

# ***De um ponto negro a um ponto azul: geosfera, atmosfera e vida***


E. Ivo Alves

Instituto Geofísico, Centro de Geofísica e Departamento de Ciências da Terra  
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

## **Introdução**

Vamos tentar comprimir catorze mil milhões de anos numa hora – um factor de 1 em 122.724.000.000.000, mais ou menos... Para simplificar a nossa tarefa, nesta hora vamos interessar-nos principalmente por aquilo que permitiu o aparecimento e a evolução da vida e, espera-se, a sua continuação na Terra por mais algum tempo.

Esta questão do tempo é fundamental: o autor desta história é geólogo e, como tal, foi treinado para pensar em escalas de tempo muuuito longas. Esta maneira de pensar tem a vantagem de conferir uma certa calma face a anúncios de catástrofes iminentes. Como já se deve ter percebido, o tal autor não é imparcial – alguém o é? – mas vai tentar mostrar aqui mais factos que opiniões e pedir aos participantes que formem as suas próprias opiniões, de maneira crítica e informada, sempre que possível a partir de dados em primeira mão. Mas os dados também raramente são inocentes...

Para ajudar, ao longo do texto vai aparecer algumas vezes esta etiqueta  junto a perguntas que não são respondidas expressamente. Talvez possamos trabalhar depois sobre algumas destas questões.

## **O Big Bang**

Com o Big Bang começou o tempo e o espaço e tudo.

Nas fases iniciais (os primeiros 3 a 20 minutos) formaram-se os protões e electrões, que viriam a constituir o hidrogénio, que ainda é o elemento mais abundante do Universo; mais tarde surgiram os neutrões que, nas enormes temperaturas e pressões vigentes, se combinaram com protões para produzir hélio em reacções de fusão em tudo semelhantes às que ainda se passam no núcleo solar. Só depois de haver grandes quantidades de hélio foram produzidos lítio e berílio, em quantidades vestigiais por o Universo – minúsculo – já estar demasiado “frio”. Tudo isto passou-se nos primeiros 70.000 anos.

A produção dos elementos mais leves está ligada ao nascimento do Universo mas a dos mais pesados necessita da morte das estrelas.

As estrelas começam a morrer quando já não contêm hidrogénio suficiente para sintetizar hélio: crescem desmesuradamente, transformando-se em gigantes vermelhas, e começam a sintetizar elementos mais pesados a partir das “cinzas” de hélio: três núcleos produzem carbono, quatro, oxigénio. Estrelas pequenas, como o Sol, não conseguirão comprimir o núcleo o bastante para produzir elementos mais pesados: no fim da sua vida, como anãs brancas, reterão **hidrogénio**, hélio, lítio, berílio, boro, **carbono**, **azoto** e **oxigénio** no núcleo. E aqui estão todos os elementos necessários à vida.

A síntese dos elementos mais pesados requer estrelas muito mais massivas que, no fim da sua vida, como supernovas, explodem espalhando todos os elementos pelo espaço.

## A Origem do Sistema Solar

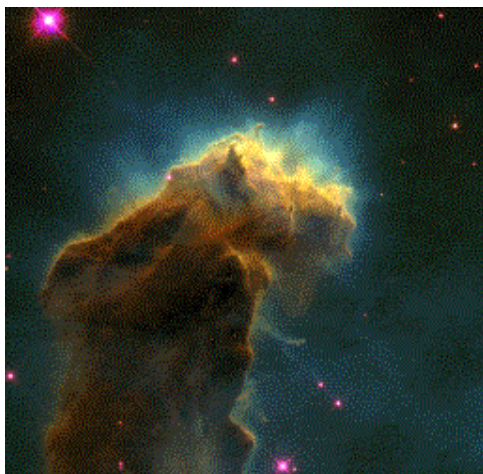


Figura 1 – A “maternidade de estrelas” na galáxia M16. Imagem HST, recolhida em <http://www1.ci.uc.pt/iguc/atlas/01origem.htm> [2009.09.01].

No Universo conhecido há muitas nuvens de gases e poeiras – nebulosas – que podem dar origem a sistemas solares (Figura 1). Nessas nuvens há duas forças opostas que se equilibram: a gravidade, que tende a contraí-las, e a pressão térmica, que tende a expandi-las.

Por vezes essas nebulosas são perturbadas por algum tipo de choque, como a onda provocada pela explosão de uma supernova ou simplesmente a aproximação de outra nuvem. Quando recebe o choque, a nebulosa começa a contrair-se. Para que essa contracção venha a dar origem a um sistema planetário, há algumas condições que têm que se cumprir: a nuvem tem que ter massa suficiente, ser densa, relativamente fria, e tem que estar animada de algum movimento inicial de modo a que a contracção gravitacional seja acelerada num movimento de rotação (da mesma forma que um patinador acelera a velocidade das piruetas aproximando os braços do corpo).

