

- **Sigla:** AGM5713
- **Nome:** Dinâmica da Atmosfera I
- **Área:** Meteorologia
- **Objetivos:**
 - Aplicar os conceitos básicos da Dinâmica dos Flúidos aos sistemas atmosféricos; compreender os conceitos de escala de movimentos; aproximações básicas das equações meteorológicas. Diferentes tipos de sistemas de coordenadas atmosféricas.
- **Justificativa:**
 - É fundamental para o desenvolvimento de pesquisas que envolvem a evolução dinâmica da atmosfera terrestre e para a previsão numérica de tempo e clima.
- **Conteúdo:**
 - Equações fundamentais. Análise de escala e aproximações usuais: tradicional, hidrostática, inelástica, Boussinesq e respectivas condições de validade. . Derivação e uso de coordenadas de pressão, isentrópicas e sigma nas equações meteorológicas. Soluções analíticas simplificadas das equações do movimento e suas aplicações. Trajetórias e linhas de corrente. Vorticidade e circulação

Bibliografia

- HALTINER, G.J. & WILLIAMS, R.J. - Numerical Prediction and Dynamic Meteorology, 2ª Edição. New York, Wiley, 1980.
- HOLTON, J.R. - An Introduction to Dynamic Meteorology. 3ª Edição, Academic Press, 1992.
- MARTIN, J.E – Mid-Latitude Atmospheric Dynamics: A First Course, John Wiley & Sons, 2006
- PEDLOSKY, J. - Geophysical Fluid Dynamics. New York, Springer Verlag, 1979.
- SALBY, M.L. - Fundamentals of Atmospheric Physics, Academic Press, 1996..
- VALLIS, G.K – Atmospheric and Oceanic Fluid Dynamics: Fundamentals and Large-scale Circulation. Cambridge University Press, 2006
- WIIN-NIELSEN, A. - Compendium of Meteorology Part I: Dynamic Meteorology - WMO - Nº 364, World Meteorological Organization, 1973.
- DUTTON The Ceaseless Wind: An Introduction to the Theory of Atmospheric Motion, Springer, 1986.
- SALTZMAN, B. Dynamical Paleoclimatology: Generalized Theory of Global Climate Change, Academic Press, 2001

- **Aulas:** 5as feiras das 10 as 12 hrs e 6as das 8 as 10 hrs
- **Avaliação:** Listas de exercícios e provas
- Nota final = NF Média das provas = MP
- Média das listas = ML
- Se $MP \geq 5,0$ -> $NF = (2MP + ML)/3$
- Se $MP < 5,0$ -> $NF = MP$
- NF é convertido em conceito A, B, C, D, conforme a distribuição de notas da classe.
-
- Prova 1 dia 27 de março – sexta feira
- Prova 2 dia 30 de abril – quinta-feira
- Prova Substitutiva – a ser marcada

Material da disciplina

- www.dca.iag.usp.br/www/material
- www.dca.iag.usp.br/www/material/mafdsdia/AGM5713

Por que é importante estudar dinâmica da atmosfera?

- Entender
 - diagnósticos e análises

- Prever
 - Prognósticos de tempo, clima e qualidade do ar

Algumas definições (Saltzman, cap 1)

- Tempo: evolução diária da atmosfera
- Clima: média do estado da atmosfera ao longo de décadas
- Sistema Climático: todos os domínios que interagem livremente com a atmosfera. Inclui oceanos, gelo, biosfera e porções superiores da crosta terrestre
- Forçantes climáticas: todas as forçantes que influenciam o sistema climático mas não são influenciadas pelo clima: radiação solar, parâmetros orbitais, movimentos tectônicos e geotérmicos e...forçantes antrópicas.

