

Ciclos de Milankovich

Diego de Mattos Candido	Nº USP: 7993936
Guilherme Santana Bergamin	Nº USP: 8539311
Leonardo José Bertelli	Nº USP: 8539109
Nicolas Jarro Lago de Carlos	Nº USP: 8538992

Programa

1. História do clima terrestre

- Formação e Evolução do sistema terrestre
- O passado de 100 milhões de anos
- O passado de 1 milhão de anos
- O passado de 22 mil anos.

2. Os Ciclos de Milankovich

- O ciclo de Precessão e nutação
- O ciclo de Obliquidade
- O ciclo de Excentricidade
- Parâmetros orbitais e suas influências
- Efeitos do Ciclo de Milankovitch

Formação do planeta



- Colisões entre *planetesimais*
- Compostos por gases nobres, água (gelo), metano, amônia entre outros.

https://www.google.com.br/search?q=terra+bombardeada+meteoro&espv=2&biw=1366&bih=676&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKewiw26PerbHQAHL-2MKHS2nAlcQ_AUIBigB#imgdii=JsvIWIEHAjhsrM%3A%3BJsvIWIEHAjhsrM%3A%3BGxWMKm-zND3NsM%3A&imgsrc=JsvIWIEHAjhsrM%3A

Primórdios da atmosfera

- Com o impacto das colisões era liberado vapor d'água e outras substâncias voláteis presentes nos *planetesimais*
- Nascem os primeiros oceanos e uma atmosfera primitiva

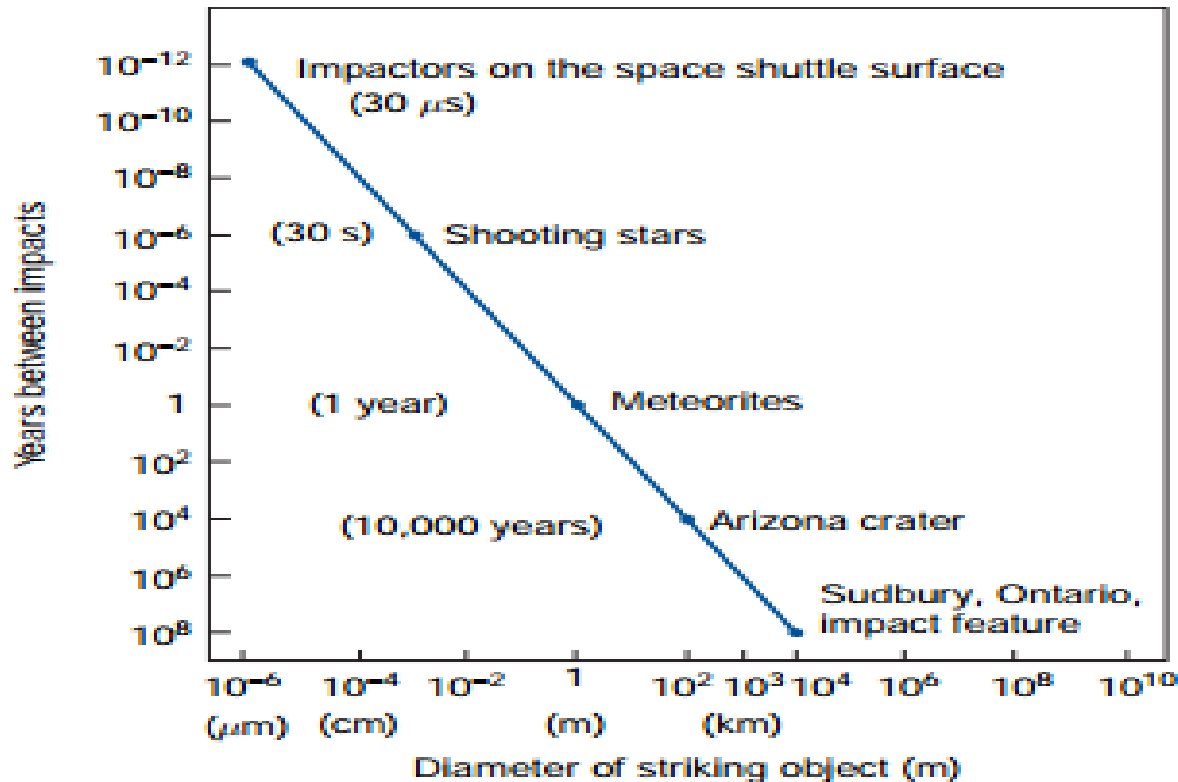
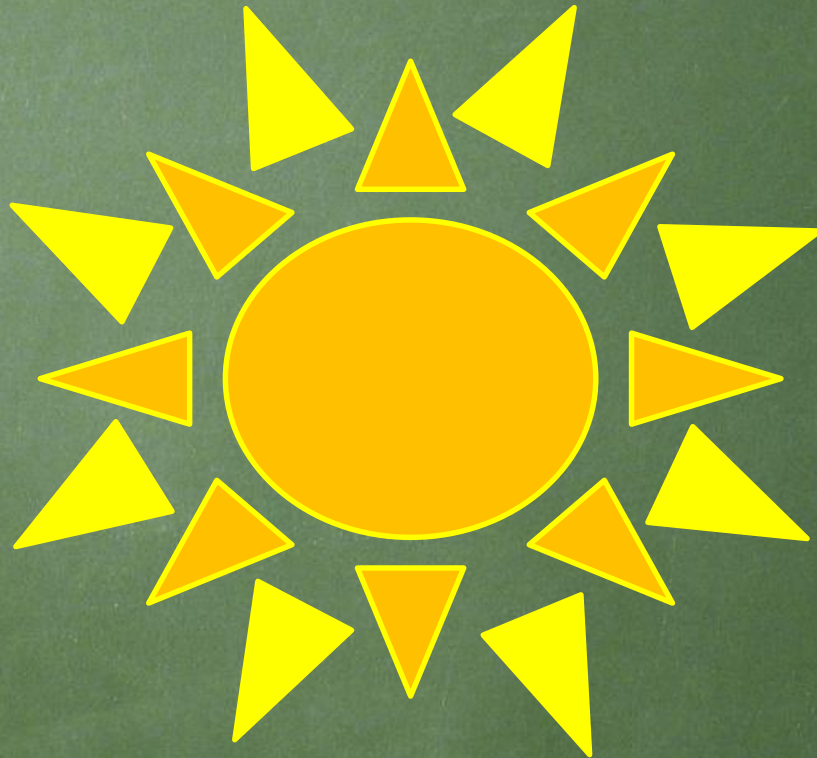


Fig. 2.28 Frequency of occurrence of collisions of objects with the Earth as a function of the size of the objects. [Reprinted with permission from L. W. Alvarez, "Mass extinctions caused by large bolide impacts," *Physics Today*, **40**, p. 27. Copyright 1987, American Institute of Physics.]

Variação de Luminosidade Solar

- A emissão de radiação de uma estrela aumenta conforme fica mais velha



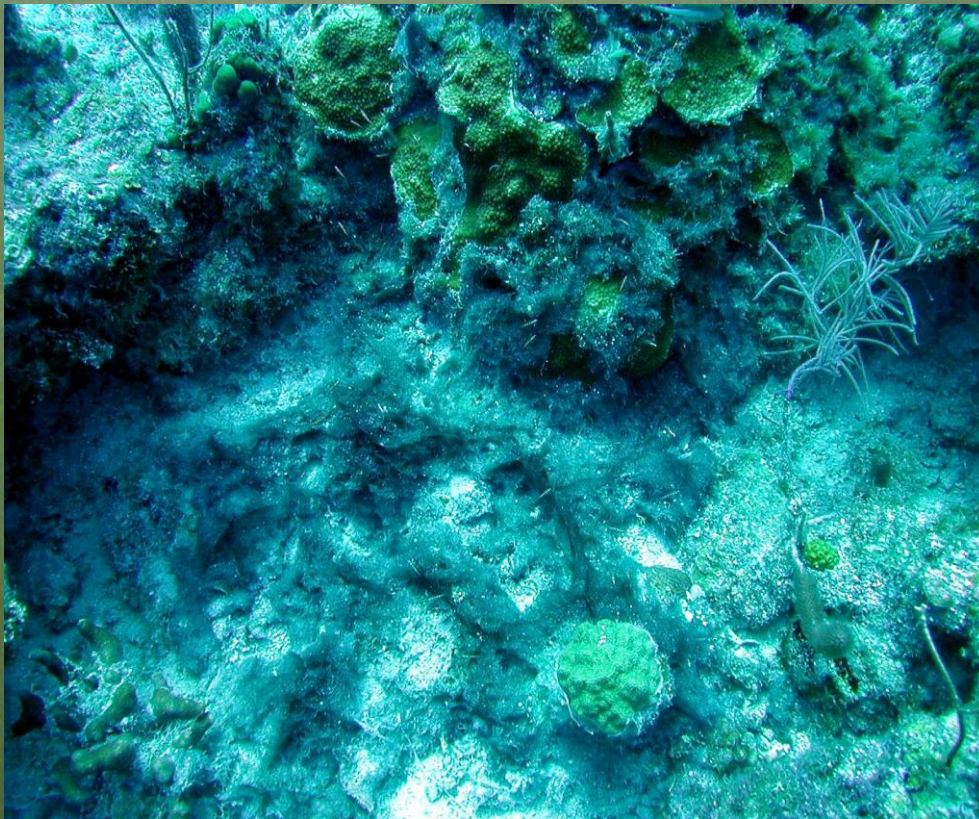
- Quanto maior a temperatura, mais hidrogênios irão se fundir em hélio
- Luminosidade do Sol aumentou 30% desde a criação do sistema solar

Concentração de Gases de Efeito Estufa (GEE)

- O Sol tinha uma luminosidade menor
- Durante esse período a superfície não era congelada
- Sugere-se uma maior concentração de Gases do Efeito Estufa (G.E.E.)

Aumento do oxigênio na atmosfera

- Com o surgimento dos oceanos, formaram-se os primeiros seres vivos
- População de cianobactérias (fotossíntese)



Aumento de oxigênio na atmosfera

- Inicialmente todo o O_2 era consumido por H_2 ;
- Grande concentração de GEE (principalmente metano) faz com que o hidrogênio fique suspenso em maiores altitudes;
- Muito hidrogênio se perde no espaço;
- Aumento significativo de O_2 na atmosfera;
- Seres anaeróbicos começam a morrer dando espaço à formas de vida mais complexas;

Variação de Luminosidade Solar

- Além da variação causada pelo sol “jovem e fraco”, tem as *manchas solares*
- Período de 11 anos
- Efeitos insignificantes no clima da Terra



Variação de Luminosidade Solar

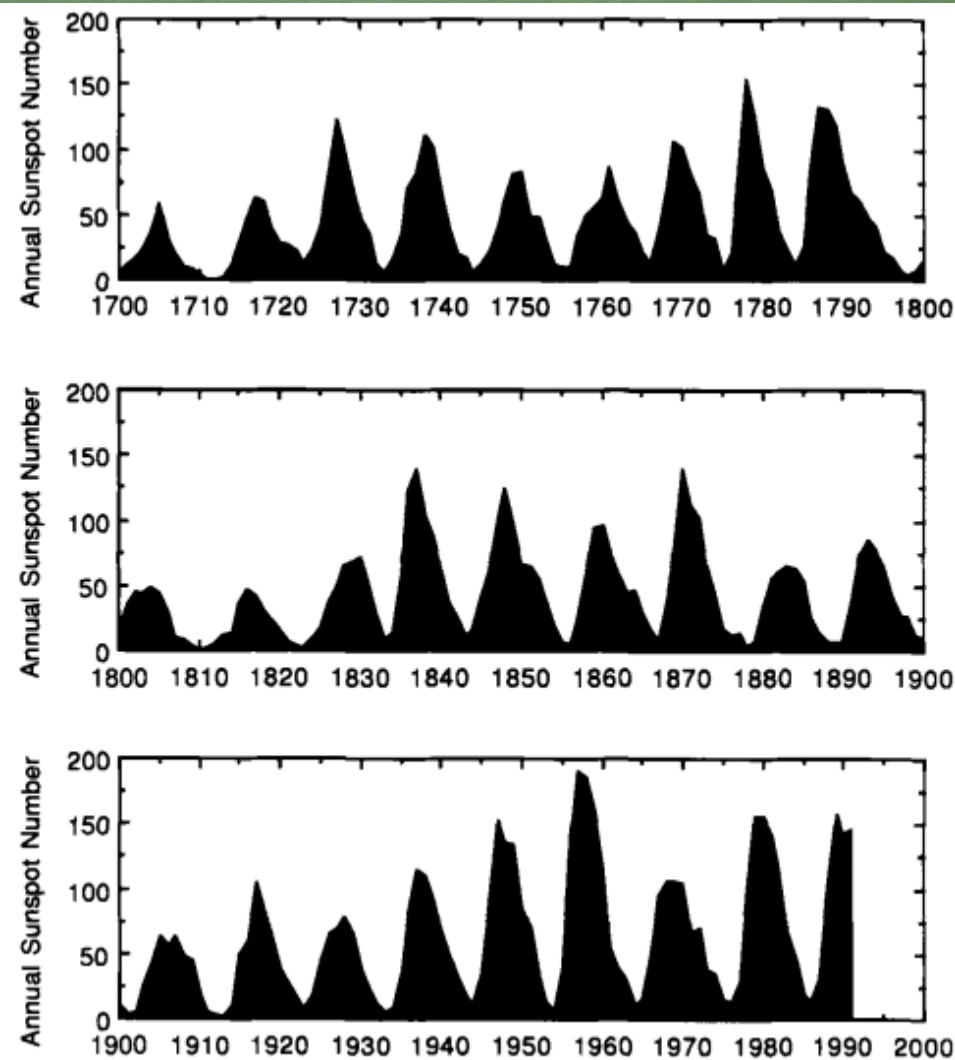
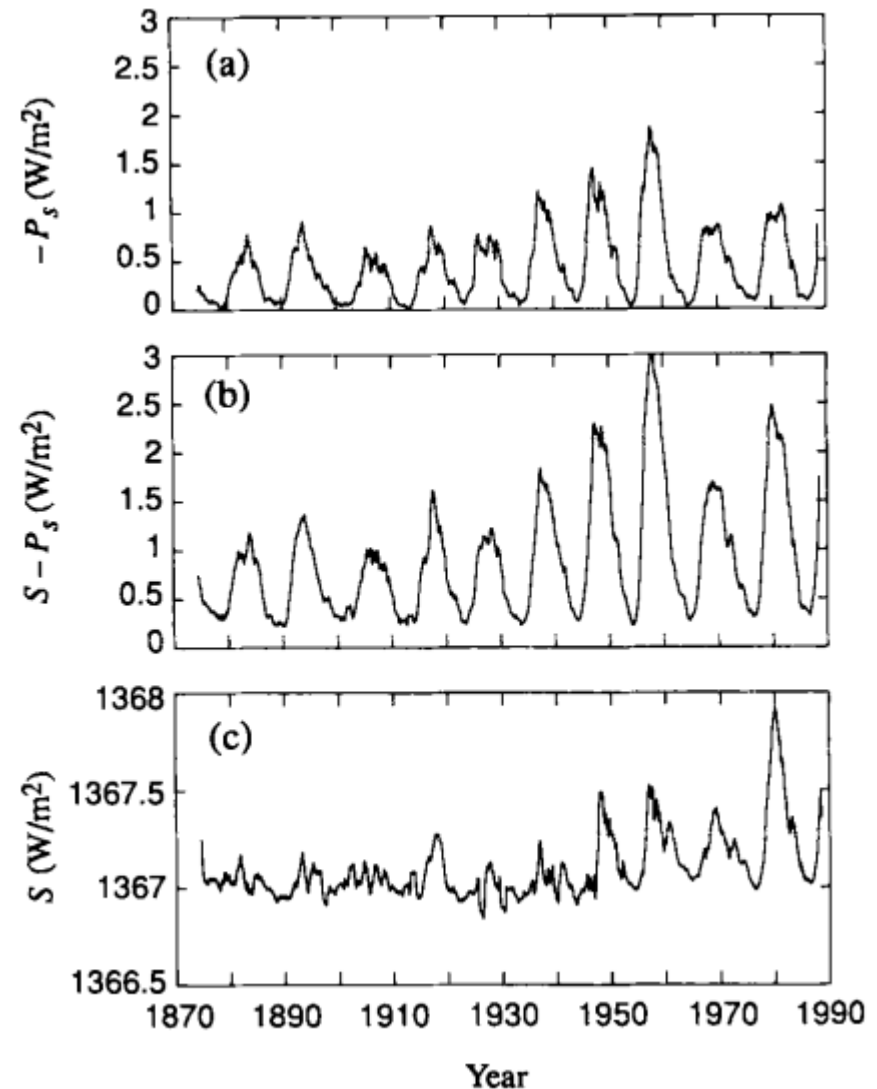


Fig. 11.1 Annual mean sunspot numbers from 1700 to 1991.



