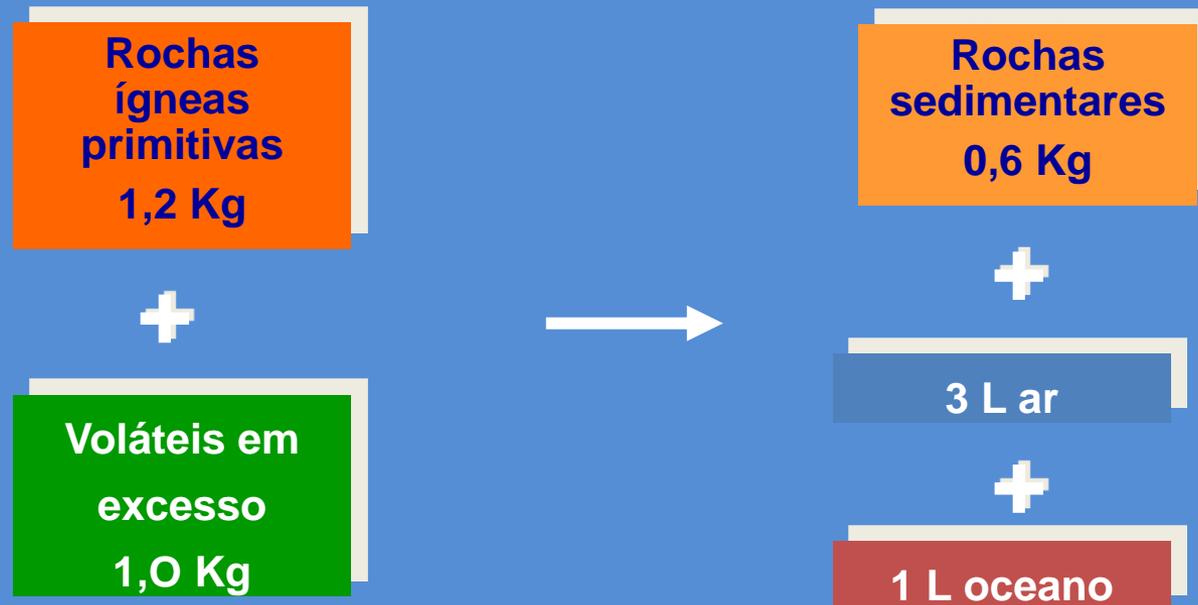
- (a) estimativas físicas (por exemplo, volume) de seis domínios sedimentares e marinhos da crosta terrestre; e
- (b) dados de abundância geoquímica mínima e máxima (derivados de quarenta e quatro listas publicadas) para sessenta e cinco elementos em oito categorias litológicas.



Apesar de suposições não comprovadas e muitos dados incertos, a equação geoquímica forneceu uma série de verificações internas nos dados de abundância elementar e isotópica.

Origem geoquímica dos oceanos

Balancos geoquímicos: Horne & Adams, 1966



A equação ou equilíbrio geoquímico clássico assume que todos os sedimentos foram derivados de rochas ígneas.

Elementos que não podem ser equilibrados: cloro, boro, enxofre, manganês, arsênio, selênio, bromo, molibdênio, iodo e chumbo

Provavelmente devido a **contribuições vulcânicas** importantes e/ou dados inadequados

Origem geoquímica dos oceanos

balanço geoquímico dos oceanos

- 1974 – Lafon & Mackenzie reavaliaram o modelo com auxílio de computadores concluindo que:
 - a composição final é igual à água do mar
 - o pH da solução é básico (> 7) e aumenta a medida que a reação prossegue indicando a natureza ácido base da reação
 - a sílica amorfa estaria em excesso em relação aos cálculos teóricos
 - a salinidade seria o dobro
(não prevê a retirada do NaCl para o sedimento)

Lafon, M. G. and Mackenzie, F. T. 1974. Early evolution of the oceans: A weathering model, in: Studies in Paleoceanography, edited by: Hay, W. W., Soc. Econ. Pa., 20, 205–218.