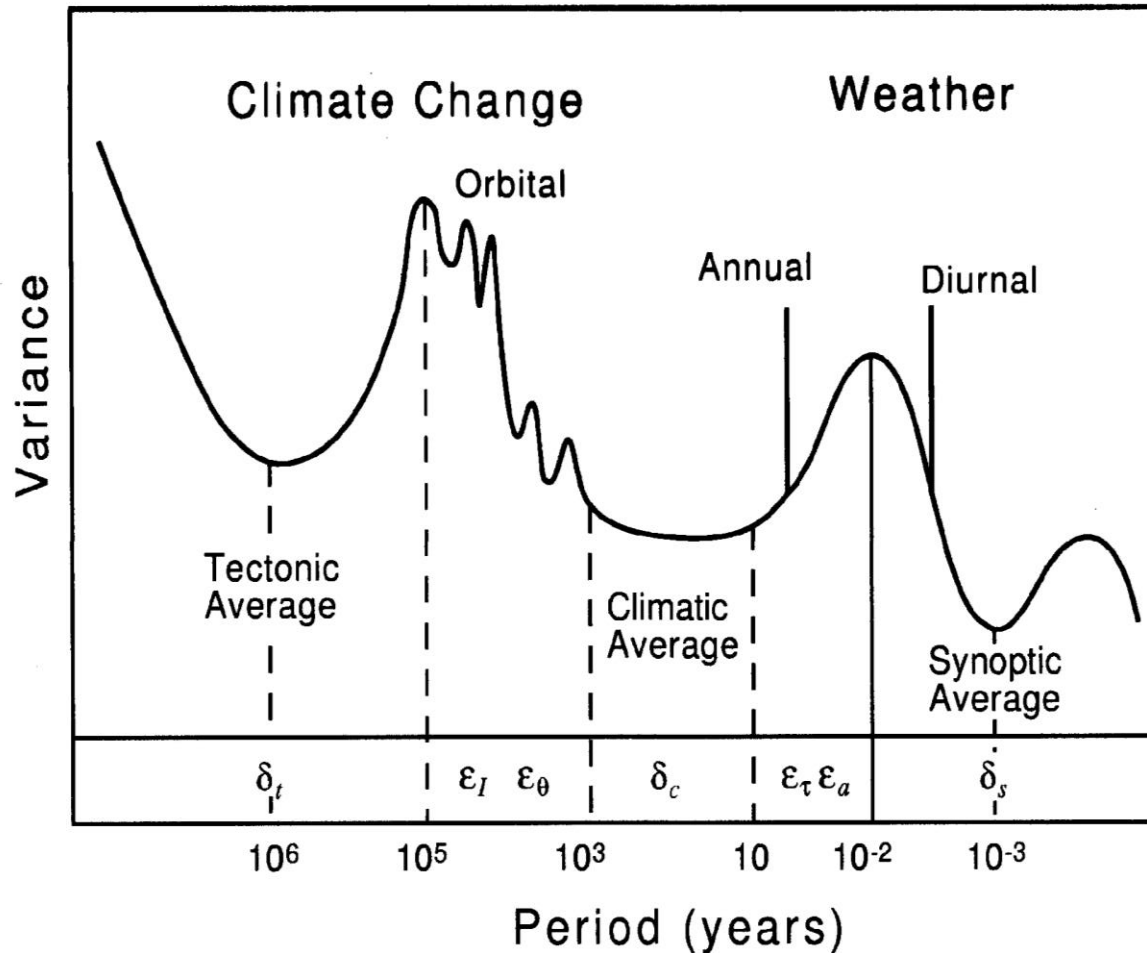
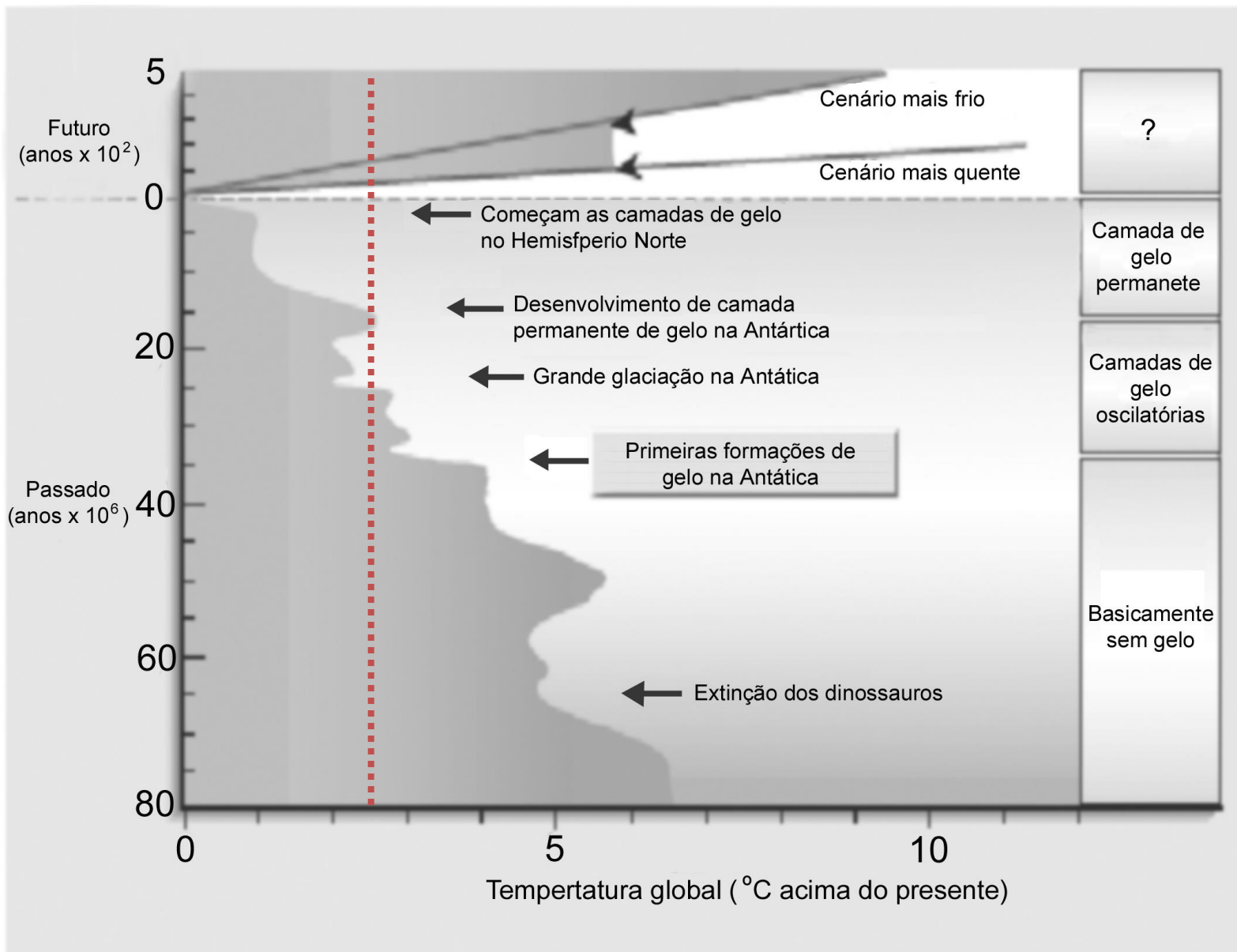