A contracção é acompanhada por um aumento de temperatura mas, desde que a massa nebular seja suficiente a força gravitacional é maior que a tendência para expansão térmica. À medida que a nebulosa inicial roda e se contrai, fragmenta-se. Cada um dos fragmentos, desde que tenha massa e densidade suficientes, individualiza-se e, por sua vez, roda e contrai-se mais. Nunca se observaram fragmentos nesta fase, não só porque é rápida (alguns milhares de anos), como também porque estarão rodeados por gases e poeiras densos. Só quando a temperatura dos fragmentos atinge 2000 a 3000 K se tornam visíveis, merecendo agora o nome de protoestrelas.

Uma destas protoestrelas, surgida há cerca de 4650 milhões de anos, veio a ser o nosso Sol.

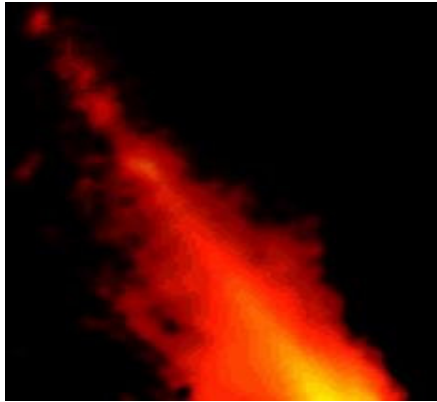
A contracção do proto-Sol deixou para trás um disco de material, a partir do qual se formou o sistema planetário. A composição deste material era a mesma do Sol actual e da nebulosa solar original. Esta era demasiado densa e opaca para deixar escapar energia por irradiação, por isso a contracção gravitacional foi sendo acompanhada por um aumento de temperatura. A uma distância de 300 a 500 milhões de quilómetros do proto-Sol, as temperaturas seriam ainda da ordem dos 2000 K pelo que quaisquer elementos estariam no estado gasoso.

A um certo ponto, a condensação fez com que a nebulosa ficasse transparente, começando assim a arrefecer. Isto veio a permitir que se produzissem compostos, inicialmente sob a forma de grãos de poeira. Um dos primeiros a formar-se teria sido o corindo, o óxido de alumínio impuro que compõe as safiras e os rubis, aos 1760 K, e os últimos os gelos de metano e de azoto, a 70 K, nos bordos mais frios da nebulosa solar. Isto explicaria a futura diferenciação composicional entre planetas telúricos e gasosos.

Mas havia ainda um longo caminho a percorrer entre esta nuvem de poeiras minerais e gelos e um Sistema Solar. À medida que se iam formando, as poeiras iam estabilizando em órbitas no plano médio da nebulosa, no que viria a ser a eclíptica actual. Podemos observar estes discos de poeiras em torno, por exemplo da estrela Beta Pictoris (Figura 2). Os choques aleatórios entre partículas e a atracção gravitacional foram gerando agregados cada vez maiores, em tempos e com dimensões dependentes da distância ao centro gravitacional da nebulosa – o proto-Sol. Assim, estima-se em 2000 anos o tempo necessário para coagular grãos com 10 mm de diâmetro na órbita actual da Terra, mas 50000 anos para produzir grãos com 0.3 mm na órbita actual de Neptuno.

A coagulação é um processo acelerado; por isso, ao fim de mais 10000 a 100000 anos já haveria corpos com menos de 10 km de diâmetro – planetesimais – em órbitas da ordem de 1 UA: os embriões dos planetas do Sistema Solar interior. Na figura 3 pode ver-se o disco protoplanetário da estrela AB Aurigae, já com granulações formadas.

O proto-Sol estava então na fase de ser uma estrela de tipo T-Tauri: juvenil, pequena (talvez o dobro da massa actual) e produzindo jactos fortíssimos de partículas, o vento T-Tauri (Figura 4). Esse vento lançou no espaço os restos da nebulosa solar, impedindo que Júpiter capturasse gases suficientes para se tornar, também ele, uma estrela.