Outras influências do Sol

- Intensidade dos *ventos solares* e a variação do *campo magnético* do Sol;
- Esses fatores induzem mudanças nas atividades geomagnéticas da Terra;
- Mudanças no plasma ionosférico (estratosfera);
- Influência climática (?)

Aerossóis e Clima

- A composição da atmosfera irá interferir diretamente no clima;
- Cada composto irá interagir diferente com a radiação do Sol;
- Essa interação poderá favorecer o aumento de temperatura ou não.

Aerossóis e Clima

- Fontes Naturais de alguns aerossóis:
 - *Poeira levantada do solo (desertos e tempestades de areia);*
 - *Plantas (pólen);*
 - *Oceano (enxofre, resultado da degradação da fauna e flora marítima);*
 - *Vulcões e placas tectônicas;*
 - *Meteoritos (tanto partículas que o compõe, quanto as levantados pelo impacto com o solo);*

Aerossóis e Clima

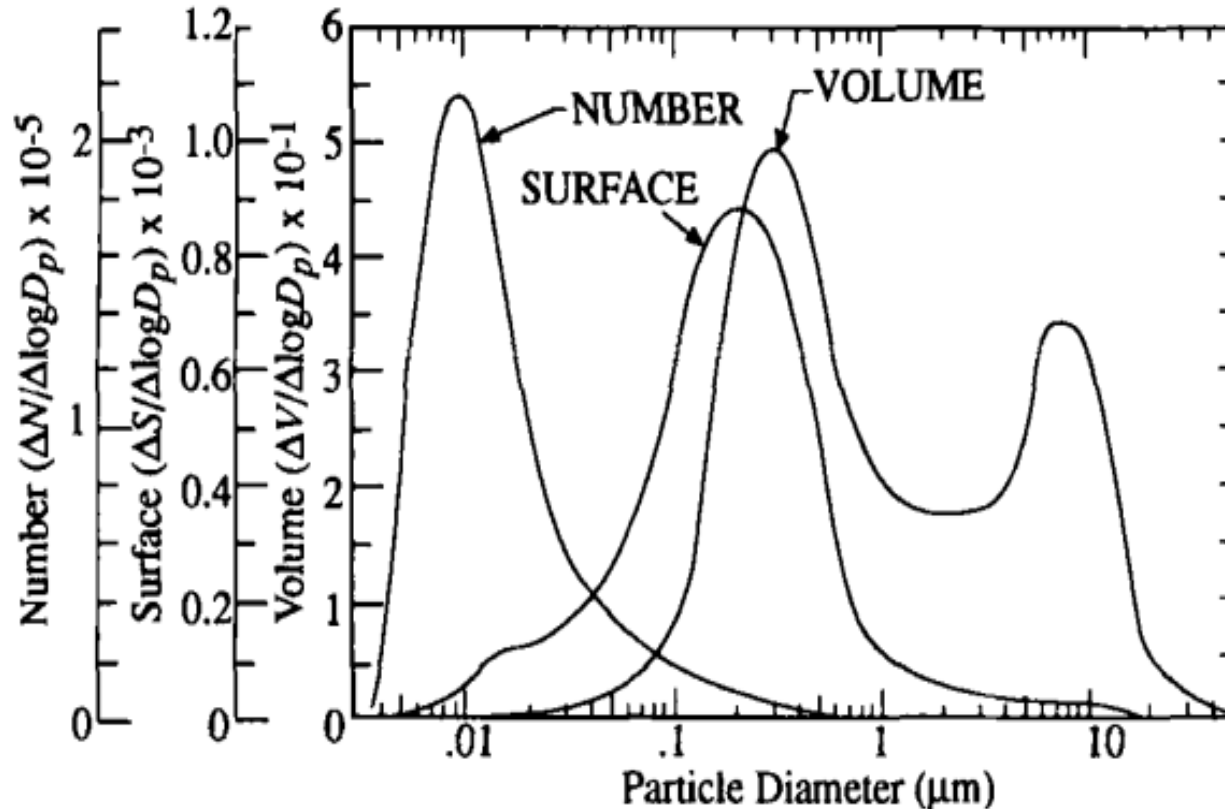


Fig. 11.4 Normalized plots of the number, surface area, and volume distributions for a tropospheric aerosol. [From Charlson (1988). Reprinted with permission from Wiley and Sons, Inc.]

Erupções Vulcânicas

- Pode provocar grandes mudanças climáticas no planeta;
- Responsáveis por injetar toneladas de materiais particulados na atmosfera;
- Grande fonte de Gases de Efeito Estufa.

Erupções Vulcânicas



Modelando a Era do Gelo

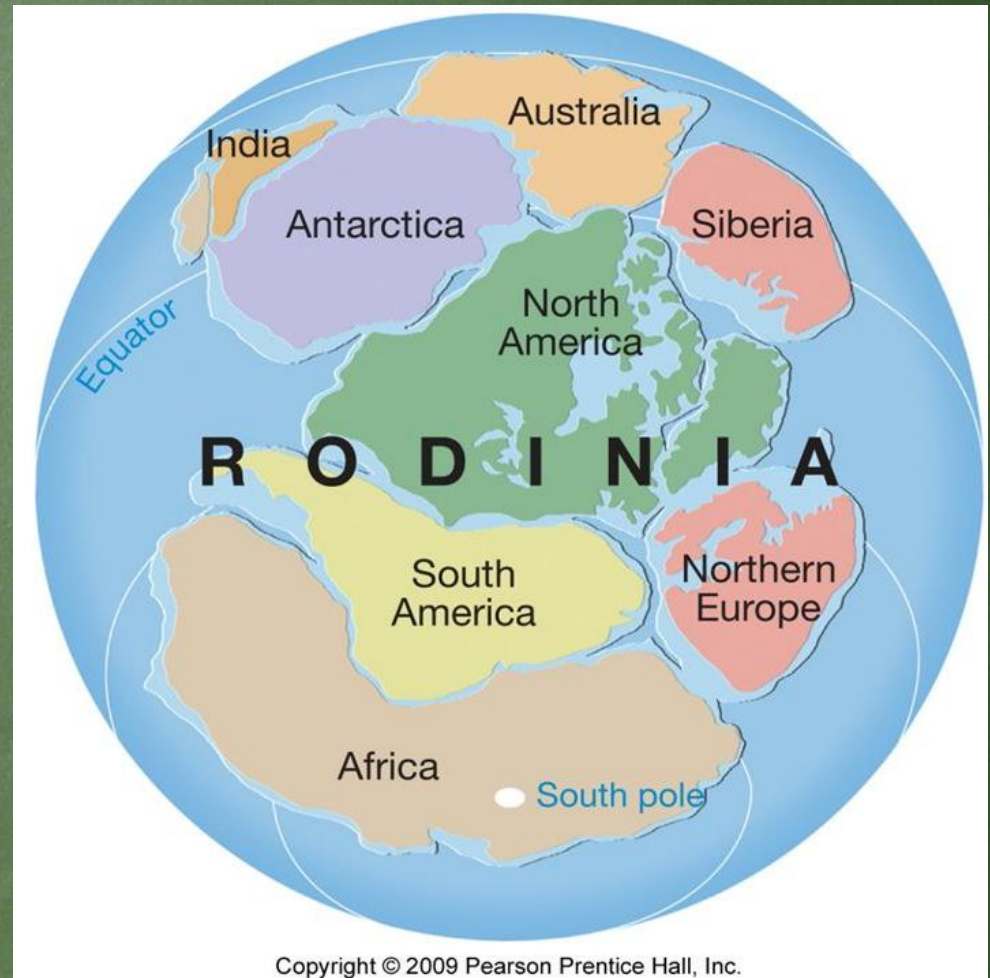
- Até os dias atuais ocorreram 3 grandes Eras Glaciais:
 - 2,2 à 2,4 bilhões de anos (aumento de oxigênio na atmosfera);
 - 600 à 750 milhões de anos;
 - 280 milhões de anos.

Modelando a Era do Gelo

- São inúmeros fatores sobrepostos que favorecem uma *era do gelo*:
 - Taxa de Luminosidade do Sol;
 - Composição da atmosfera;
 - Distribuição das porções de terra no planeta;
 - Distância entre Terra e Sol.

Modelando a Era do Gelo

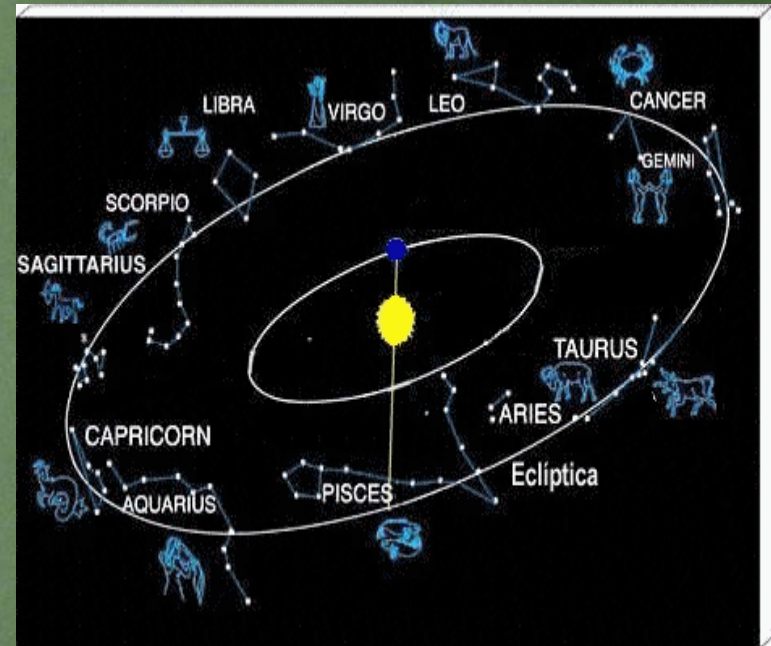
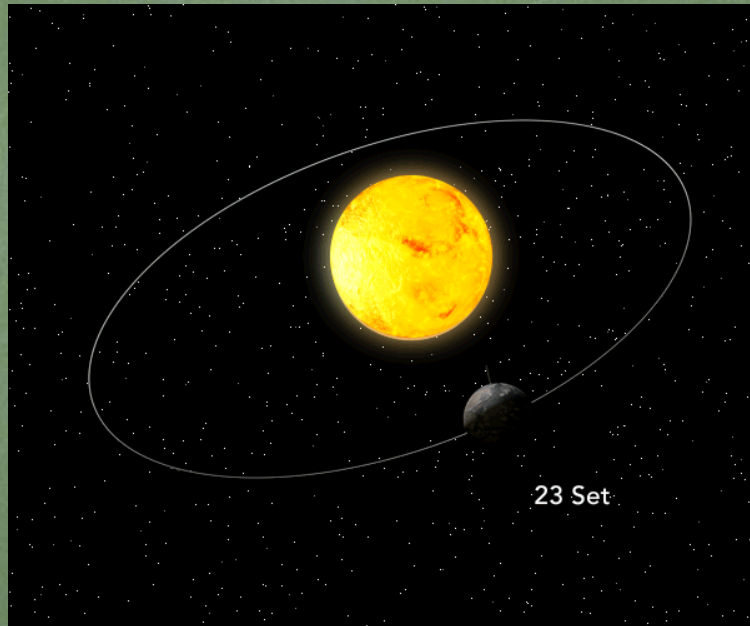
- Dada uma configuração de distribuição dos continentes irá interferir nas correntes marítimas e nos ventos alísios, interferindo diretamente no clima do planeta!



Definições importantes

Antes de continuar...