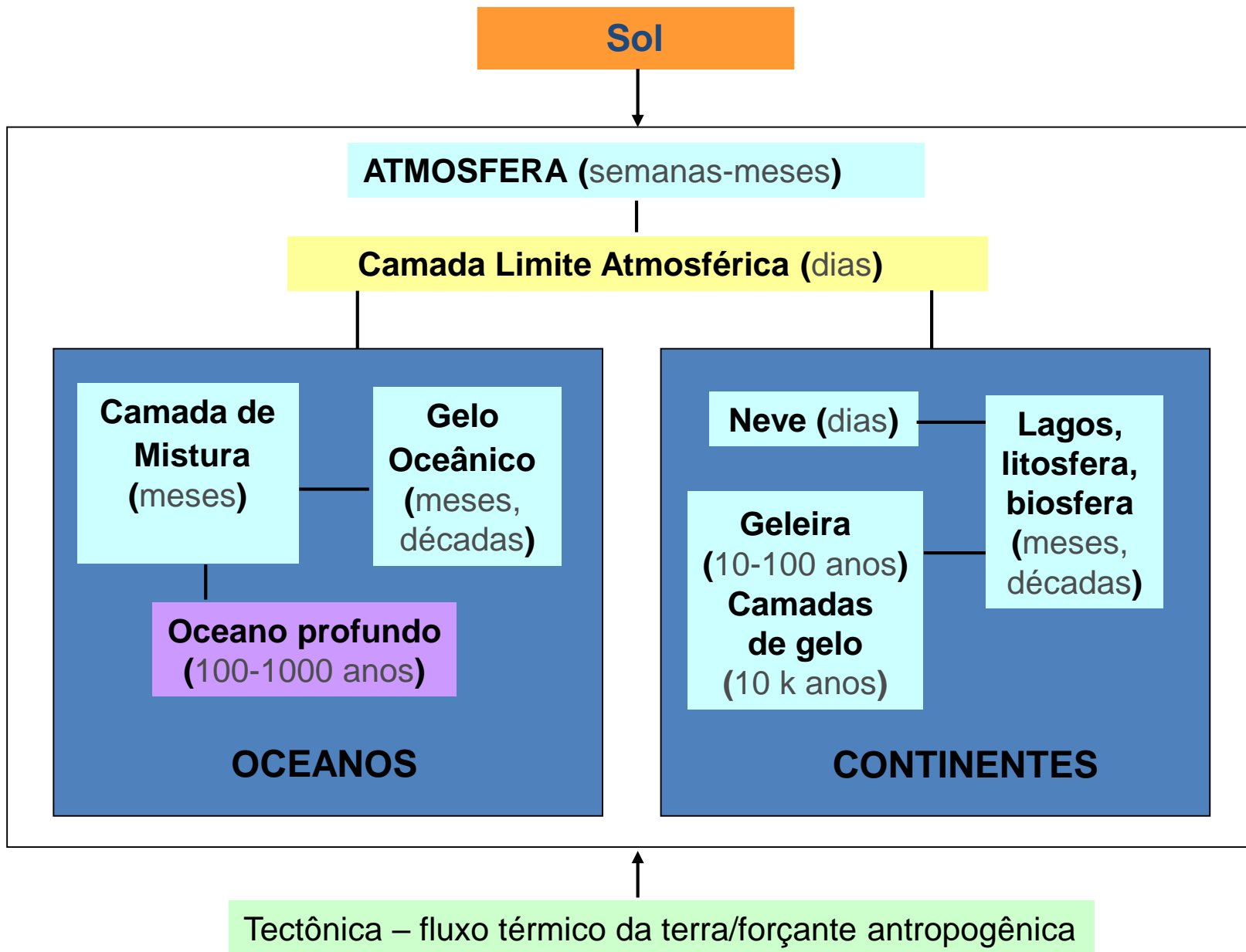