**Figura 2 – O disco de poeiras em torno da estrela Beta Pictoris. Imagem HST, no infravermelho, recolhida em <http://www1.ci.uc.pt/iguc/atlas/01origem.htm> [2009.09.01].**



**Figura 3 – Disco protoplanetário em torno da estrela AB Aurigae, já com granulações formadas. Imagem HST. As bandas negras destinam-se a ocultar o brilho da estrela e os rosários em diagonal são fenómenos de difracção. Recolhida em <http://www1.ci.uc.pt/iguc/atlas/01origem.htm> [2009.09.01].**

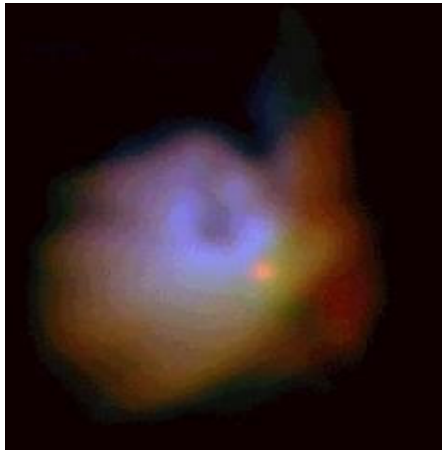


Figura 4 – HL Tau, uma estrela de tipo T-Tauri, e o vento estelar que projecta. Imagem do telescópio França-Canadá-Hawaii, recolhida em <http://www1.ci.uc.pt/iguc/atlas/01origem.htm> [2009.09.01].

Entretanto, já estavam definidos os materiais que originariam os planetas do Sistema Solar. A grande massa de Júpiter impediu que se formasse um planeta na zona da cintura de asteróides, fazendo com que as forças das colisões entre poeiras e planetesimais fossem demasiado energéticas para permitir aglomeração por gravidade.

A separação gravítica, um pouco como a que se dá quando centrifugamos uma suspensão em meio aquoso, é a causa de hoje termos os planetas mais densos junto do Sol – os planetas telúricos – e os menos densos mais longe.


## A Atmosfera Terrestre

Aquando da individualização da Terra, a atmosfera seria constituída principalmente pelos dois gases mais abundantes no Universo: hidrogénio e hélio. A baixa massa molecular destes gases, o fraco campo gravítico terrestre (comparativamente com Júpiter, por exemplo) e o vento solar foram factores que se combinaram para que esta primitiva atmosfera se perdesse quase totalmente para o espaço. Hoje, os teores de hidrogénio e hélio na atmosfera terrestre são, respectivamente, de 0.5 e 5.4 ppm – enquanto estes dois gases constituem mais de 95% das massas de Júpiter e de Saturno.

A atmosfera actual é produto de processos geológicos, primeiro, e biológicos, depois. A consolidação da crosta e o primeiro vulcanismo, há mais de 5000 Ma (milhões de anos), terão produzido uma atmosfera de composição não muito diferente da dos gases vulcânicos que são hoje emitidos: água, dióxido de carbono, dióxido de enxofre, monóxido de carbono, enxofre, cloro, azoto, hidrogénio, amoníaco, metano. Não existia oxigénio livre em proporções significativas nessa atmosfera. À medida que a Terra ia arrefecendo, atingiram-se condições para a existência de água no estado líquido. Assim, esta condensou-se precipitou-se dando origem aos primeiros oceanos.

Dois factores principais permitiram que a atmosfera primitiva fosse preservada e evoluísse para a que temos hoje:

1. A individualização do núcleo, com conseqüente início dos processos de dínamo que produzem o campo geomagnético interno e, deste modo, protegem a atmosfera do vento solar.
2. Os teores de água e de dióxido de carbono na atmosfera que, ao produzir efeito de estufa, mantiveram a temperatura superficial perto do ponto triplo da água – permitindo a existência dos oceanos e, conseqüentemente, o aparecimento da vida.

Será provável a existência de vida noutros pontos do Universo? E vida inteligente? 


A composição média da baixa atmosfera (troposfera) actual é a seguinte:

Nome	Fórmula	% em Volume
Azoto	N <sub>2</sub>	78.080000
Oxigénio	O <sub>2</sub>	20.950000
* Água	H <sub>2</sub> O	0.0 a 4.0
Árgon	Ar	0.930000
* Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>	0.038000
Néon	Ne	0.001800
Hélio	He	0.000500
* Metano	CH <sub>4</sub>	0.000170
Hidrogénio	H <sub>2</sub>	0.000050
* Óxido Nitroso	N <sub>2</sub> O	0.000030
* Ozono	O <sub>3</sub>	0.000004

\* Componentes no estado gasoso em % muito variáveis

**Tabela 1 – Composição química média da baixa atmosfera. Dados de <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/7a.html> [Acedido em 2009.09.01]**

## Gases bons, gases maus e gases indiferentes...

Os gases bons, claro, são o oxigénio e a água. Talvez também o ozono... Mas não nos devemos esquecer que se a atmosfera primitiva tivesse sido rica em oxigénio livre, hoje não haveria vida. 