Frederick T. Mackenzie

Origem geoquímica dos oceanos

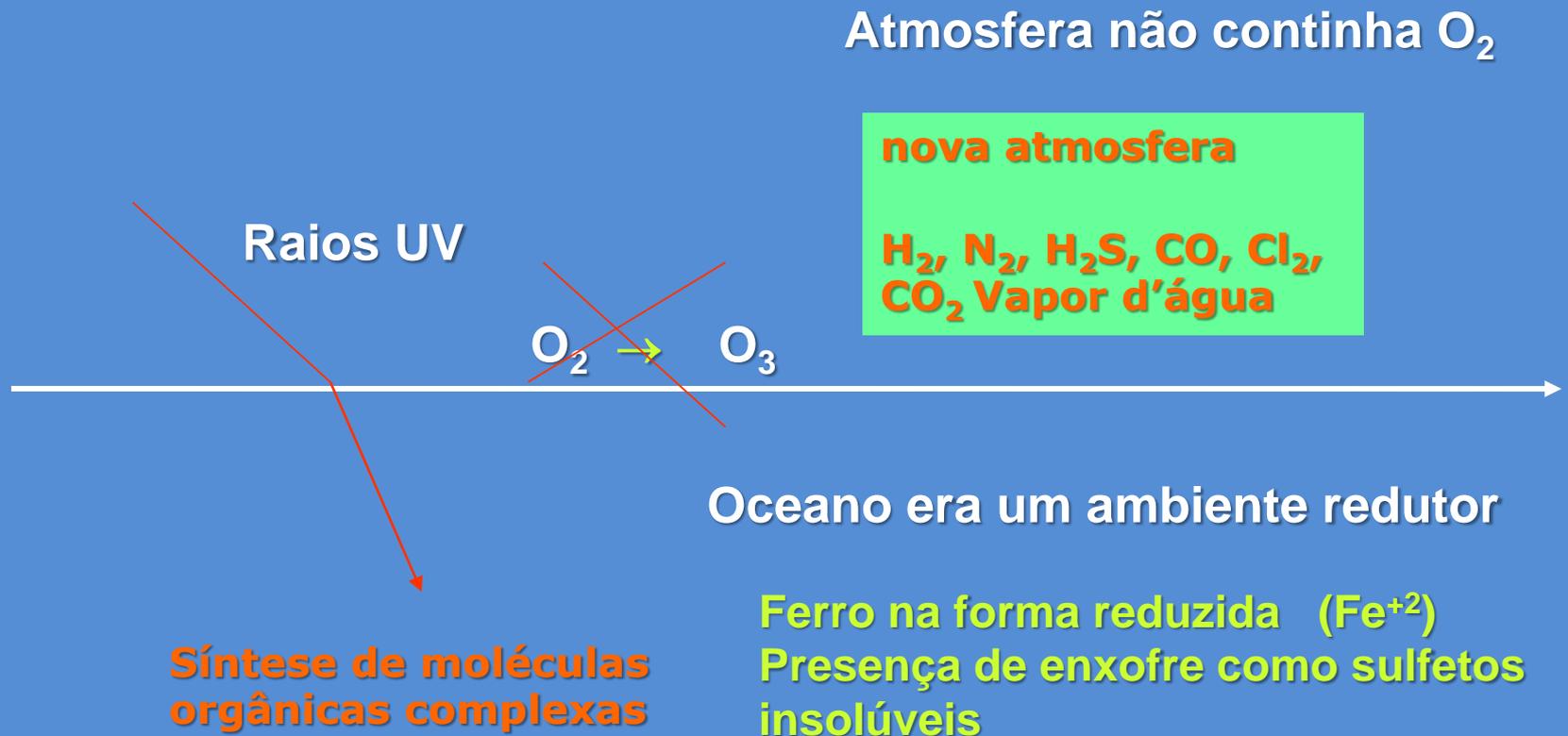
- Como seria o oceano primitivo?



<https://www.youtube.com/watch?v=ikmZsEa30HM>

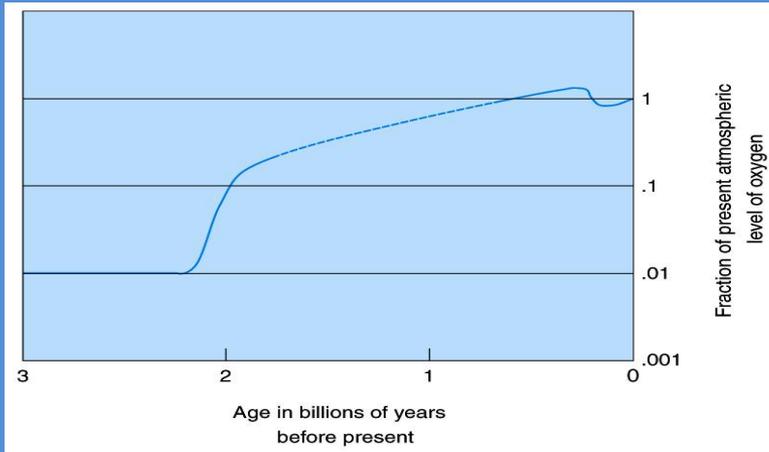
Origem geoquímica dos oceanos

- Como seria o oceano primitivo?