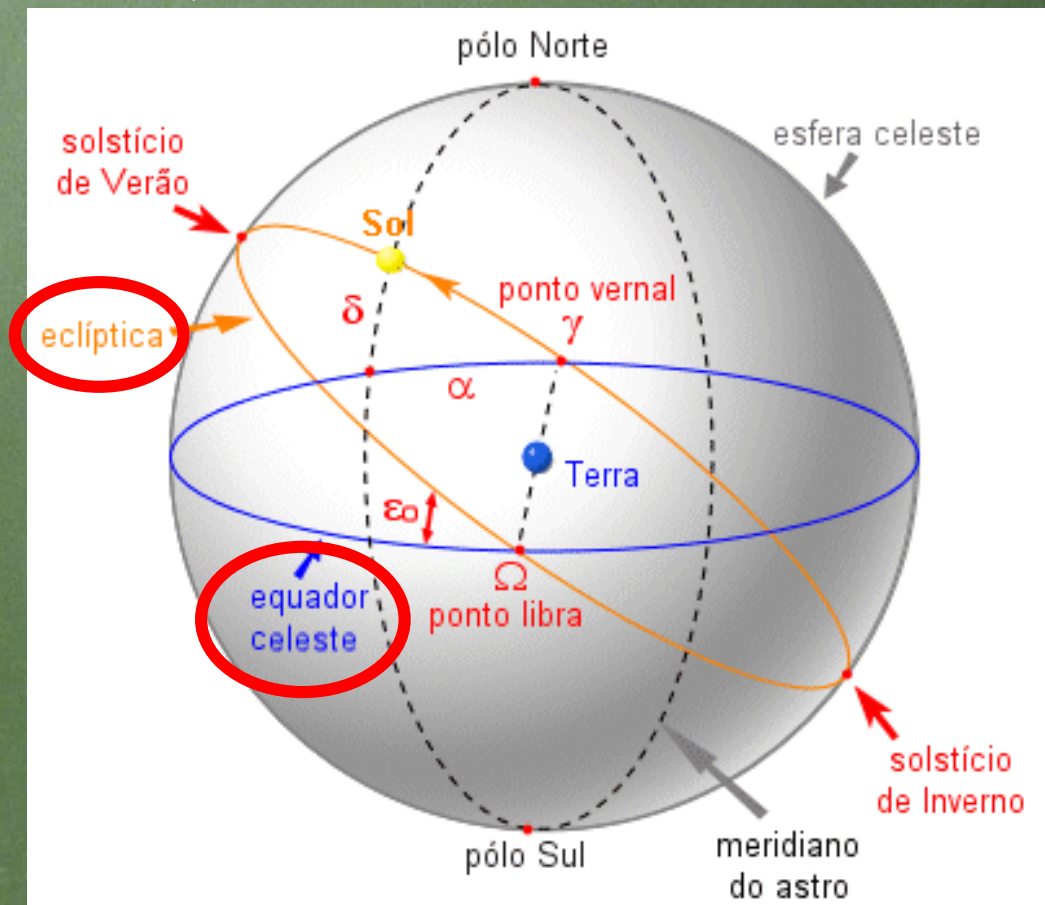
O movimento Terra - Sol



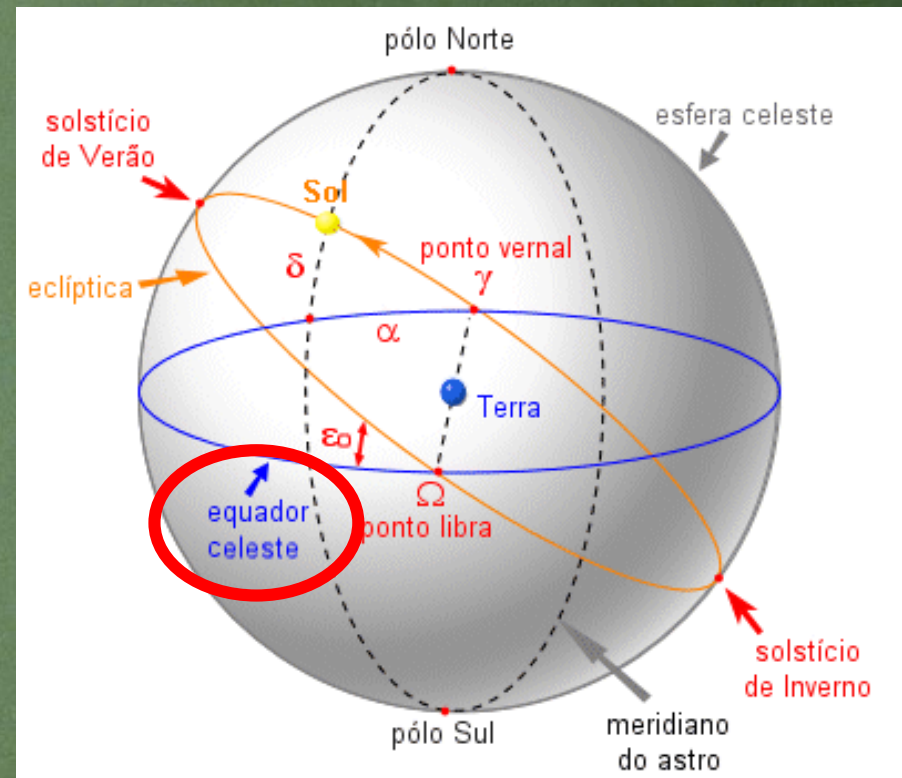
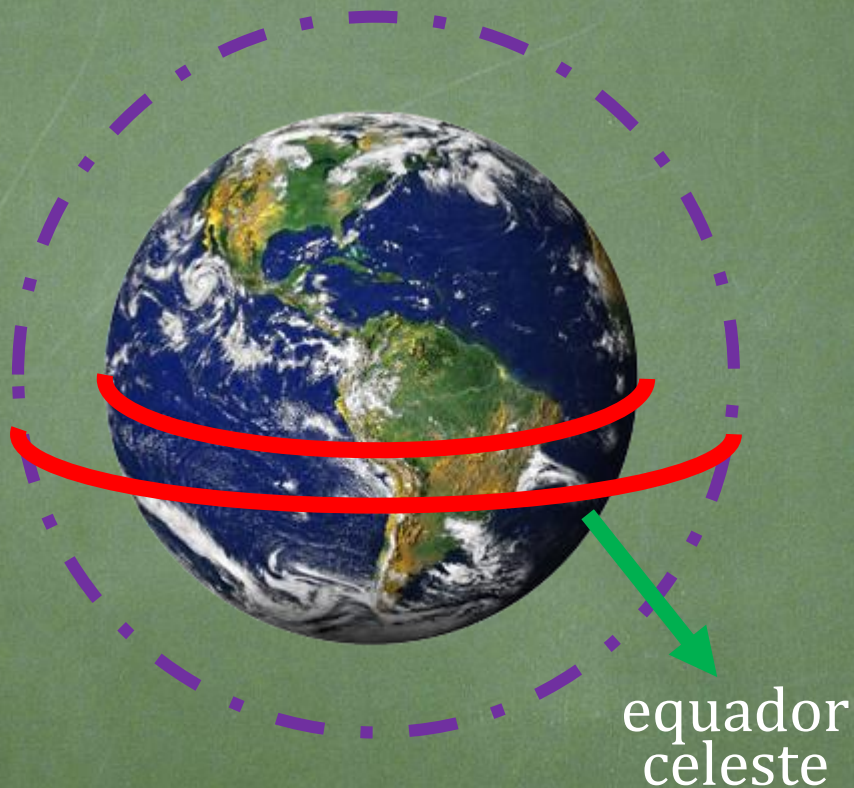
- A terra se move ao entorno do sol na chamada translação
- No referencial da terra, o sol se move ao entorno dela.

A esfera celeste

- Esfera imaginária no referencial da terra que à contem em seu centro.
- Contem a “trajetória” do sol ao entorno da terra.

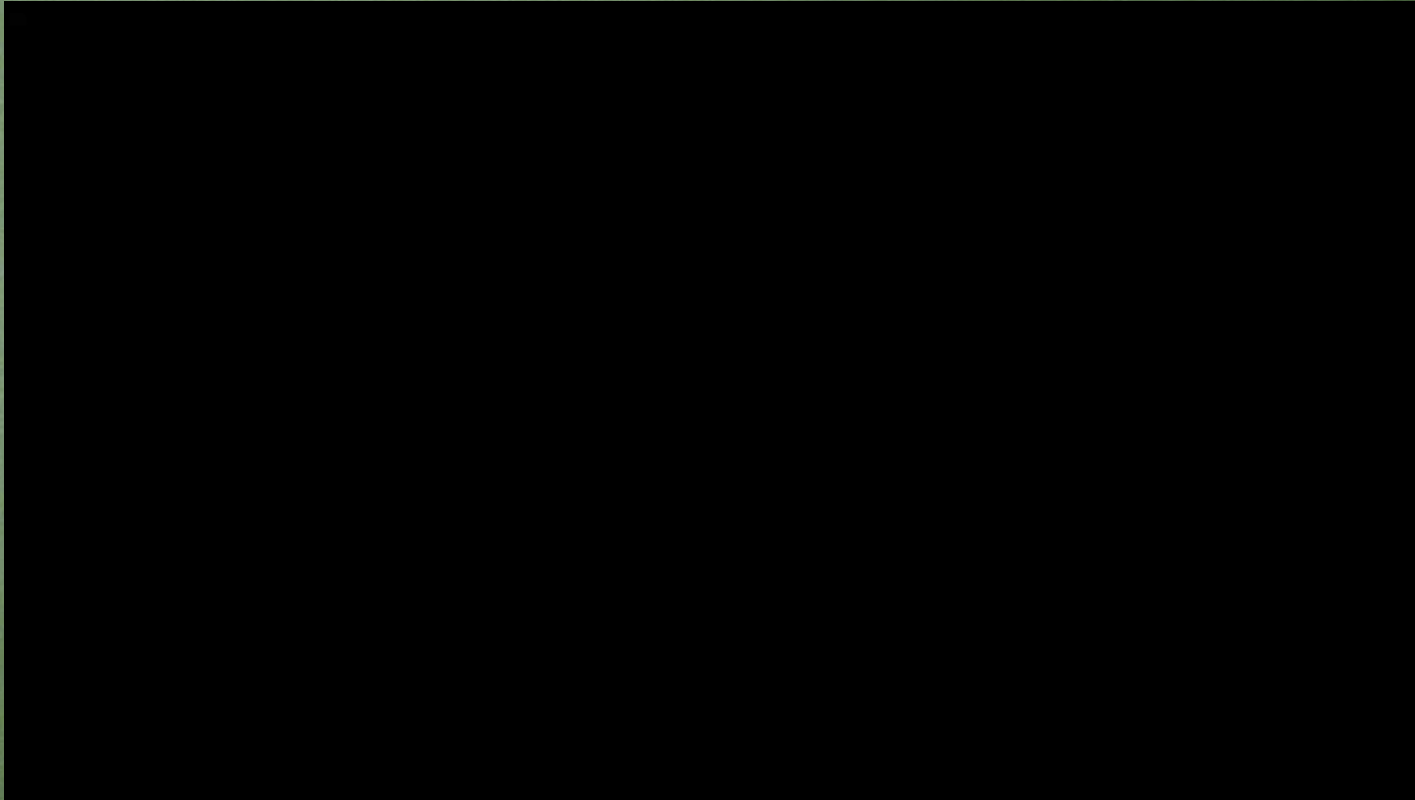


O Equador celeste

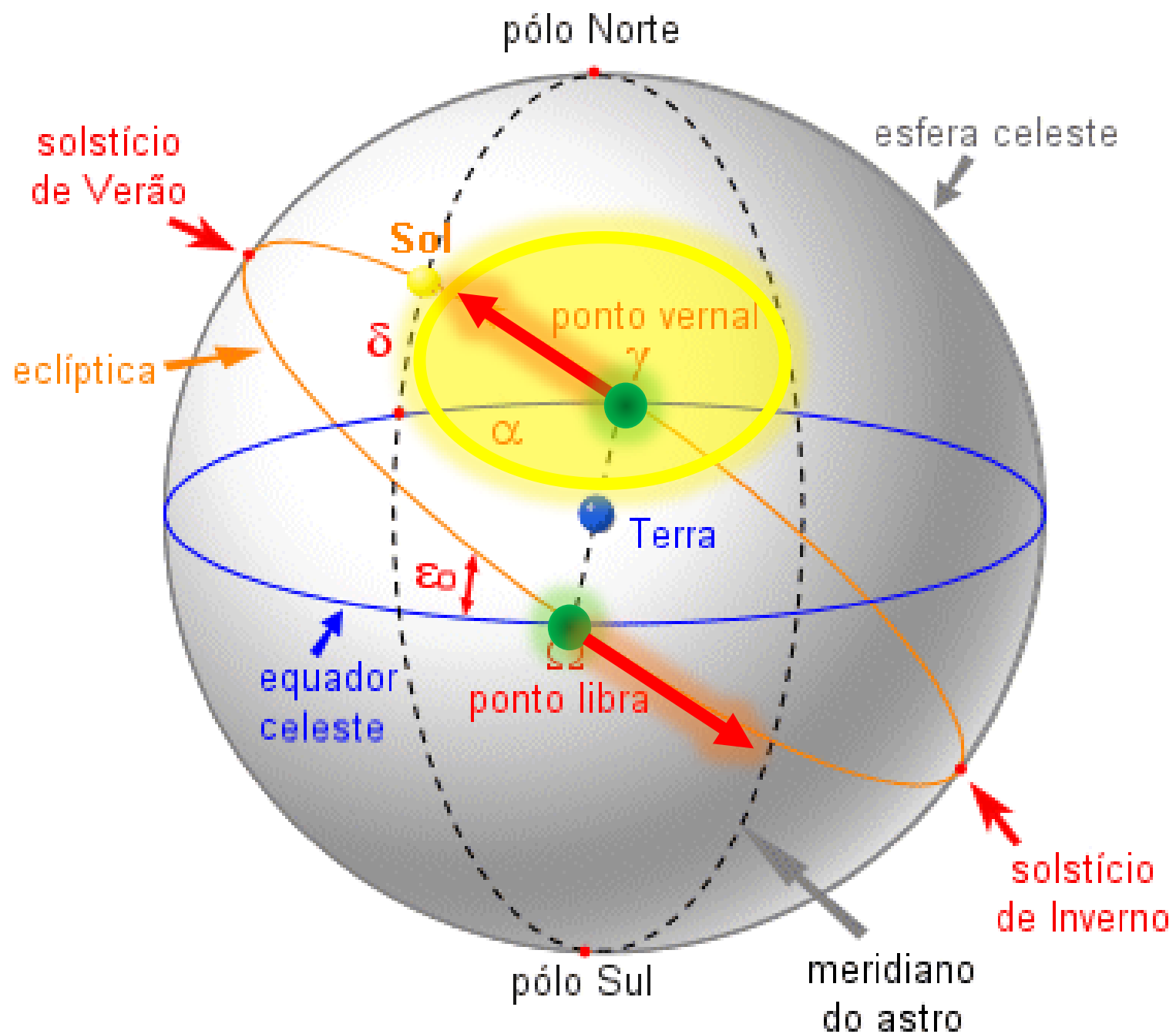


- Projeção imaginária do equador terrestre sobre a esfera celeste.
- Estabelece um plano de grande importância para as localizações astronômicas.

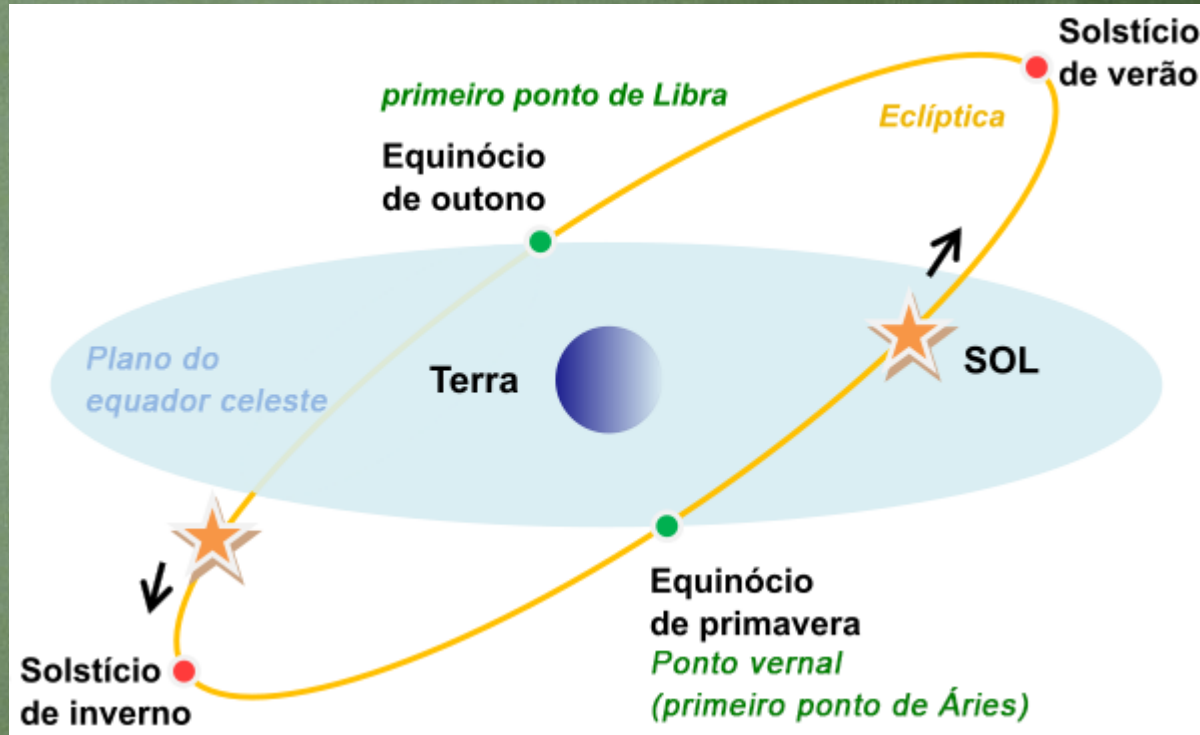
Eclíptica



- Órbita do sol ao entorno da terra
- Contida na esfera celeste
- Permite que contemos o ano terrestre.



O ponto vernal

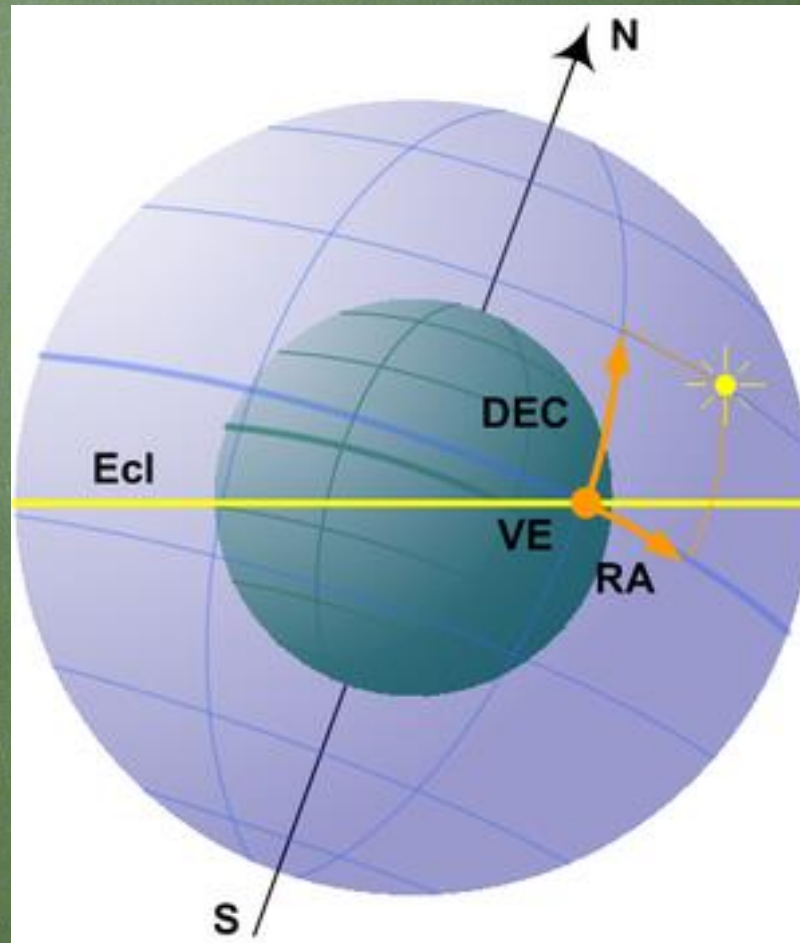


– A enciclopédia livre

- Definido como o lugar na esfera celeste onde a Eclíptica encontra o Equador celeste (Sul → Norte)
- 21 de Março
- Ponto não fixo (Precessão)
- Hoje está com o fundo na constelação de peixes