Por outro lado, o ozono é bom... longe: na estratosfera protege-nos dos raios ultra-violetas. Na baixa atmosfera é extremamente tóxico.

A água é a mãe de toda a vida mas o vapor de água é talvez o componente da atmosfera com mais importante efeito de estufa – ainda mal estudado, incompreensivelmente ou, se calhar, não.

Já o dióxido de carbono é obviamente mau... excepto para as plantas e os organismos autotróficos em geral!

O azoto parece-nos indiferente, apesar de ser o sétimo elemento mais abundante no Universo. Na molécula diatómica livre que constitui a maior parte da nossa atmosfera é muito pouco reactivo mas... Amino-ácidos?

Todas as moedas têm duas – às vezes três – faces.

## O efeito de estufa

O efeito de estufa é o aquecimento da superfície de um planeta devido à presença de uma atmosfera contendo gases – os gases com efeito de estufa – que absorvem energia dos raios solares e emitem parte dessa energia para outros gases e para a superfície (Figura 5).

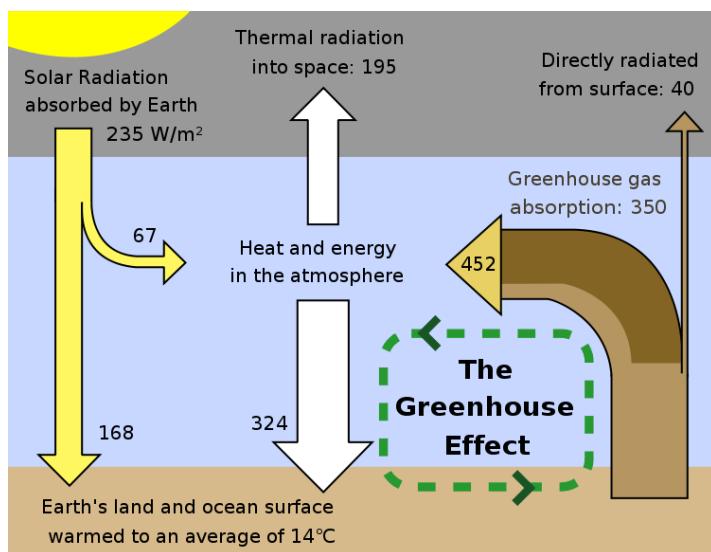


Figura 5 – Efeito de estufa. [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/58/Greenhouse\\_Effect.svg/750px-Greenhouse\\_Effect.svg.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/58/Greenhouse_Effect.svg/750px-Greenhouse_Effect.svg.png) [Acedido em 2009.09.04]

Os principais gases com efeito de estufa são:

Gás	Contributo
H <sub>2</sub> O vapor	36 a 66%
incluindo as nuvens	66 a 85%
CO <sub>2</sub>	09 a 26%
CH <sub>4</sub>	04 a 09%
N <sub>2</sub> O	até 08%
O <sub>3</sub>	até 07%
CFC	até 07%

Tabela 2 – Principais gases com efeito de estufa. Dados de <http://www.realclimate.org/> [Acedido em 2009.09.01]

E continua-se a insistir, sempre, no dióxido de carbono.

Note-se que o papel deste gás no efeito de estufa é esmagador em Vénus, e poderá sê-lo se, um dia, se tentar a terraformação de Marte.

## A água

Dado que o hidrogénio e o oxigénio foram dos primeiros elementos a serem sintetizados e que são extremamente reactivos, existe água quase desde o início do Universo. No Sistema Solar é impossível apontar um espectroscópio a qualquer objecto sem encontrar água, desde Mercúrio a Plutão.

É claro que, na maior parte das condições possíveis, essa água está no estado gasoso ou sólido (Figura 6); principalmente sólido, se nos lembrarmos que a temperatura no espaço interplanetário é de poucos kelvin.