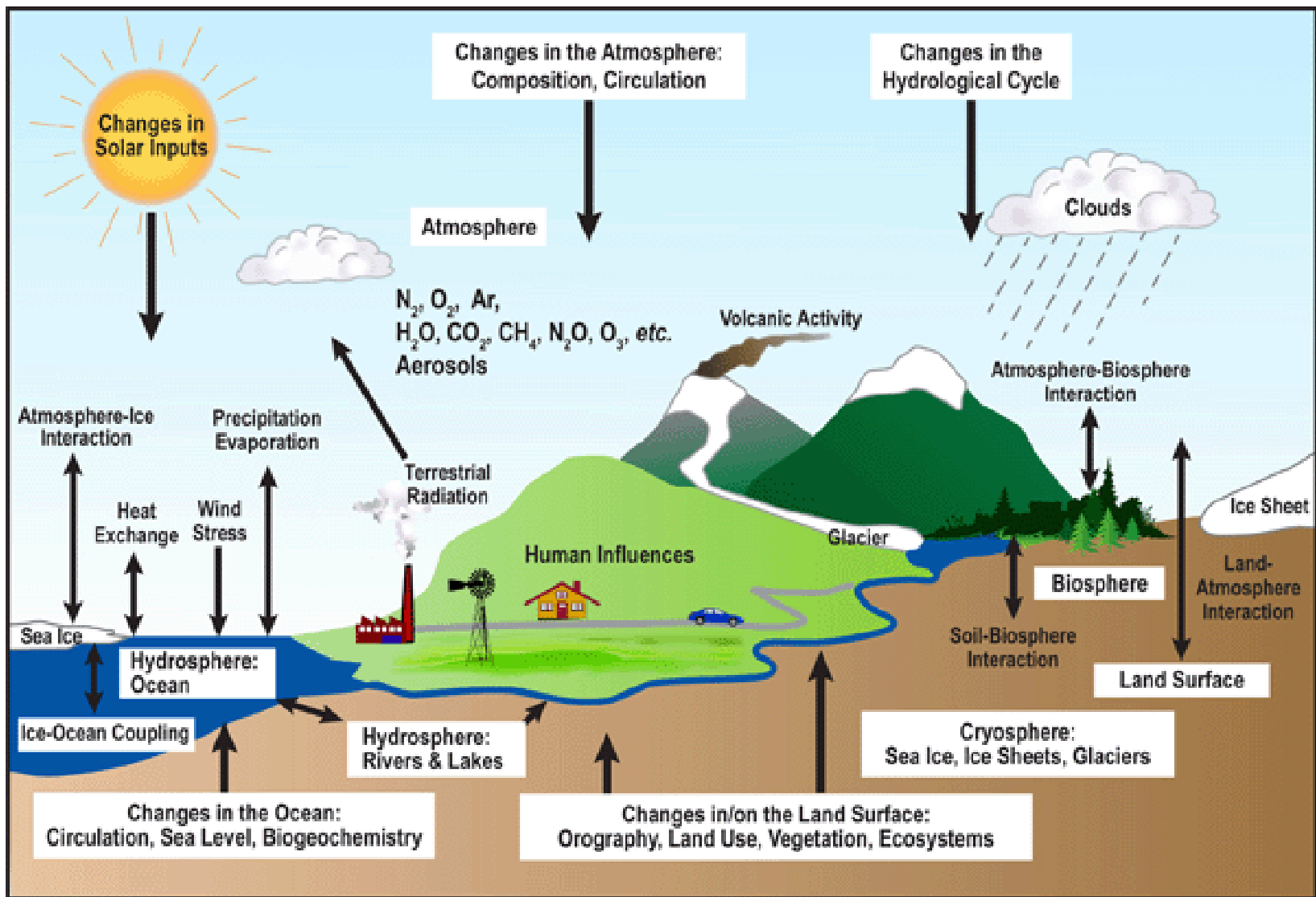
Figure 1-2 Hypothetical, highly idealized, spectrum of atmospheric thermal variance at a midlatitude point over the age of the Earth. δ_s , δ_c , and δ_t denote the synoptic, climatic, and tectonic averaging intervals, respectively, and ϵ_a , ϵ_τ , ϵ_θ , and ϵ_I denote the approximate response times for the atmosphere, oceanic