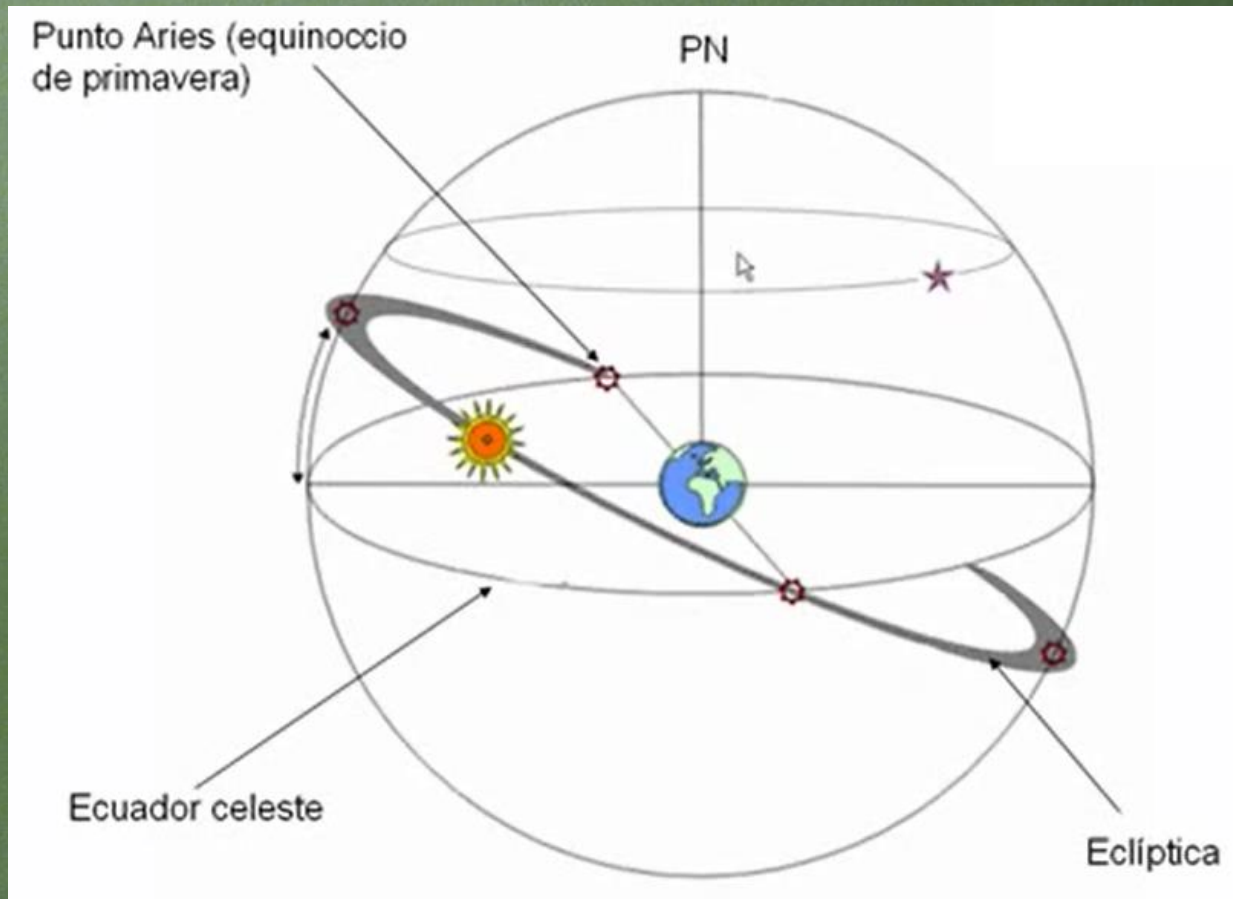
Sistema equatorial de coordenadas

- Dois sistemas em um.
 - ❖ Sistema equatorial local
 - ❖ Sistema equatorial universal



Sistema equatorial universal

- Duas variáveis
 - Declinação (δ)
 - Ascensão reta^[direita] (α)



Punto Aries (equinoccio de primavera)

PN

Punto Aries (equinoccio de primavera)

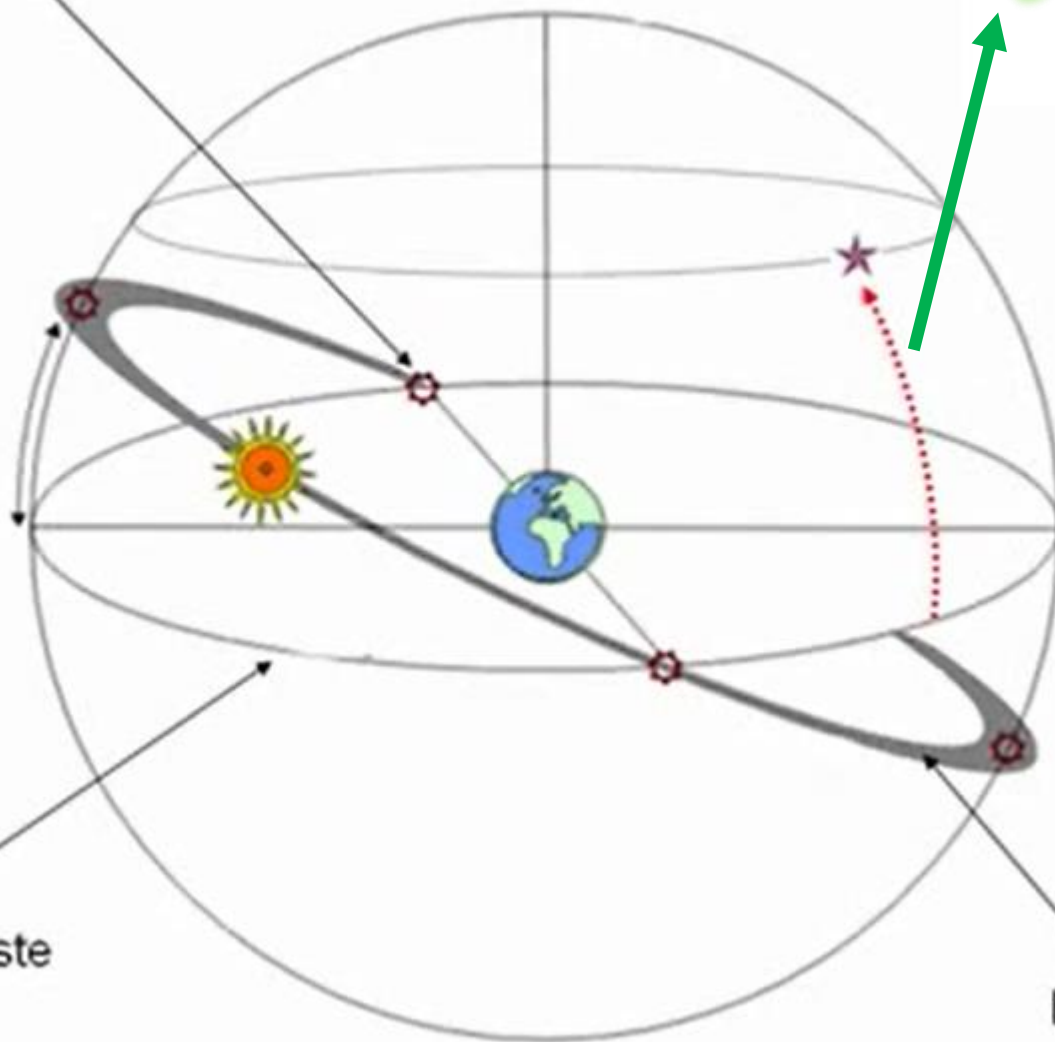
Ecuador cele

PN

Declinação (δ)

Ecuador celeste

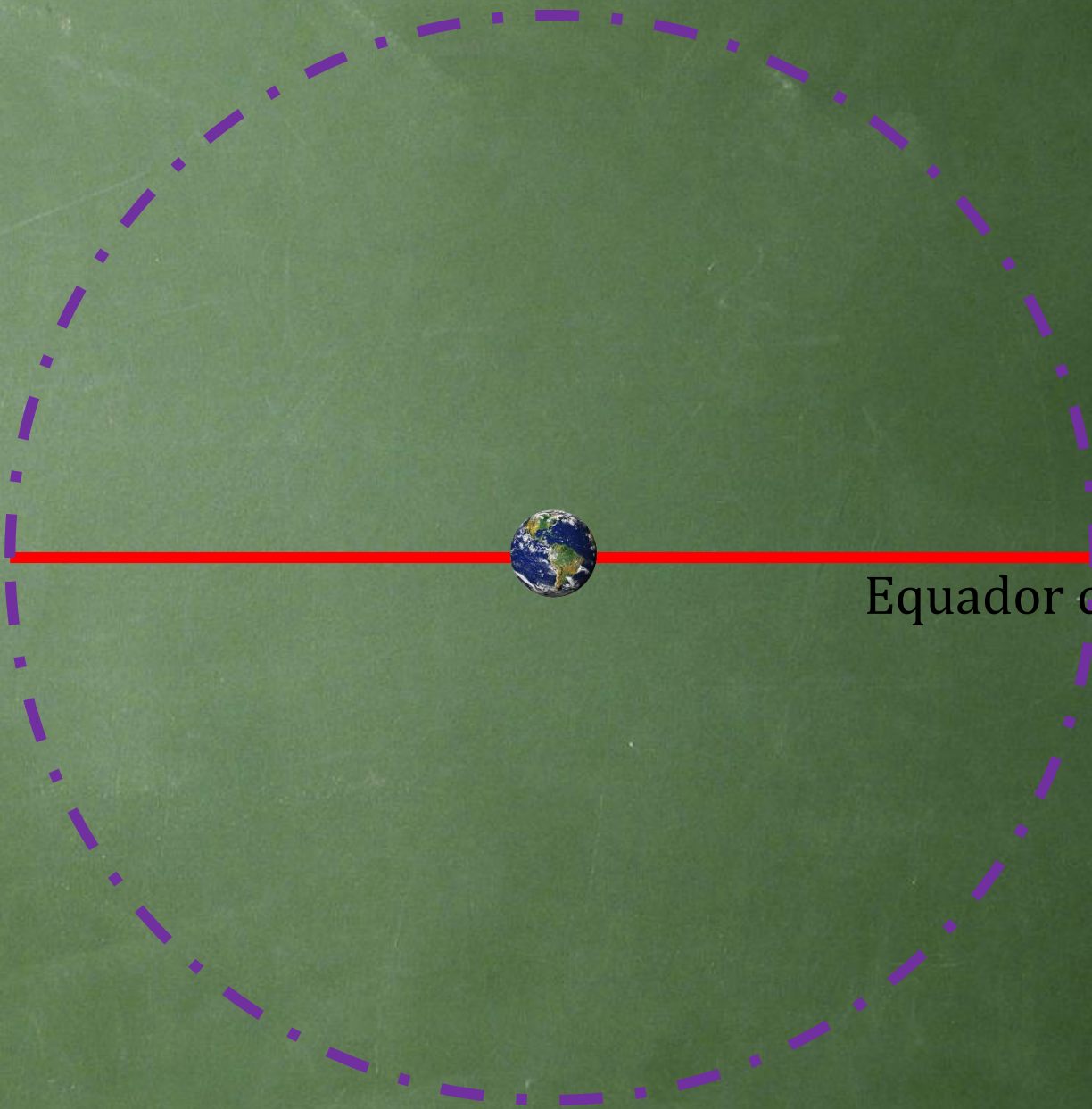
Eclíptica



0° a 90°



0° a -90°



Equador celeste

Esfera celeste

Punto Aries (equinoccio de primavera)

PN

δ de la estrella
(unos $+45^\circ$)

Ecuador celeste

Eclíptica

Ascensão da Estrela (α)
MEDIDO EM HORAS

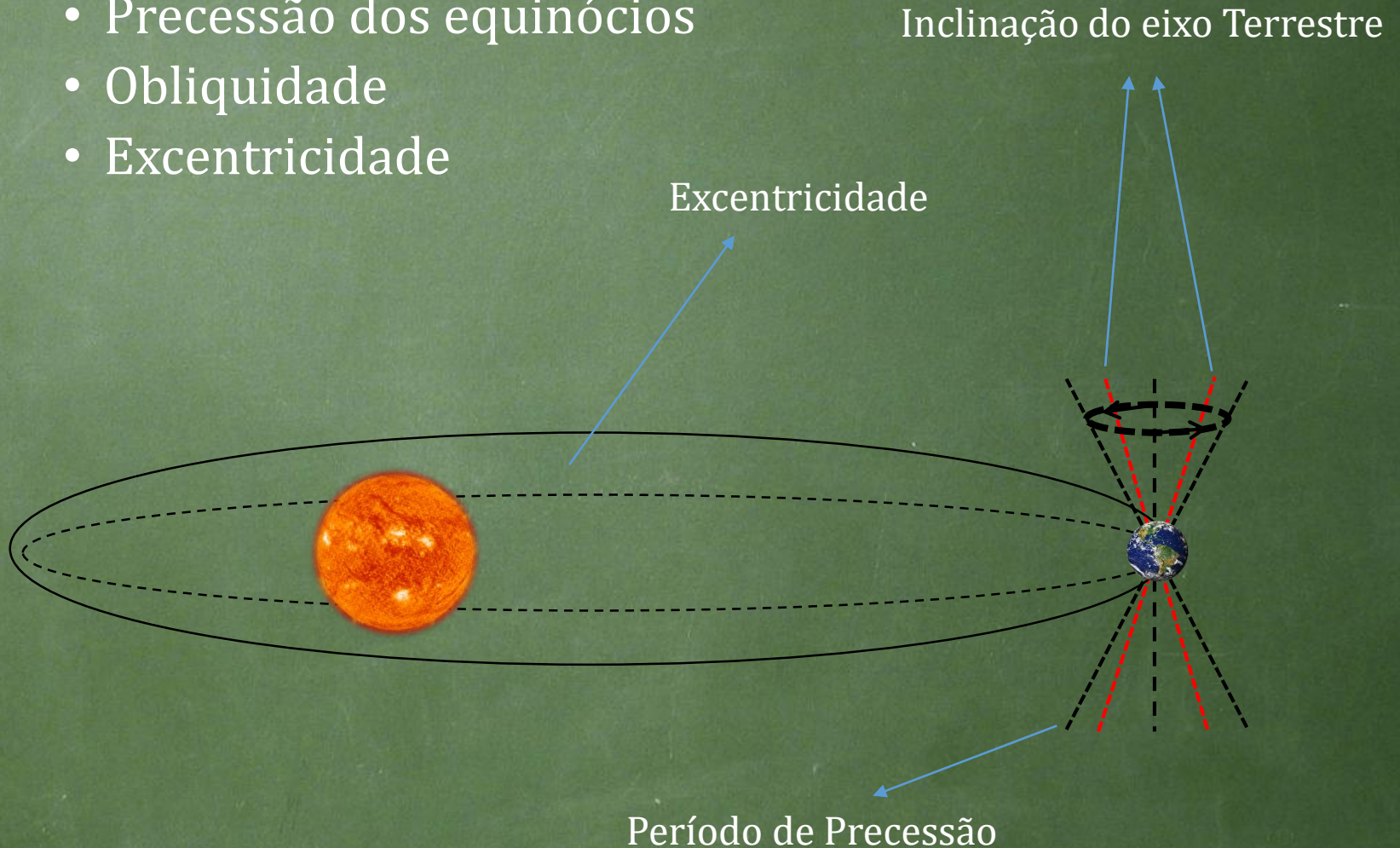
1h = 15°

Sistema equatorial universal

- Duas variáveis
- Declinação (δ)
 - Ângulo do corpo celeste para com o equador celeste.
- Ascensão reta^[direita] (α)
 - “Ângulo” “para a direita” do corpo celeste para com o ponto vernal
 - Medido em horas ($1h = 15^\circ$)

Os ciclos de Milankovitch

- São 3 ciclos distintos:
 - Precessão dos equinócios
 - Obliquidade
 - Excentricidade