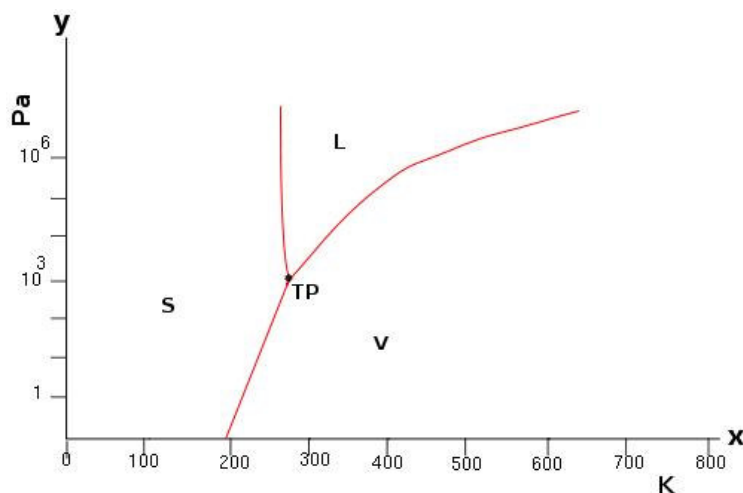


Figura 6 – Diagrama de fases da água. Adaptado de: [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/ef/Water\\_phase\\_diagram.svg/512px-Water\\_phase\\_diagram.svg.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/ef/Water_phase_diagram.svg/512px-Water_phase_diagram.svg.png) [Acedido em 2009.09.01]

Uma parte ainda dificilmente quantificável da água terrestre terá sido proveniente do impacto de cometas e meteoritos.

## O oxigénio

Inicialmente, algum pouco oxigénio terá sido produzido nas camadas mais altas da atmosfera por fotodissociação de moléculas de água pelos raios ultra-violeta (UV). Durante todo o Arcaico (há mais de 2500 Ma) este processo terá criado teores atmosféricos de oxigénio menores que 0.5% (contra os 21% actuais), muito baixos mas suficientes para que se tenha formado algum ozono ( $O_3$ ) que protegesse a superfície dos UV permitindo o aparecimento da vida.


Mas foi a vida, quando aumentou a complexidade o bastante para iniciar a fotossíntese (cianobactérias, ainda no Arcaico mas, principalmente, a partir do Proterozóico), a principal responsável pelo aumento dos teores de  $O_2$  atmosférico. Inicialmente, a maior parte do oxigénio teria sido consumida por reacções de meteorização química das rochas superficiais, muito ricas em ferro, e o nosso planeta terá sido então vermelho, um pouco como Marte hoje. À medida que foi havendo cada vez menos material disponível para oxidar, o balanço pendeu para o lado da produção, o que permitiu o crescimento do teor atmosférico de oxigénio até aos níveis de hoje.

Porque é que o nosso planeta já não é vermelho? **?**

## O dióxido de carbono

O dióxido de carbono teria sido um dos principais componentes da atmosfera terrestre primitiva – hoje constitui 95% da atmosfera de Marte e 97% da de Vénus.

A maior parte (98%) do dióxido de carbono que é injectado na atmosfera tem causas naturais: é libertado pela respiração dos seres vivos e pelos oceanos (Figura 7). Também são estes os consumidores do dióxido de carbono atmosférico.

Estes dados não são fáceis de encontrar na Internet. 

O ciclo do carbono é dos mais complexos e, como todos os ciclos biogeoquímicos, encontra-se permanentemente em equilíbrio instável. A principal questão que se coloca hoje é saber se a intervenção humana, embora globalmente muito pequena, é bastante para desequilibrar este sistema no sentido da produção de tal forma que os sorvedouros nunca a consigam compensar.

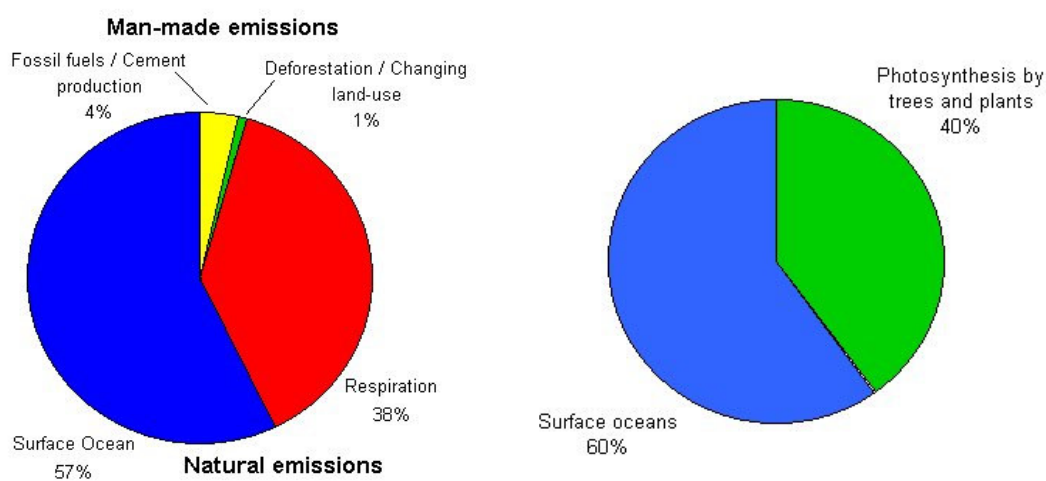
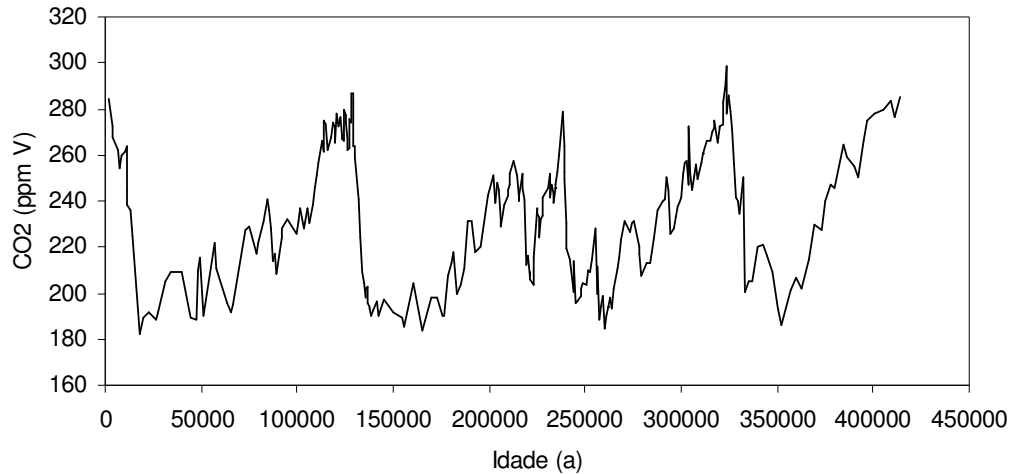