Origem geoquímica dos oceanos

O₂ na atmosfera da Terra

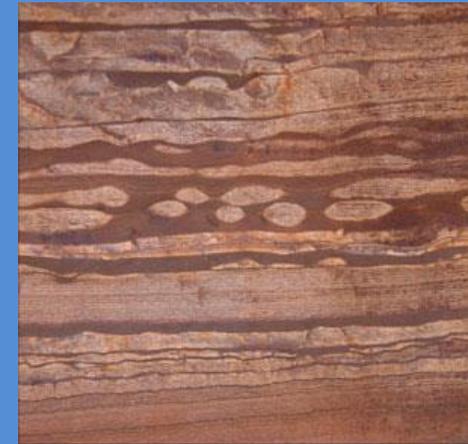


fase inicial de produção de oxigênio durou quase 1 bilhão de anos

Por esse longo período, o oxigênio não alcançava a atmosfera por interagir rapidamente com o ferro de origem vulcânica dissolvido no mar

$$\text{Fe} + \text{O}_2 \rightarrow \text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ (magnetita)}$$

(óxidos de ferro II e III)



<http://revistapesquisa.fapesp.br>

Detalhe da rocha com depósito de ferro oxidado

Origem geoquímica dos oceanos

- Como seria o oceano primitivo?

nova atmosfera

H_2 , N_2 , H_2S , CO , Cl_2 , CO_2 ,
 O_2 , Vapor d'água

Gradativamente O_2 atmosférico
foi se acumulando

1,0 bi

250 mi

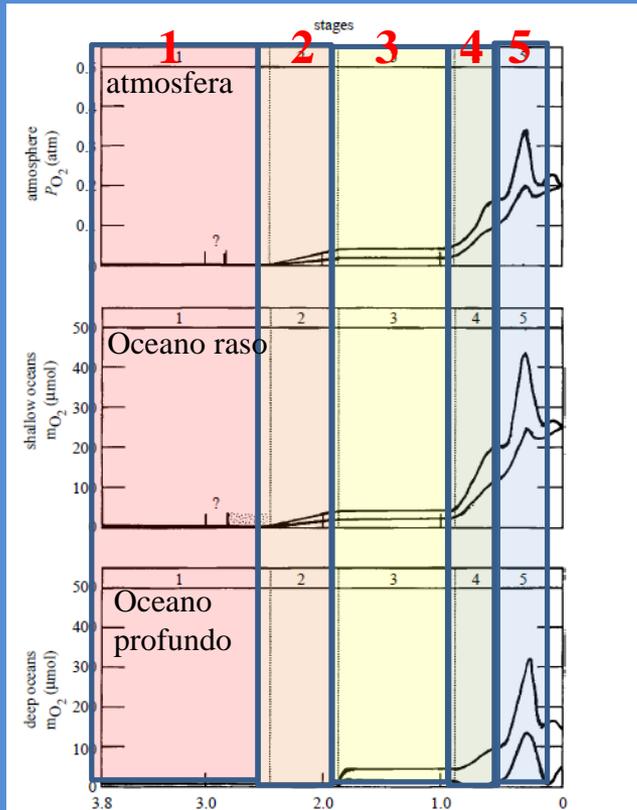


$[O_2]$ ~ cte nos últimos 100-200 milhões de anos

mar atual

$[O_2]$ no oceano atual é o resultado de um
balanço entre produção e consumo

Grande evento de oxigenação



Estágio 1 (3,85-2,45 bilhões de anos):

Praticamente nenhum O_2 na atmosfera. Os oceanos eram também praticamente anóxicos com a possível exceção do O_2 nos oceanos rasos.

Estágio 2 (2,45-1,85 bilhões de anos):

O_2 produzido, com teores subindo a valores de 0,02 a 0,04 atm, mas absorvidos nos oceanos e nas rochas do fundo do mar.

Estágio 3 (1,85-0,85 bilhões de anos):

O_2 começa se desprender dos oceanos, mas é absorvido pelas superfícies terrestres. Não há mudança significativa no nível de oxigênio.