Ciclos de Milankovitch

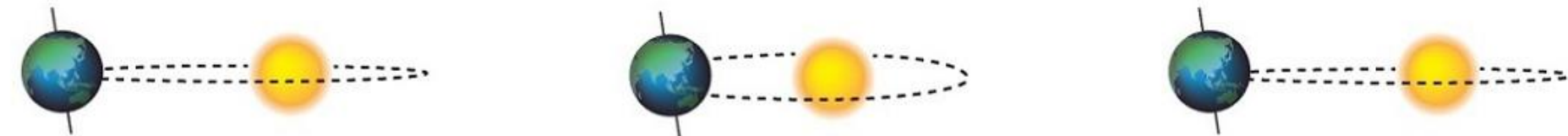
- Precessão



- Obliquidade

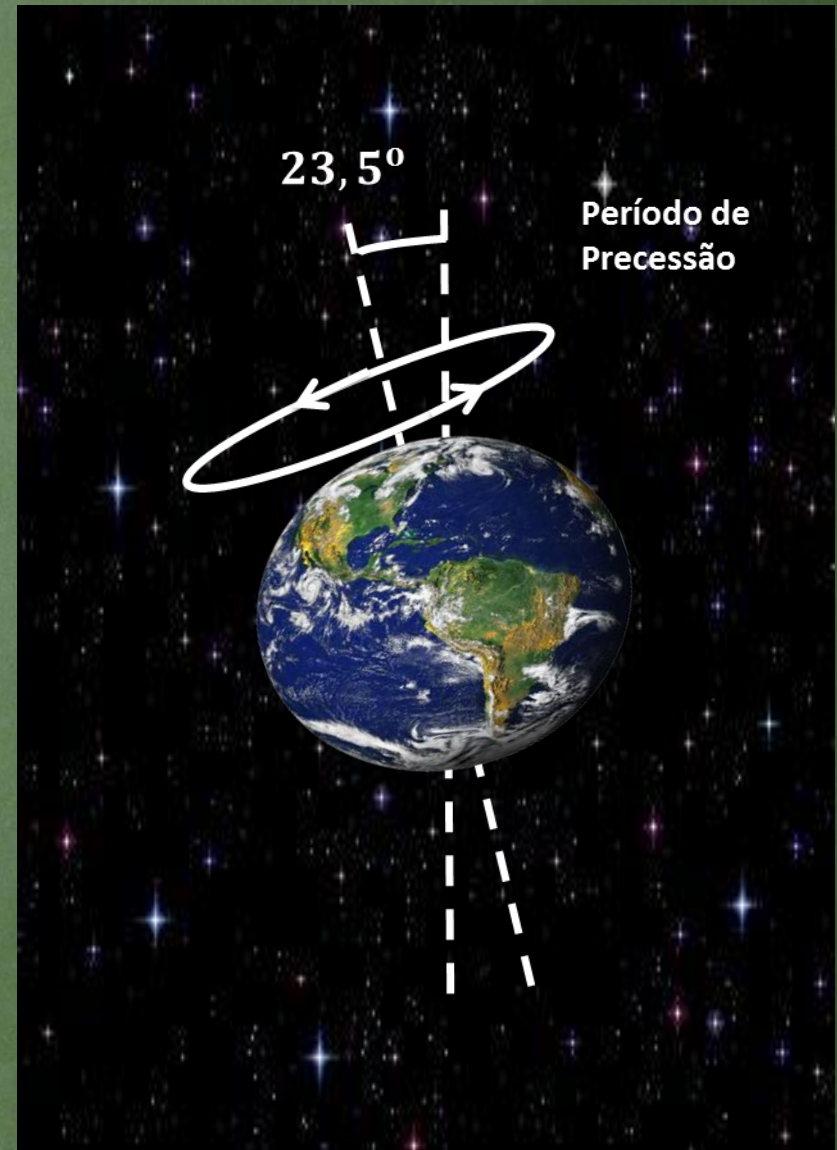


- Excentricidade

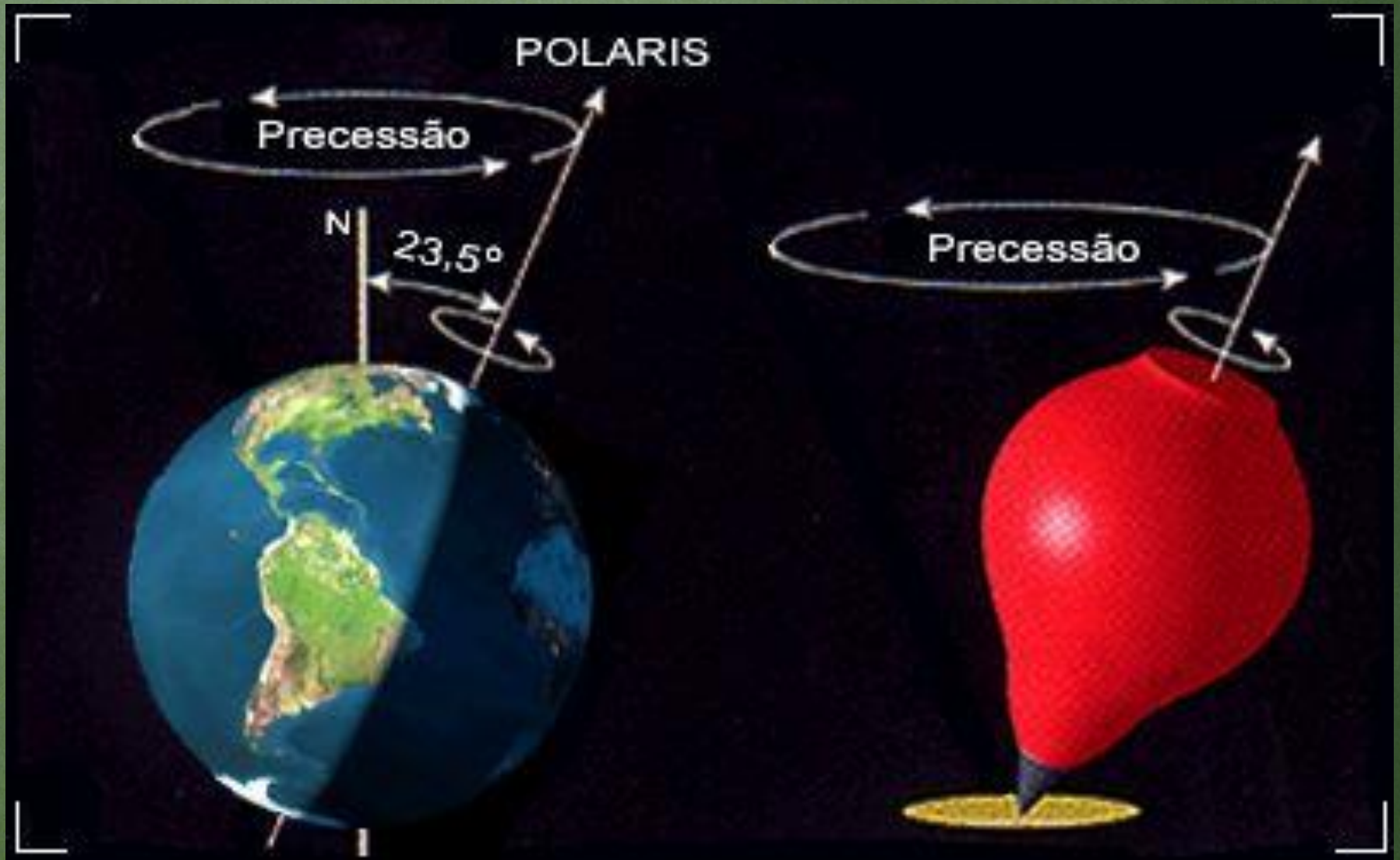


Precessão

- Rotação do eixo da terra.
- Formam-se dois cones imaginários
- Um no hemisfério norte e outro no hemisfério sul
- Formação de círculos imaginários traçados pelas pontas do eixo.
- Período de aproximadamente 26000 anos.



Comparação



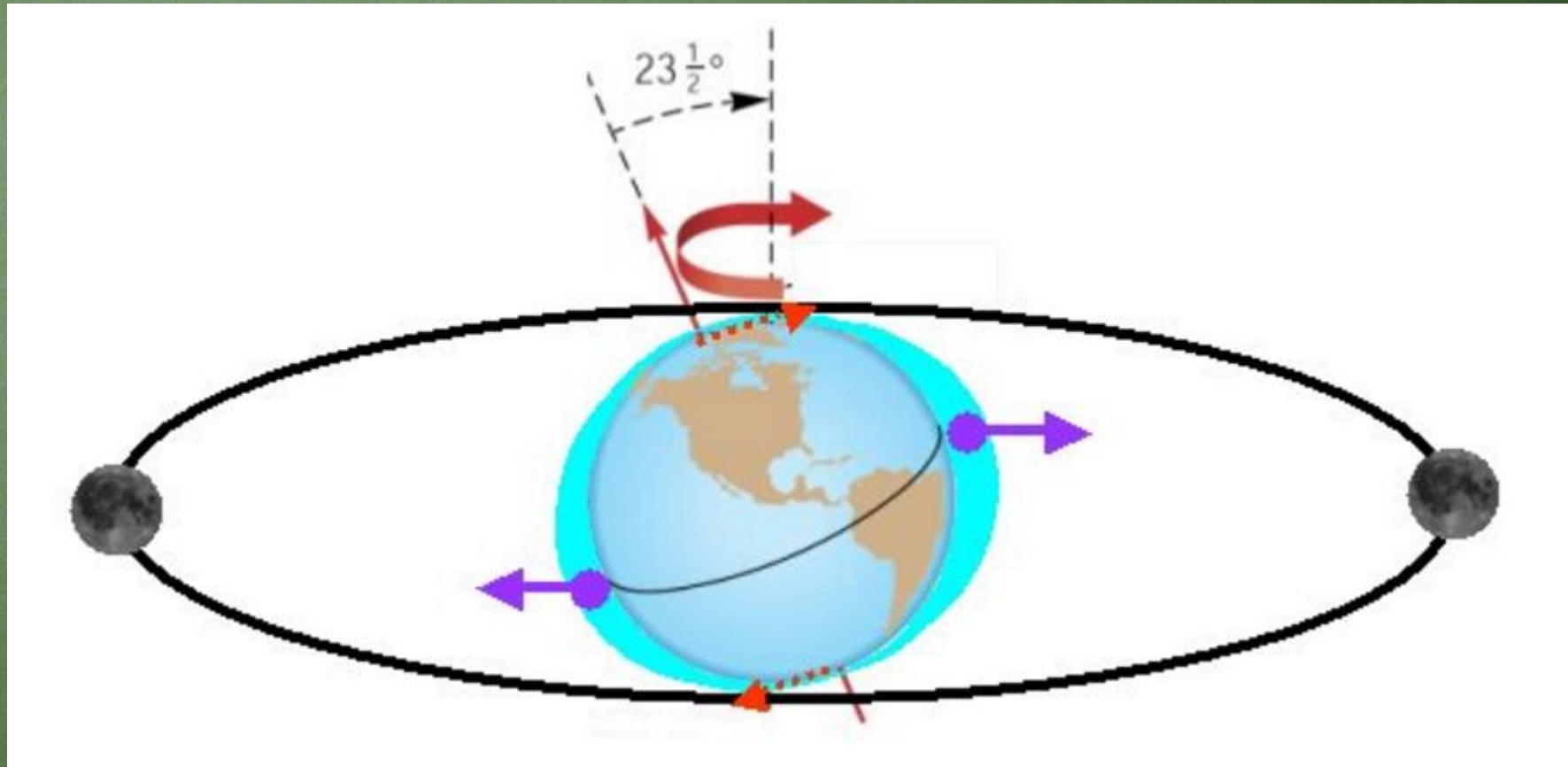
Precessão

- Só ocorre pois a terra não é perfeitamente esférica
- O diâmetro da terra no equador é 43 km maior do que o que passa pelos polos
- Interações gravitacionais com a lua e com o sol

Caminho do polo norte

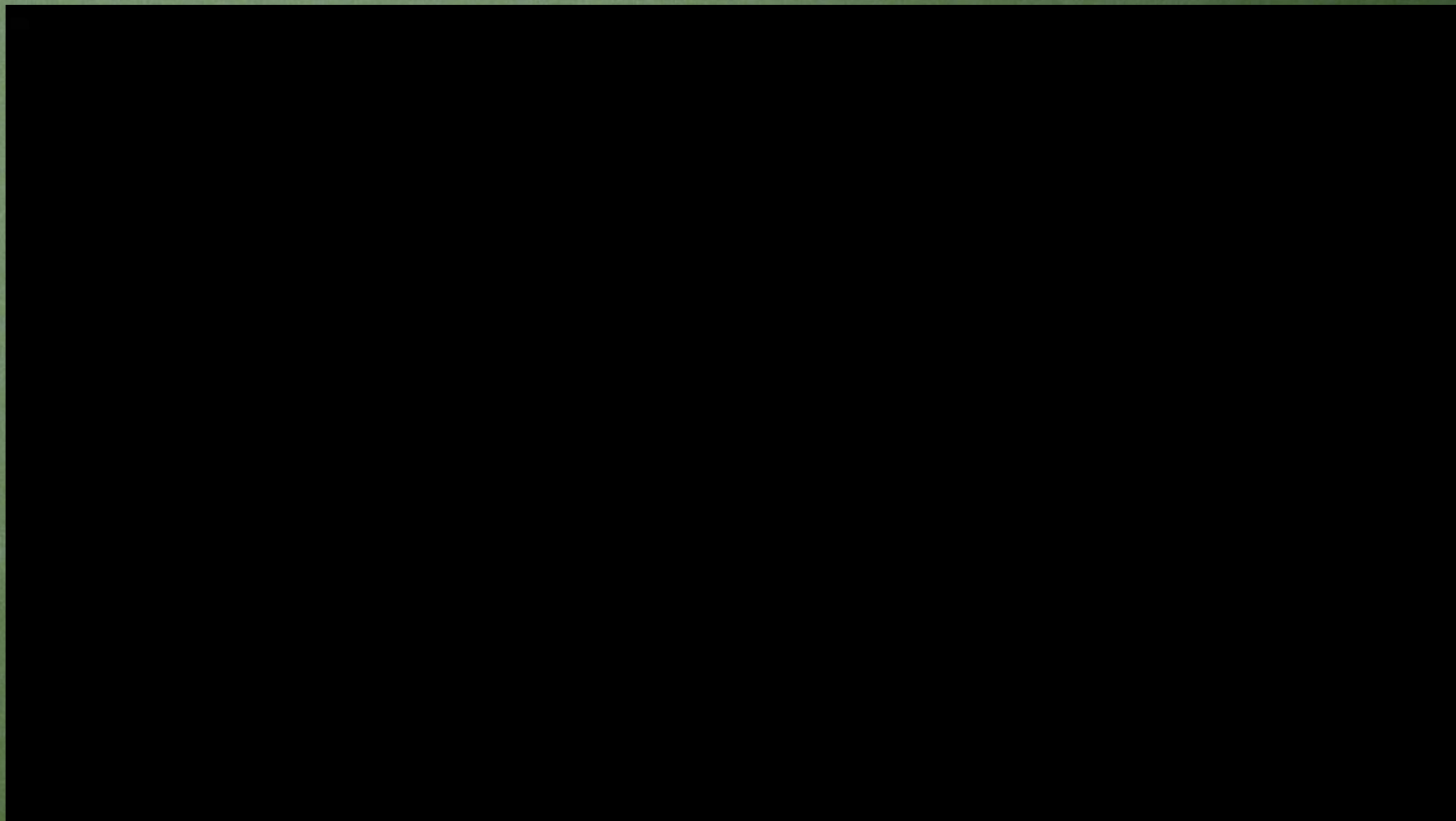


Motivação da precessão

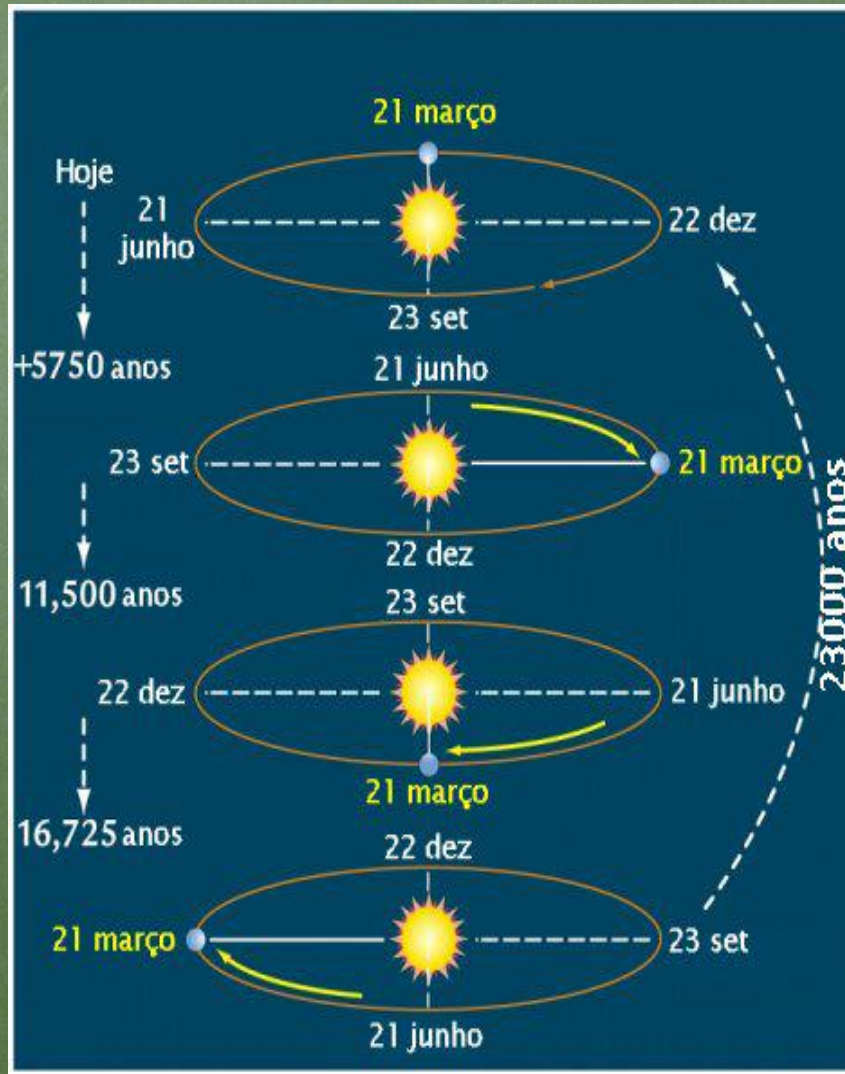


<http://astro.if.ufrgs.br/fordif/node8.htm>

- Interação gravitacional entre a terra e a lua.