Figura 7 – Fontes e sorvedouros de dióxido de carbono. [http://www.ace.mmu.ac.uk/Resources/Teaching\\_Packs/Key\\_Stage\\_4/Climate\\_Change/02p.html](http://www.ace.mmu.ac.uk/Resources/Teaching_Packs/Key_Stage_4/Climate_Change/02p.html) [2009.09.03]

Temos informação sobre a evolução dos teores atmosféricos de dióxido de carbono a partir da análise de sondagens nos gelos polares. A mais completa foi feita sobre o lago Vostok, na Antártida, e abrange um período de mais de 400000 anos (Figura 8)





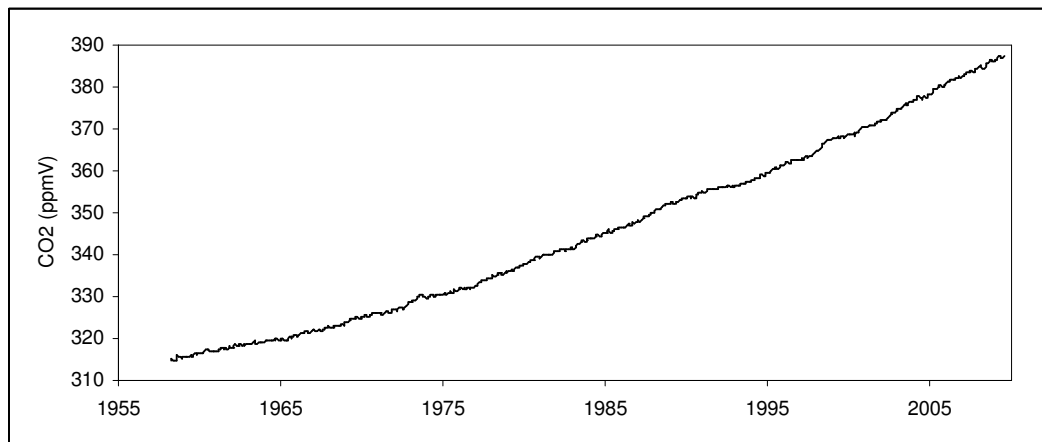
**Figura 8 – Concentrações de dióxido de carbono medidas no testemunho de uma sondagem nos gelos sobre o lago Vostok.** [http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/icecore/antarctica/vostok/vostok\\_co2.html](http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/icecore/antarctica/vostok/vostok_co2.html) [Acedido em 2009.09.03]

Pode ver-se que as concentrações medidas variam muito, entre 180 e 300 ppm. Uma questão importante é se estes valores, medidos no gelo, reflectem as concentrações atmosféricas: **?**

Algumas pistas:

1. O gelo polar não é um sistema fechado;
2. Nesse gelo coexistem sempre as três fases da água, e o dióxido de carbono é muito solúvel em água líquida (3.3 g/l a 0 °C e 100 kPa);
3. A furação produz aquecimento, liquefacção e, conseqüentemente, perdas.