Estágios 4 e 5 (0,85-presente):

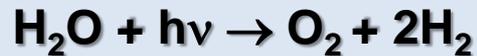
outros reservatórios de O_2 são ocupados: o gás se acumula na atmosfera

Origem geoquímica dos oceanos

- Como surgiu o O_2 ?

Existem 2 teorias:

dissociação do vapor d'água por radiação



aparecimento de algas fotossintetizadoras



Origem geoquímica dos oceanos

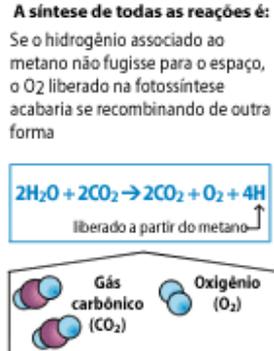
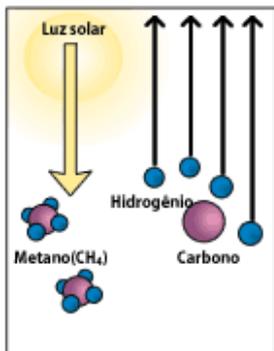
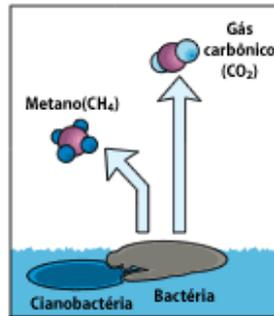
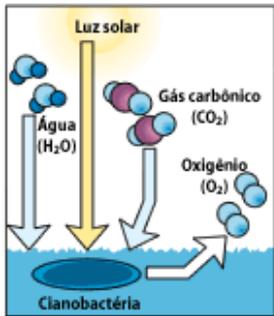
O₂

• Como surgiu o O₂ ?

Pesquisa realizada pelo Dr. Catling NASA (Science, 2001) reforça a 2ª teoria

FÁBRICA DE AR PURO

Além da fotossíntese, produção de metano também foi fundamental para dotar a Terra de oxigênio



Fonte: revista "Science" (www.sciencemag.org)

Cianobactérias mortas liberam metano e gás carbônico

A produção de metano das cianobactérias dissipa hidrogênio



H dissipado libera O para formar O₂

Origem geoquímica dos oceanos

Como se explica o sal no mar??

Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++}

Intemperismo de silicatos e

desgaste de rochas ígneas

Transporte pelo vento e água

Presença de cátions

Cl^- , Br^- , HCO_3^- , $\text{SO}_4^{=}$

Voláteis em excesso

Gases de emanções vulcânicas

Presença de ânions

Composição dos elementos no oceano

Na^+

K^+

Ca^{++}

Mg^{++}

Cl^-

Br^-

HCO_3^- ,

$\text{SO}_4^{=}$

3 fontes principais para os elementos maiores:

- Erupções vulcânicas
- Intemperismos das rochas
- Reações químicas da água do mar e crosta rochosa recém formada e quente