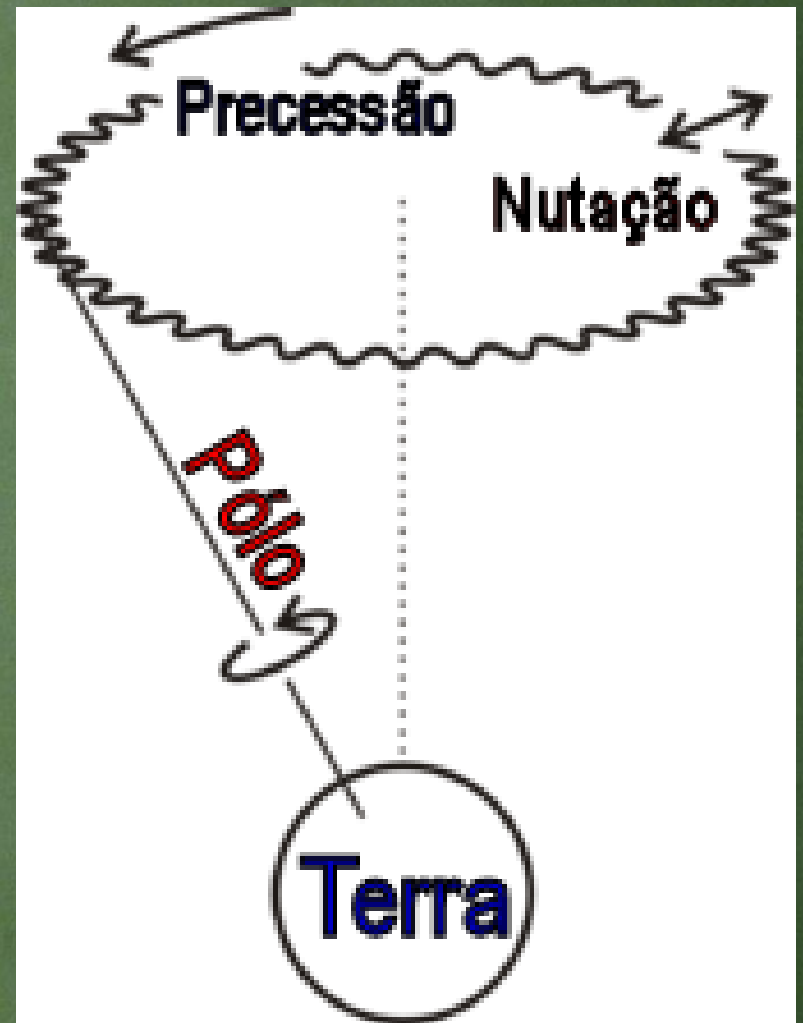
Precessão



- Precessão do Perélio
- Ação gravitacional dos planetas gigantes como júpiter e saturno.
- Pouca influencia nas estações atuais.

Nutação

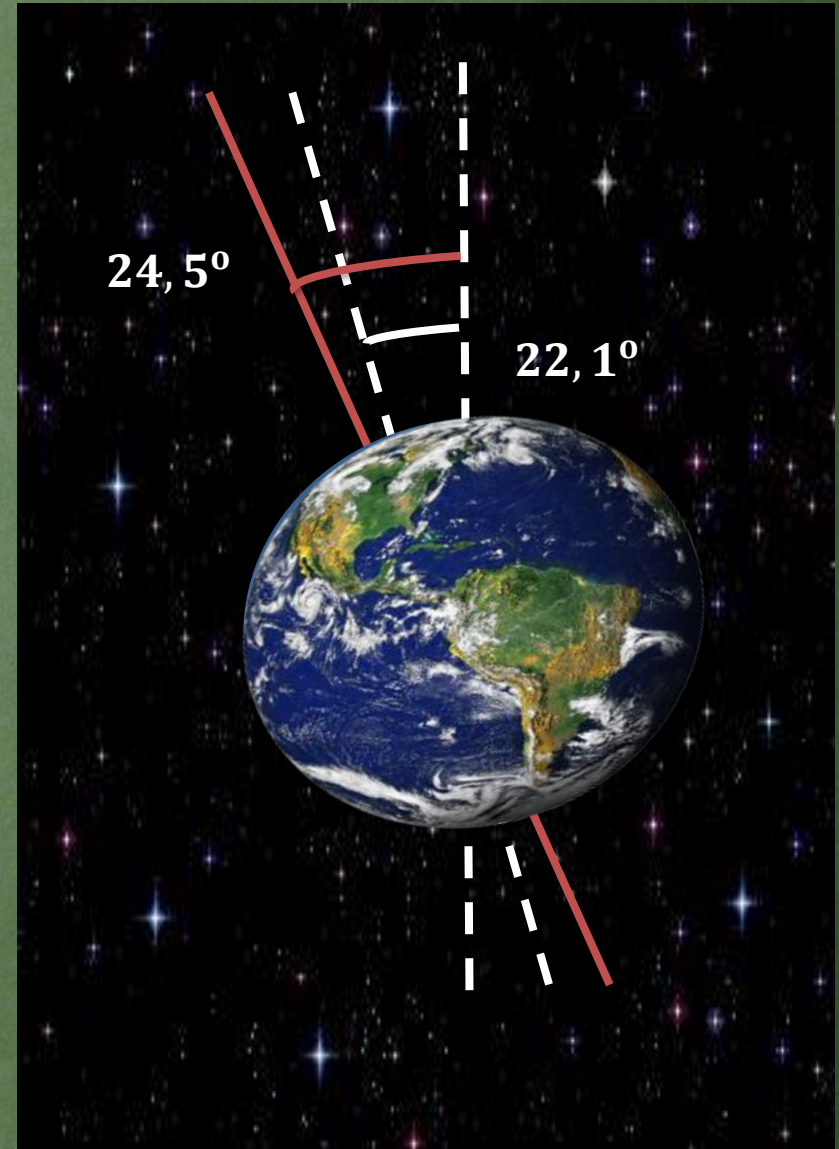
- Ação gravitacional do sol sobre a terra devido a precessão.
- Variações entre e $18^{\circ} 18'$ e $28^{\circ} 36'$.
- Principal contribuição: amplitude de $9,2025''$ e período de 18,613 anos
- Outras contribuições menores



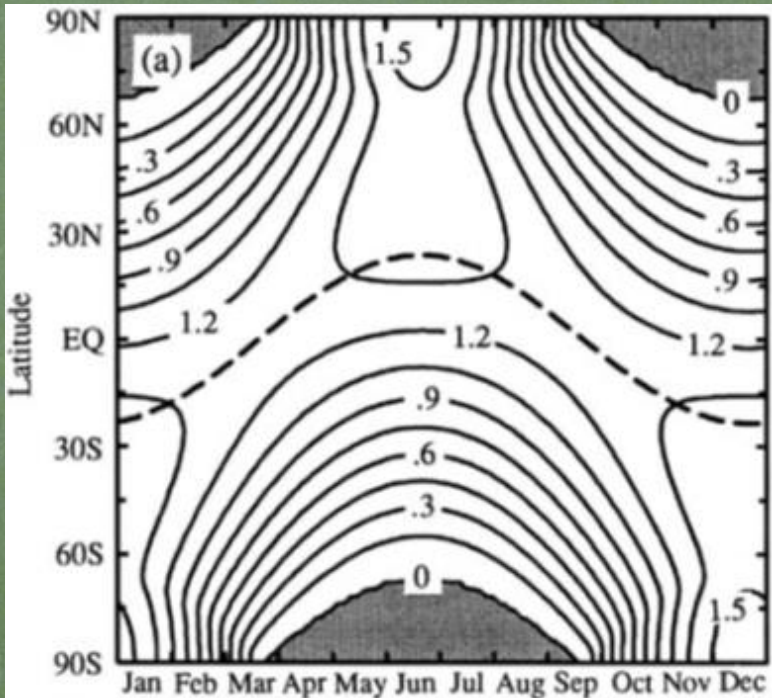
Fonte: <http://astro.if.ufrgs.br/fordif/node8.htm>

Obliquidade

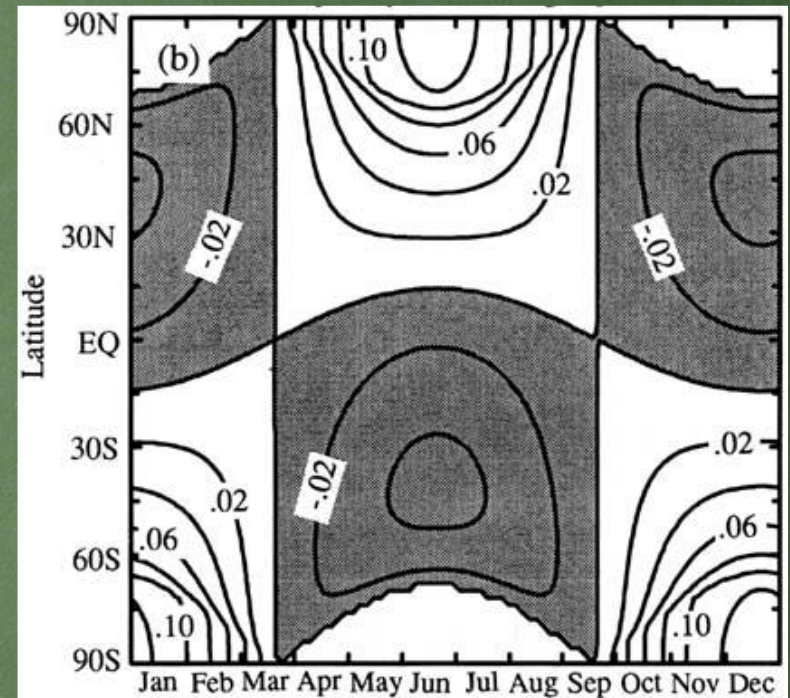
- Ângulo entre o eixo de rotação da Terra e a direção perpendicular ao plano da órbita terrestre
- Afeta a quantidade de radiação que chega no equador e nos polos.
- Período médio de 41 mil anos



Obliquidade

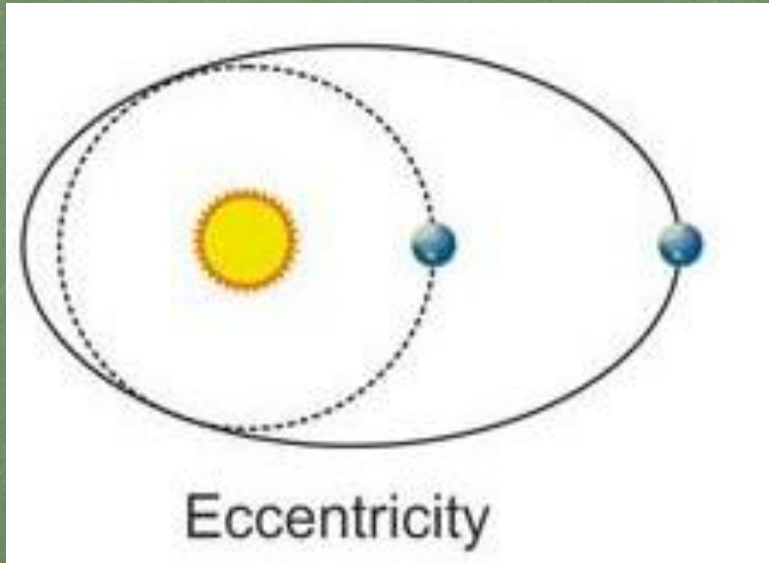


Distribuição de insolação, plotado como função da latitude e do momento do ano, para obliquidade atual de $23,5^\circ$



Diferença da distribuição de insolação, plotada como função da latitude e do momento do ano, para obliquidade máxima de $24,5^\circ$ e $22,5^\circ$