Por outro lado, a mais extensa análise que temos do dióxido de carbono atmosférico tem vindo a ser feita desde 1958 no Hawaii, no Observatório de Mauna Loa, pelos Keeling (figura 9)



**Figura 9 – Concentrações de dióxido de carbono medidas desde 1958 no Observatório de Mauna Loa, Hawaii.** Dados de [ftp://ftp.cmdl.noaa.gov/ccg/co2/trends/co2\\_mm\\_mlo.txt](ftp://ftp.cmdl.noaa.gov/ccg/co2/trends/co2_mm_mlo.txt) [Acedido em 2009.09.03]

Repare-se nas escalas dos gráficos: o máximo da sondagem Vostok é inferior ao mínimo do gráfico de Keeling.

Levantam-se agora algumas questões. Primeiro, se podemos interpretar, em conjunto, estes gráficos, como faz o IPCC (Figura 10): ?

[Sugestão: ler Jaworowski (2004)]

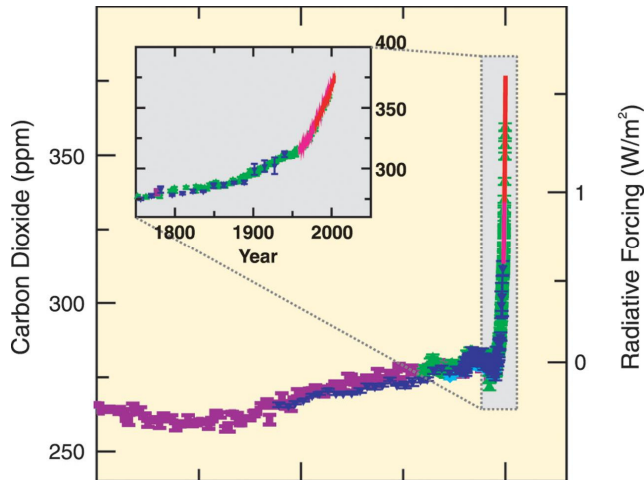


Figura 10 – Gráfico misto da evolução das concentrações de dióxido de carbono nos últimos 10000 anos (espaçamento das marcas no eixo das abcissas: 2500 anos). <http://www.ipcc.ch/graphics/syr/fig2-3.jpg> [Acedido em 2009.09.03]

Outra questão, não menos importante, é se há uma relação directa entre as variações de teores de dióxido de carbono e as variações da temperatura atmosférica.

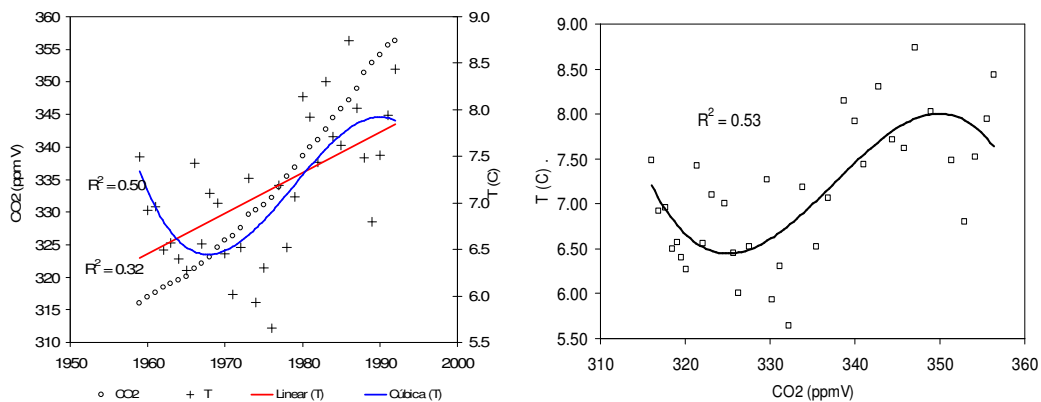


Figura 11 – Médias anuais de concentrações de dióxido de carbono e temperaturas medidas no Observatório de Mauna Loa, Hawaii, entre 1958 e 1992. Dados obtidos de [ftp://ftp.cmdl.noaa.gov/ccg/co2/trends/co2\\_mm\\_mlo.txt](ftp://ftp.cmdl.noaa.gov/ccg/co2/trends/co2_mm_mlo.txt) e <http://www.wrcc.dri.edu/cgi-bin/cliMONtvt.pl?himaun> [Acedidos em 2009.09.03]

Que é que podemos concluir destes gráficos? ?

Se é um facto inegável que os teores de dióxido de carbono atmosférico têm vindo a aumentar nos últimos 50 anos, é menos óbvio que haja uma tendência global para o aumento da temperatura, como se pode ver pelo mais extenso registo existente, da Inglaterra Central.