Origem geoquímica dos oceanos

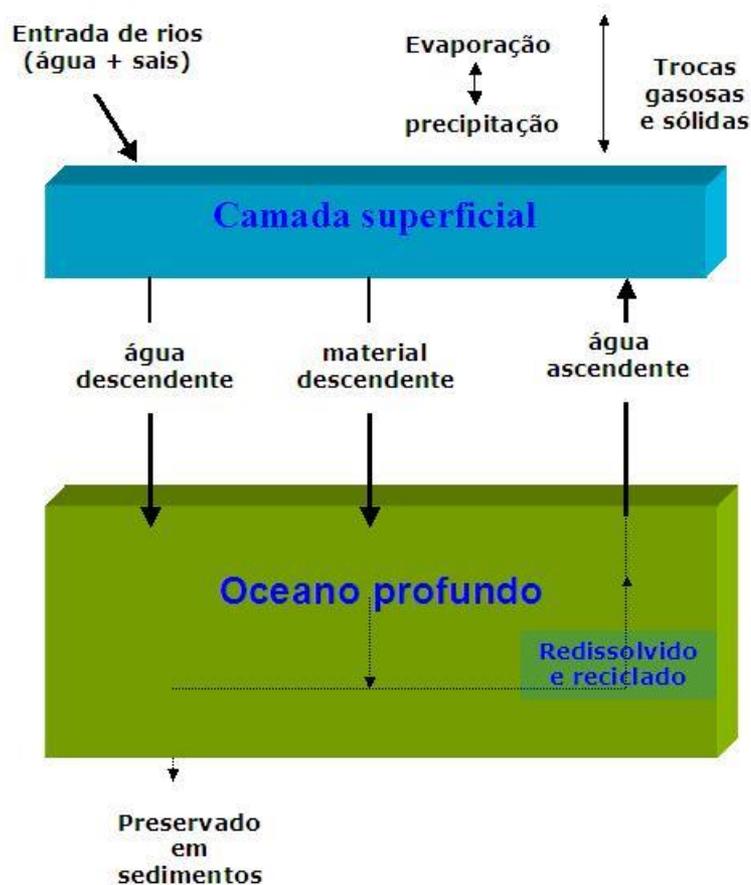


Milhões de anos

composição atual dos oceanos

- Podemos assumir uma composição estável para o oceano desde o fanerozóico ~ 570 milhões de anos
- O aparecimento de vida no mar e a evolução posterior dos organismos marinhos dependeram dessa relativa estabilidade de composição

Origem geoquímica dos oceanos



composição atual dos oceanos

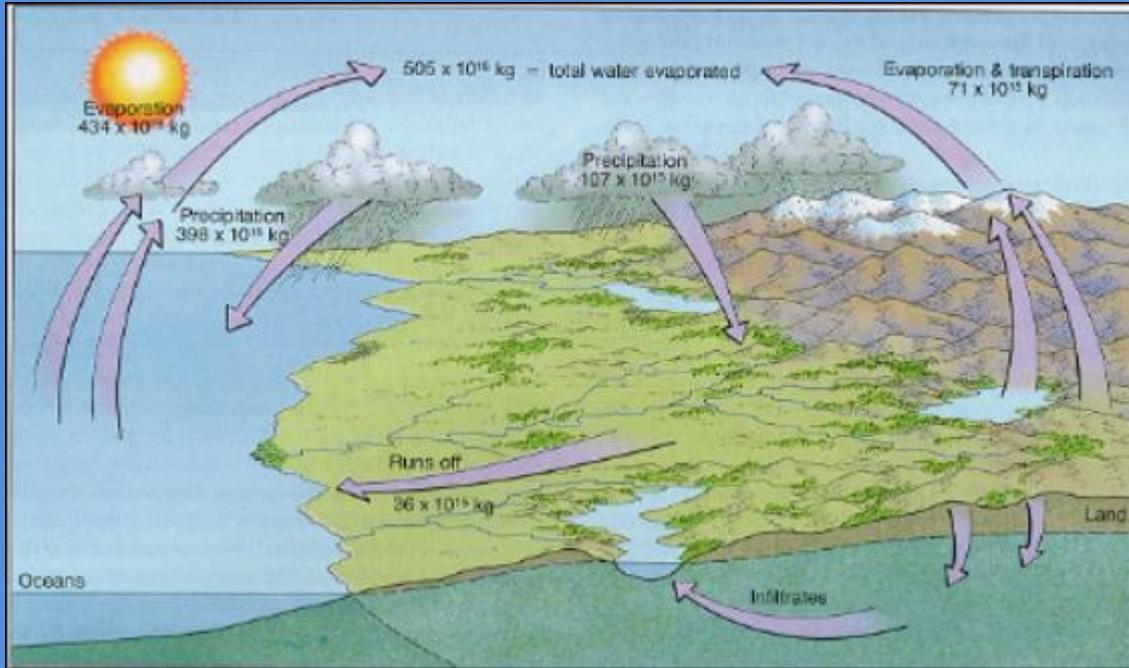
é o resultado de:

- **balanço entre a taxa de introdução (fluxo) no oceano, do material dissolvido da crosta terrestre e da atmosfera e**
- **a taxa de remoção do material dissolvido pela incorporação aos sedimentos e/ou biota, ou retorno à atmosfera**

equilíbrio químico dinâmico da água do mar

Equilíbrio químico dinâmico

Devido ao equilíbrio químico dos sais dissolvidos no oceano, é possível estimar o tempo que cada íon permanece na coluna de água. Este tempo é conhecido como tempo de residência



Ciclo hidrológico

Taxa de evaporação

continentes = 71 x 10¹⁵ litros/ano
oceanos = 434 x 10¹⁵ litros/ano
505 x 10¹⁵ litros/ano

Taxa de precipitação

continentes = 107 x 10¹⁵ litros/ano
oceanos = 398 x 10¹⁵ litros/ano
505 x 10¹⁵ litros/ano