Excentricidade

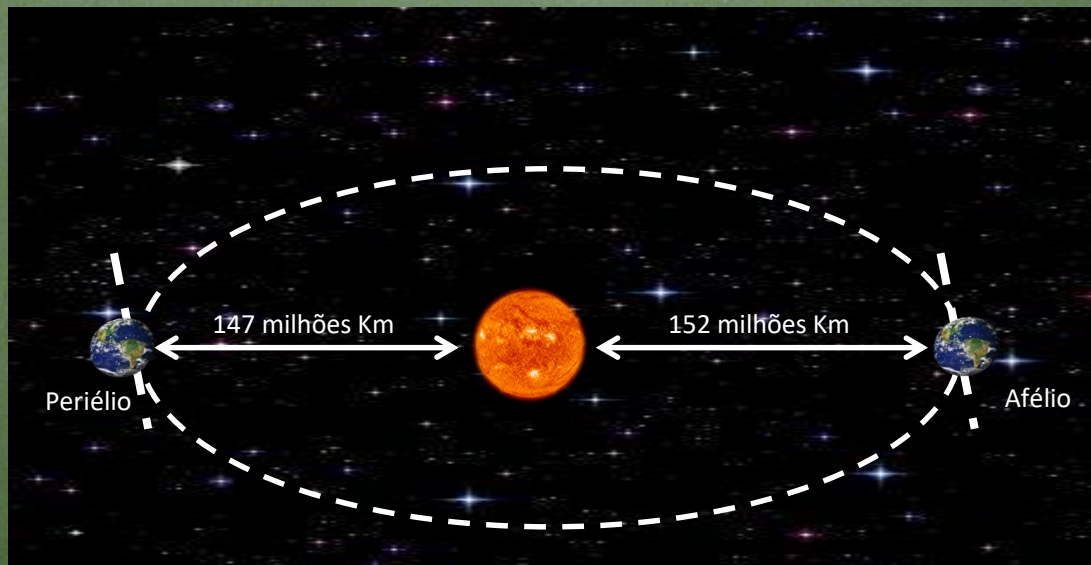


A rigor, a órbita terrestre é elíptica

Parece ter a menor influencia na quantidade de energia que chega à Terra do sol

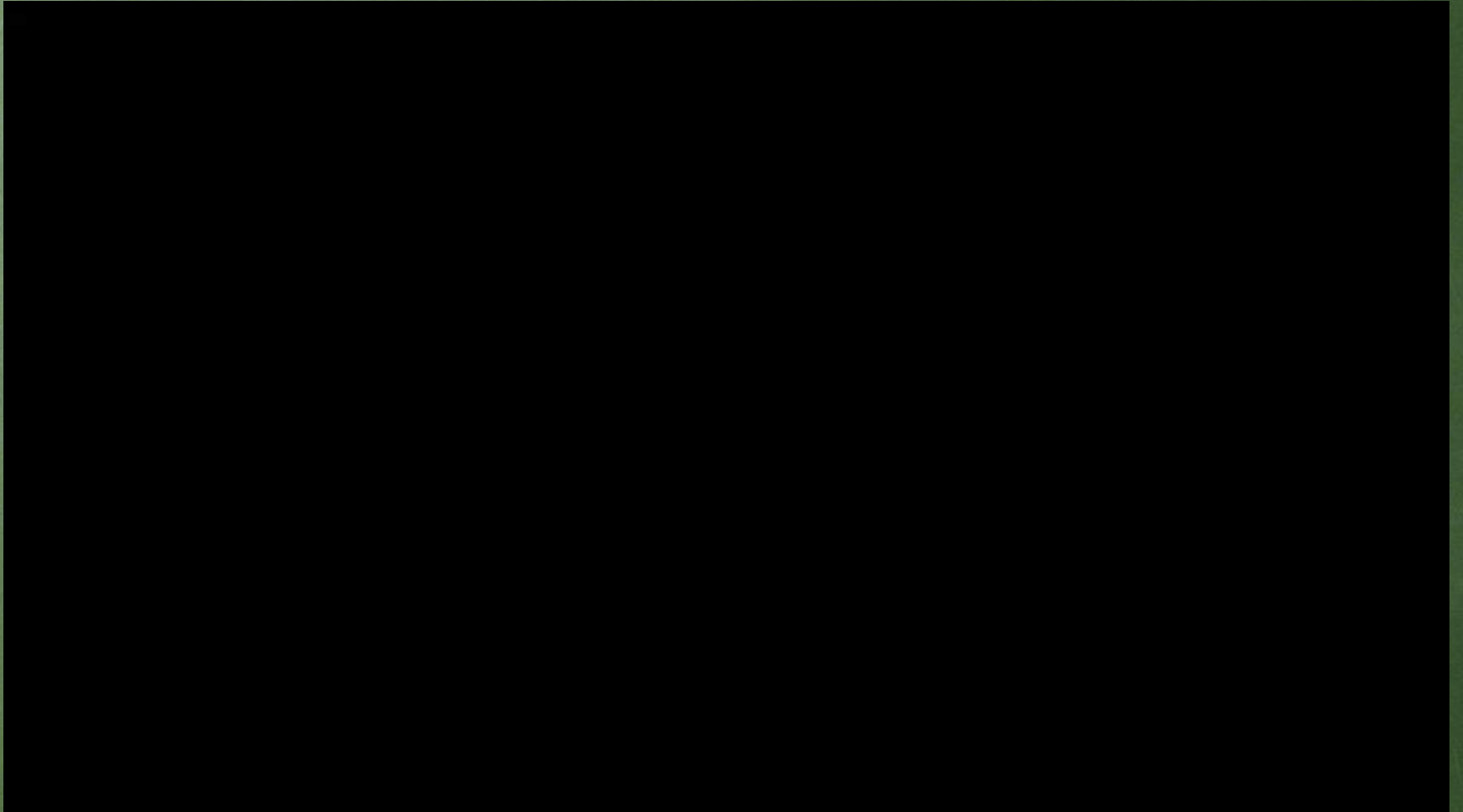
Período de 100.000 anos

Importa muito pouco no clima a curto prazo.

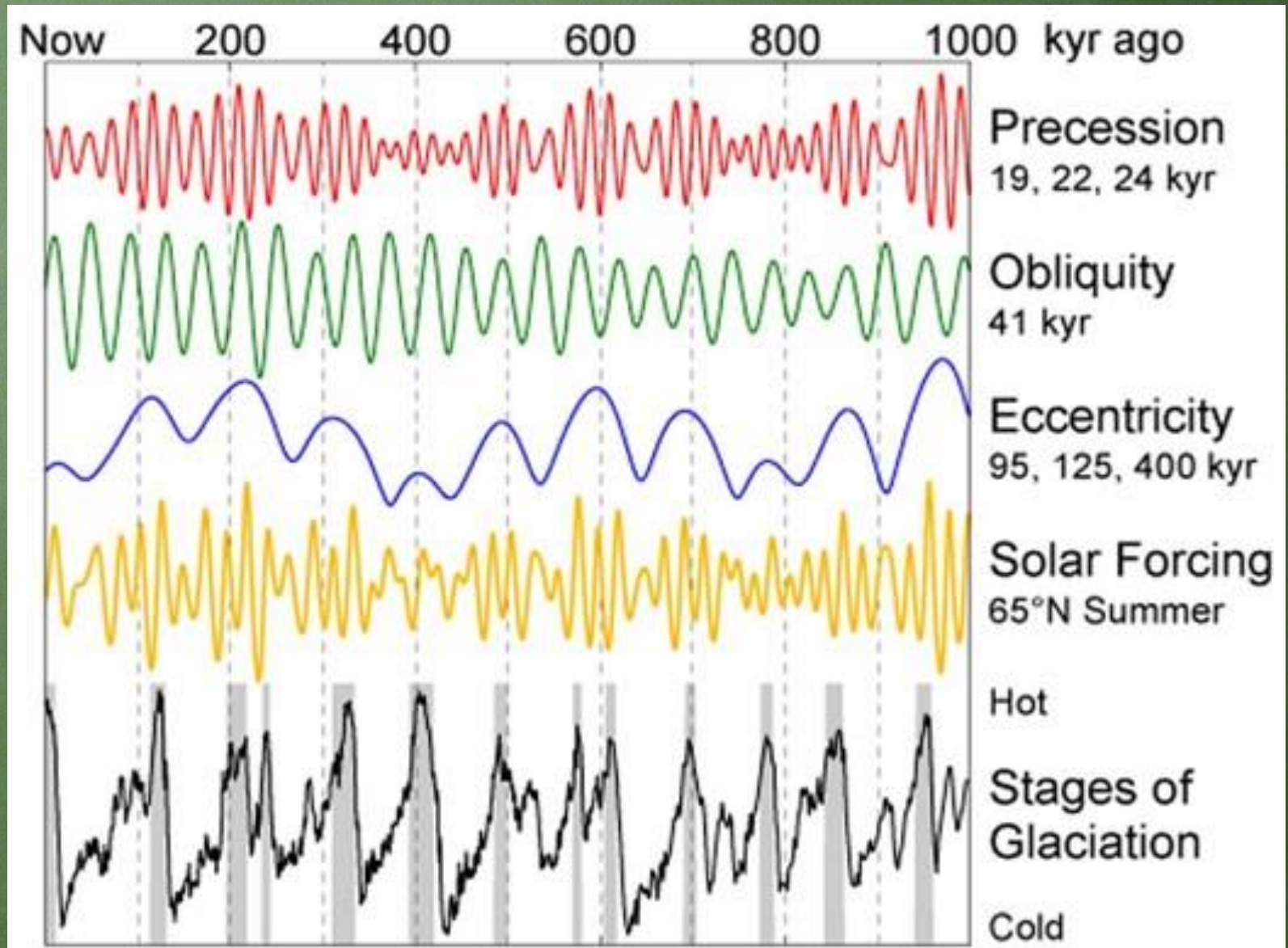


$$e = \frac{d_a - d_p}{d_a + d_p}$$

Excentricidade



Os Ciclos de Milankovich



Parâmetros orbitais e suas influencias

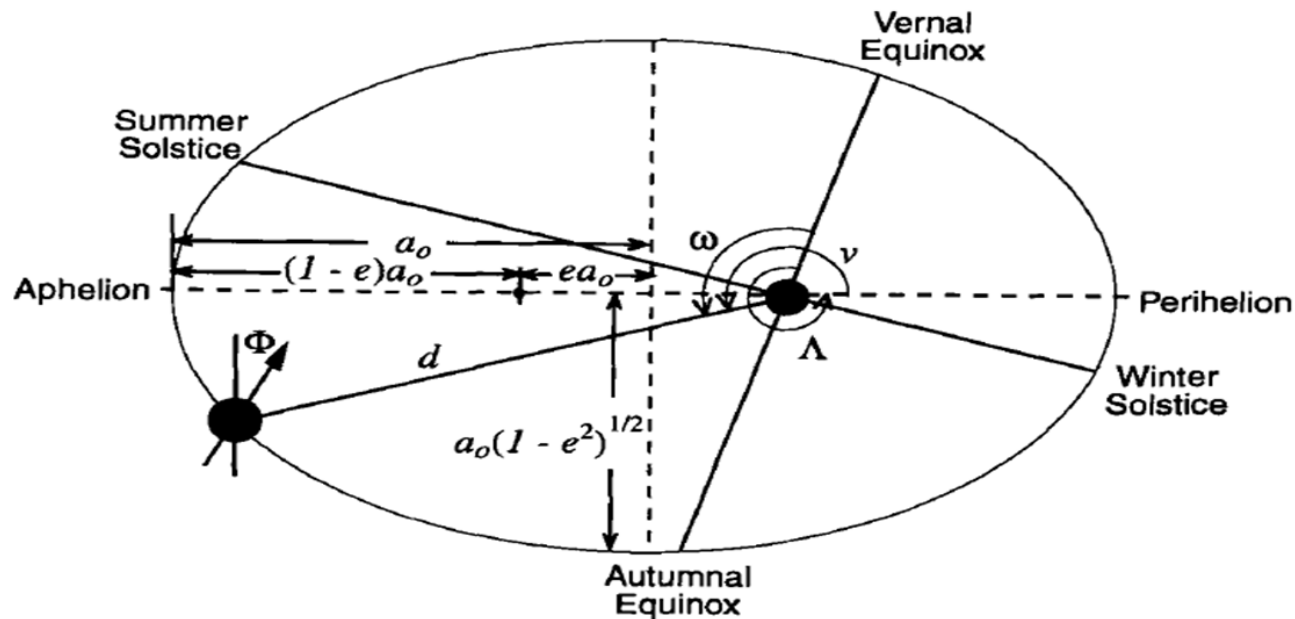


Fig. 11.9 Schematic diagram of Earth's elliptical orbit about the sun showing the critical parameters of eccentricity (e), obliquity (Φ), and longitude of perihelion (Λ) defined relative to the vernal equinox. The size of the orbit is defined by the greatest distance between the ellipse and its center point, which is called the semimajor axis length, a_o . The Earth-sun distance at any time (d), the angle between the position of Earth and perihelion that we call the true anomaly (v), and the angle between the position of Earth and the vernal equinox (ω) are also shown.

Parâmetros orbitais e suas influencias

- Insolação: Quantidade de energia devido à luz solar, por unidade de área e de tempo, que chega à superfície terrestre.
- Vamos discutir matematicamente a influência da excentricidade da orbita terrestre na insolação

Parâmetros orbitais e suas influencias

1. A distancia entre o Sol e a Terra d como função da anomalia v é dada por

$$d(v) = \frac{a_0 (1 - e^2)}{1 + e \cos v}$$

2. A função insolação (Q) é escrita como:

$$Q = \frac{s_0}{4} s(e, \Lambda, \Phi, x, v) = \frac{s_0}{4} \check{s}(, \Phi, x, v) \frac{\check{d}^2}{d(v)^2}$$

Parâmetros orbitais e suas influencias

3. O momento angular da Terra em relação ao Sol, escrito em coordenadas polares, é:

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} = d(v) \hat{r} \times m d(v) \dot{v} \hat{v}$$

$$\vec{L} = m d^2(v) \dot{v} \hat{k}$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{C}{d^2(v)}$$

Parâmetros orbitais e suas influencias

4. Por outro lado, o período orbital da Terra é:

$$T = \frac{2\pi}{C} d^2 \sqrt{1 - e^2}$$

$$C = \frac{2\pi}{T} d^2 \sqrt{1 - e^2}$$

Substituindo na equação anterior:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{2\pi}{T} \frac{d^2}{d^2(v)} \sqrt{1 - e^2}$$

Parâmetros orbitais e suas influencias

5. Para facilitar podemos juntar o termo $\frac{2\pi}{T}$ no denominador da derivada, definindo a variável $t' = \frac{2\pi t}{T}$ e obtendo

$$\frac{dv}{dt'} = \frac{d^2}{d^2(v)} \sqrt{1 - e^2}$$

6. E substituindo isso na função insolação

$$Q = \frac{S_0}{4} s(e, \Lambda, \Phi, x, v) = \frac{S_0}{4} \check{s}(, \Phi, x, v) \frac{d^2}{d(v)^2}$$

Parâmetros orbitais e suas influencias

$$Q = \frac{S_0}{4} \check{s}(\Phi, x, \nu) \frac{1}{\sqrt{1-e^2}} \frac{d\nu}{dt'}$$

$$\int Q dt' = \int \frac{S_0}{4} \check{s}(\Phi, x, \nu) \frac{1}{\sqrt{1-e^2}} d\nu$$

$$Q_{total} \approx (1 - 0,5 e^2) \int \frac{S_0}{4} \check{s}(\Phi, x, \nu) d\nu$$

- E como a excentricidade varia pouco é bastante pequena, a insolação aparentemente recebe pouca influencia da excentricidade.

Parâmetros orbitais e suas influencias

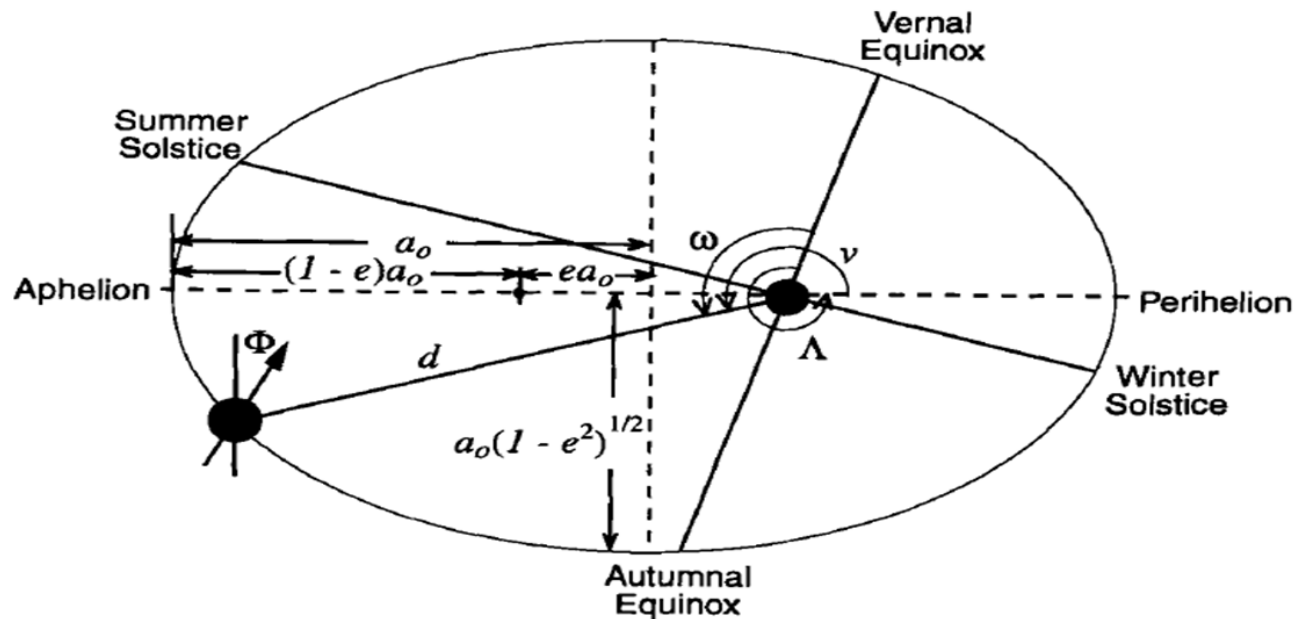


Fig. 11.9 Schematic diagram of Earth's elliptical orbit about the sun showing the critical parameters of eccentricity (e), obliquity (Φ), and longitude of perihelion (Λ) defined relative to the vernal equinox. The size of the orbit is defined by the greatest distance between the ellipse and its center point, which is called the semimajor axis length, a_o . The Earth-sun distance at any time (d), the angle between the position of Earth and perihelion that we call the true anomaly (v), and the angle between the position of Earth and the vernal equinox (ω) are also shown.