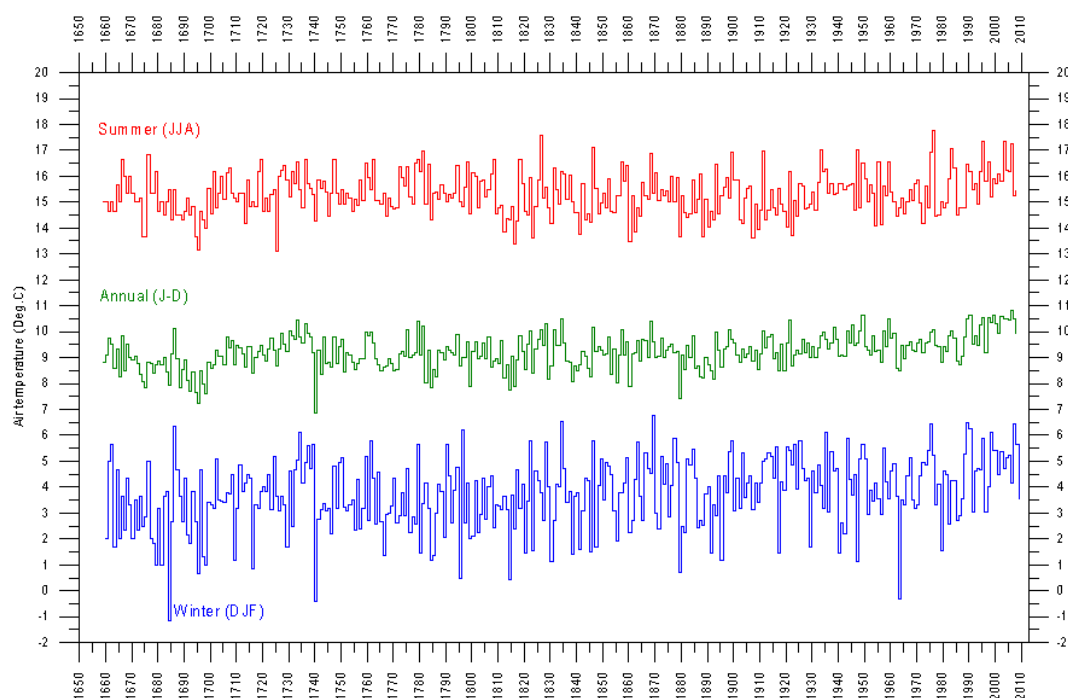


Figura 12 – Temperaturas na Inglaterra Central, desde 1659 até à actualidade.  
<http://www.climate4you.com/images/CentralEnglandTempSince1659%20880pixel.gif> [Acedido em 2009.09.04]

Que é que podemos concluir destes gráficos? 

## Conclusões



Compete-lhe, a si, tirar conclusões.

Só uma última palavra: sempre que possível, use dados originais e não informação em segunda mão. Com a Internet e uma simples folha de cálculo as possibilidades são infinitas!

## Leituras aconselhadas

Gerhard, L. C., *Geologic Constraints on Global Climate Variability*,  
<http://www.warwickhughes.com/geol/index.htm> [acedido em 2009.09.03]

IGUC, Instituto Geofísico da Universidade de Coimbra – <http://www1.ci.uc.pt/iguc> [acedido em 2009.09.03]

IPCC, Intergovernmental Panel of Climate Change - <http://www.ipcc.ch> [acedido em 2009.09.03]

Jaworowski, Z. (2004) - Climate Change: Incorrect information on pre-industrial CO2.  
<http://www.warwickhughes.com/icecore/> [acedido em 2009.09.03]

Real Climate – <http://www.realclimate.org> [acedido em 2009.09.03]

## Fontes - fiáveis - de dados

Climate4You - <http://www.climate4you.com/> [acedido em 2009.09.03] – contém ligações para os dados originais de todos os gráficos que apresenta, assim como para muitos dos artigos científicos originais a produzi-los e tratá-los. Precioso!

Met Office Hadley Centre - <http://www.metoffice.gov.uk/climatechange/science/hadleycentre/> O Hadley Centre é o maior centro mundial de modelação e previsão climática. A maior parte dos dados, ao contrário da NOAA, são gratuitos, e encontram-se em <http://hadobs.metoffice.com/> [acedidos em 2009.09.03]

NOAA, USA National Oceanic and Atmospheric Administration - <http://www.noaa.gov> [acedido em 2009.09.03] – é, talvez, o maior repositório mundial de dados meteorológicos, climáticos e oceanográficos. Infelizmente, não são todos gratuitos...