Parâmetros orbitais e suas influencias

O efeito da variação da longitude do periélio na insolação aumenta com a excentricidade da órbita. Para ver isso quantitativamente temos da figura que $v = \omega - \Lambda$, então temos a expressão para a insolação que mostra que esta depende da excentricidade e da longitude do periélio.

$$\frac{S_0}{4} s(e, \Lambda, \Phi, x, v) = \frac{S_0}{4} \check{s}(\Phi, x, v) \frac{((1 + e \cos(\omega - \Lambda))^2}{(1 - e^2)^2}$$

Parâmetros orbitais e suas influencias

No norte no solstício de verão $\omega = 2\pi$. Então:

$$\frac{S_0}{4} \check{s}(\cdot, \Phi, x, v) \frac{(1 + e \operatorname{sen}(\Lambda))^2}{(1 - e^2)^2} \approx \frac{S_0}{4} \check{s}(\cdot, \Phi, x, v) (1 + 2e \operatorname{sen}(\Lambda))$$

Parâmetros orbitais e suas influencias

- A insolação efetiva anual varia somente como um resultado da excentricidade em proporção a $(1 - e^2)^{(1/2)}$, o qual, para as excentricidades observadas $e < 0.06$, produz mudanças que parecem ser muito pequenas para serem importantes.
- Obliquidade controla a insolação efetiva do gradiente equador-para-polo e, junto com a excentricidade e longitude do periélio, a variação de amplitude sazonal de insolação em um ponto. Variações na obliquidade dentro de $22.0^\circ - 24.5^\circ$ pode produzir $\sim 10\%$ na variação de insolação no verão em altas latitudes.

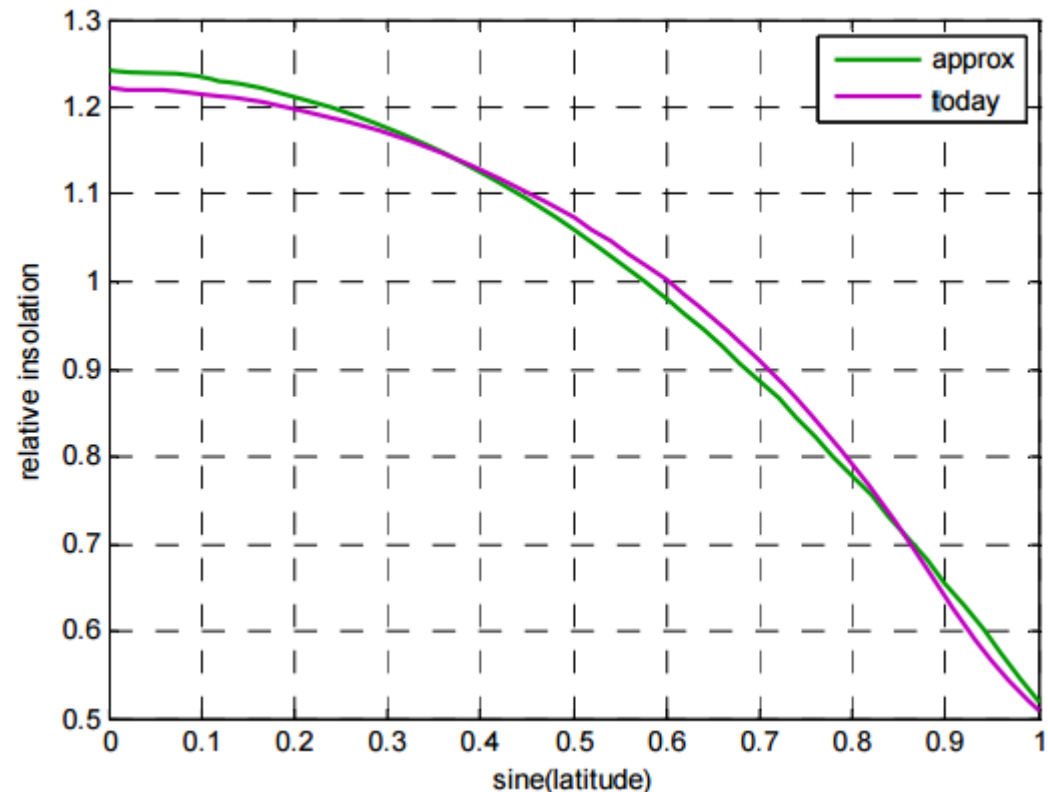
Parâmetros orbitais e suas influencias

- O período de precessão do eixo terrestre muda a distância Terra – Sol, de forma que a insolação pode aumentar ou diminuir de forma sistemática ao longo do ano.
- O parâmetro de precessão $esen\Lambda$ controla a modulação sazonal de insolação devido a excentricidade e e a variação da longitude do periélio Λ . Os efeitos combinados da excentricidade e da longitude do periélio resultam em ~15% de mudanças em altas latitudes de insolações no verão.
- A combinação dos efeitos de parâmetros orbitais pode causar uma variação sazonal de insolação tão grande quanto ~30% em altas atitudes.

Função relativa de insolação

green = quadratic
approximation (Tung
and North)

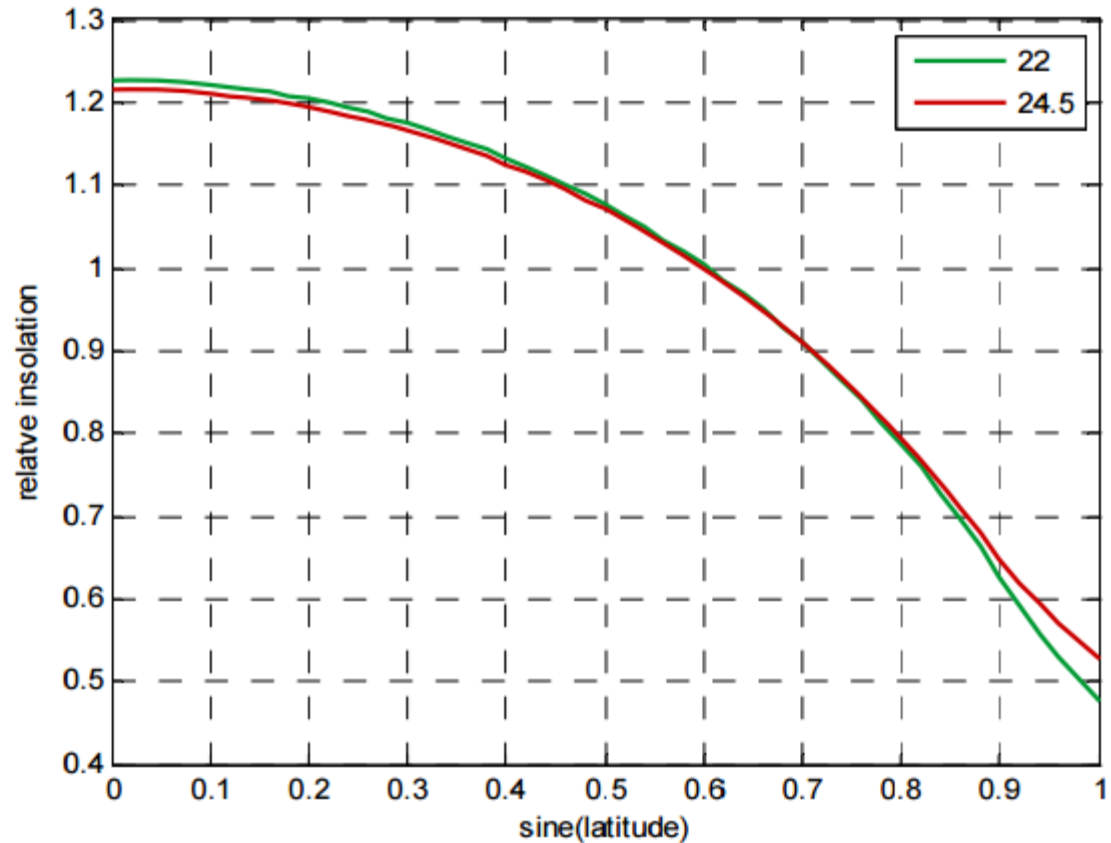
mauve = formula
using obliquity of
 23.5°



Função relativa de insolação

green = obliquity of
 22.0°

red = obliquity of
 24.5°



Efeitos do Ciclo de Milankovitch

Resultam nos ciclos glaciais da Terra. Ciclos Glaciais acontecem basicamente quando há pouca diferença entre verão e inverno (baixa obliquidade do eixo terrestre), e o verão é no afélio, ou seja, as épocas mais quentes são relativamente frias. Isso favorece o não derretimento de geleiras, o consequente aumento do albedo terrestre, e a consequente perda de energia térmica que é acumulada pelo planeta e permite o desenvolvimento da vida. Existem fortes evidências entre a relação dos ciclos de insolação com as eras glaciais, por exemplo a razão de concentração de oxigênio 18 e oxigênio 16, amostras muito bem datadas e que dão um indício do volume de gelo.

Efeitos do Ciclo de Milankovitch

DATA (Milhões de anos)	PERÍODOS DE PRECESSÃO (mil anos)		PERÍODOS DE OBLIQUIDADE (mil anos)	
0	19,0	23,0	41,0	54,0
72	18,6	22,5	39,4	51,2
270	17,6	21,0	35,2	44,3
298	17,4	20,7	34,3	42,9
380	16,8	19,9	32,1	39,4
440	16,4	19,3	30,5	37,2
0	19,0	23,0	41,0	54,0
72	18,6	22,5	39,3	51,1
270	17,5	20,9	34,8	43,7
298	17,4	20,7	34,2	42,7
380	16,9	20,0	32,4	40,0
440	16,6	19,5	31,1	38,1
500	16,2	19,0	29,9	36,2
1000	14,8	17,2	25,5	30,0
1500	13,8	15,8	22,5	26,0
2000	12,6	14,3	19,6	22,1
2500	11,3	12,7	16,7	18,5

Tabela – Valores estimados dos períodos principais da precessão e da obliquidade ao longo do tempo.
(modificado de Berger & Loutre, 1994).

Efeitos do Ciclo de Milankovitch

Como se pode notar por essa tabela, apenas a obliquidade e a precessão estão listadas. A excentricidade, segundo os autores, não teria sofrido variações significantes, o que faz com que as razões precessão: excentricidade e obliquidade: excentricidade tenham mudado ao longo do tempo geológico (De Boer & Smith, 1994). Outro ponto digno de nota é que a obliquidade possui uma variabilidade maior do que a precessão.

Efeitos do Ciclo de Milankovitch

No sistema solar, os planetas têm órbitas que são todos mais ou menos no mesmo plano, chamado a eclíptica. A energia solar captada pela Terra é em média durante o ano de 1367 W/m^2 . Essa energia varia de 6% entre o ponto mais próximo do Sol e o ponto mais distante, que varia entre 1408 e 1326 W/m^2 . Ao longo do tempo, a excentricidade varia substancialmente, de modo que a distância Terra-Sol varia entre 129 e 187 milhões de km.

Widiasih-Budyko Ice Line Model

$$\frac{\delta T}{\delta t} = Qs(y)(1 - \alpha(y, \eta)) = (A + BT(\eta, t) + C(T(\eta) - T(\eta, t)))$$

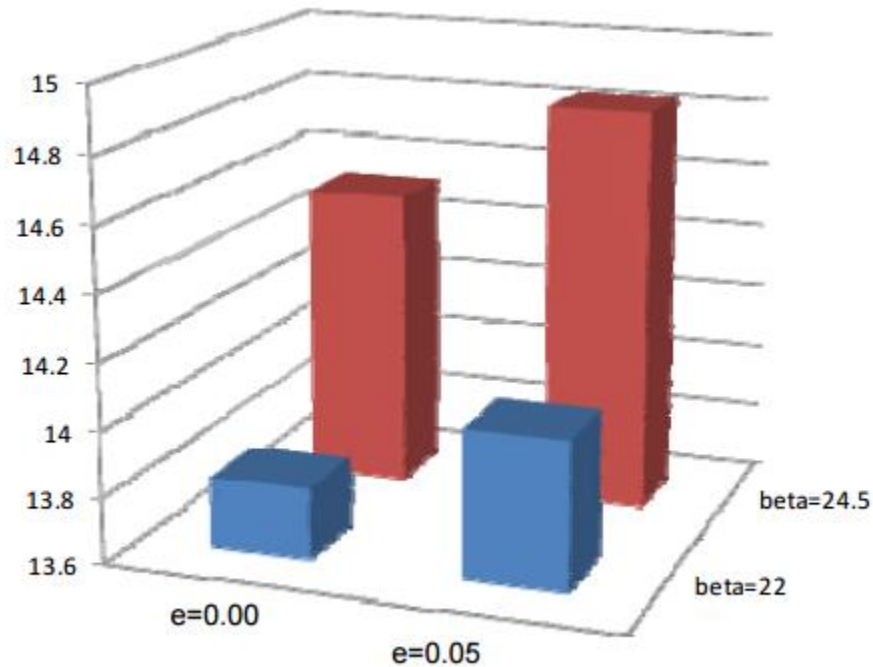
$$\frac{\delta \eta}{\delta t} = \varepsilon h(\eta)$$

$$\bar{T} = \frac{1}{B} (Q(1 - \bar{\alpha}(\eta)) - A) \text{ - Temperatura global significativa}$$

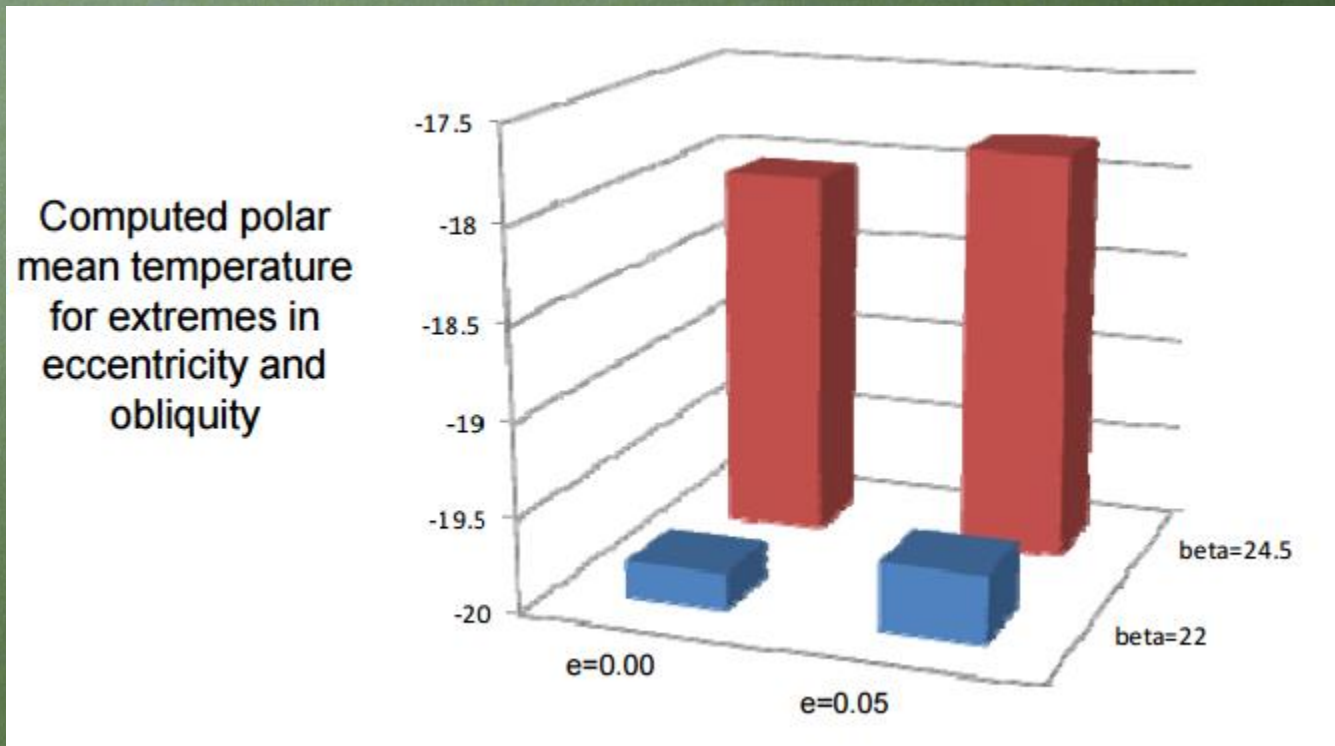
$$T(1) = \frac{1}{B+C} (Qs(1)(1 - \alpha_2) - A + C\bar{T}) \text{ - Temperatura no Polo}$$

Temperatura Global anual significativa

Computed global mean temperature for extremes in eccentricity and obliquity



Temperatura Polar anual significativa



Fonte: Seminar on the Mathematics of Climate Change School of Mathematics March 31, 2009