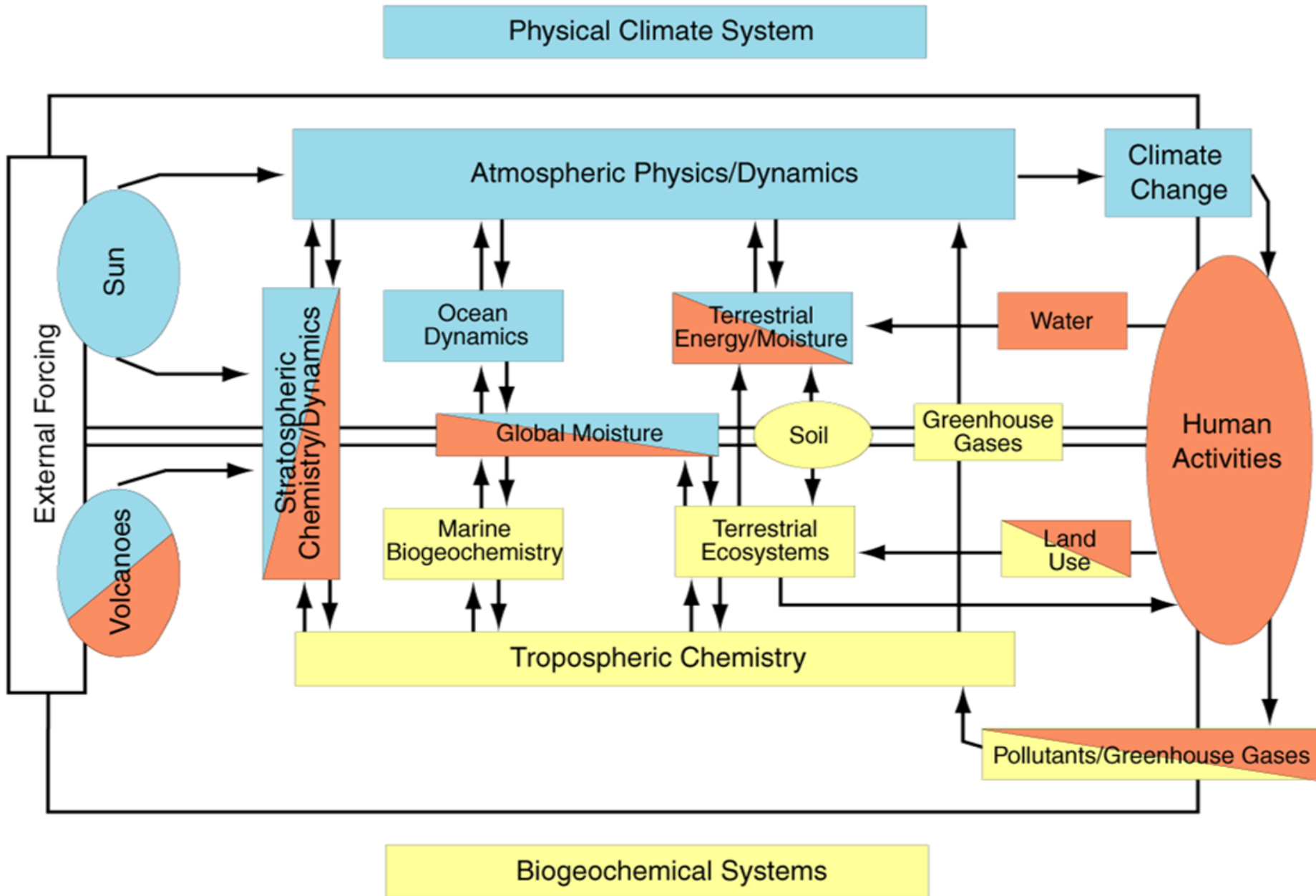
O sistema climático

Sistema Climático

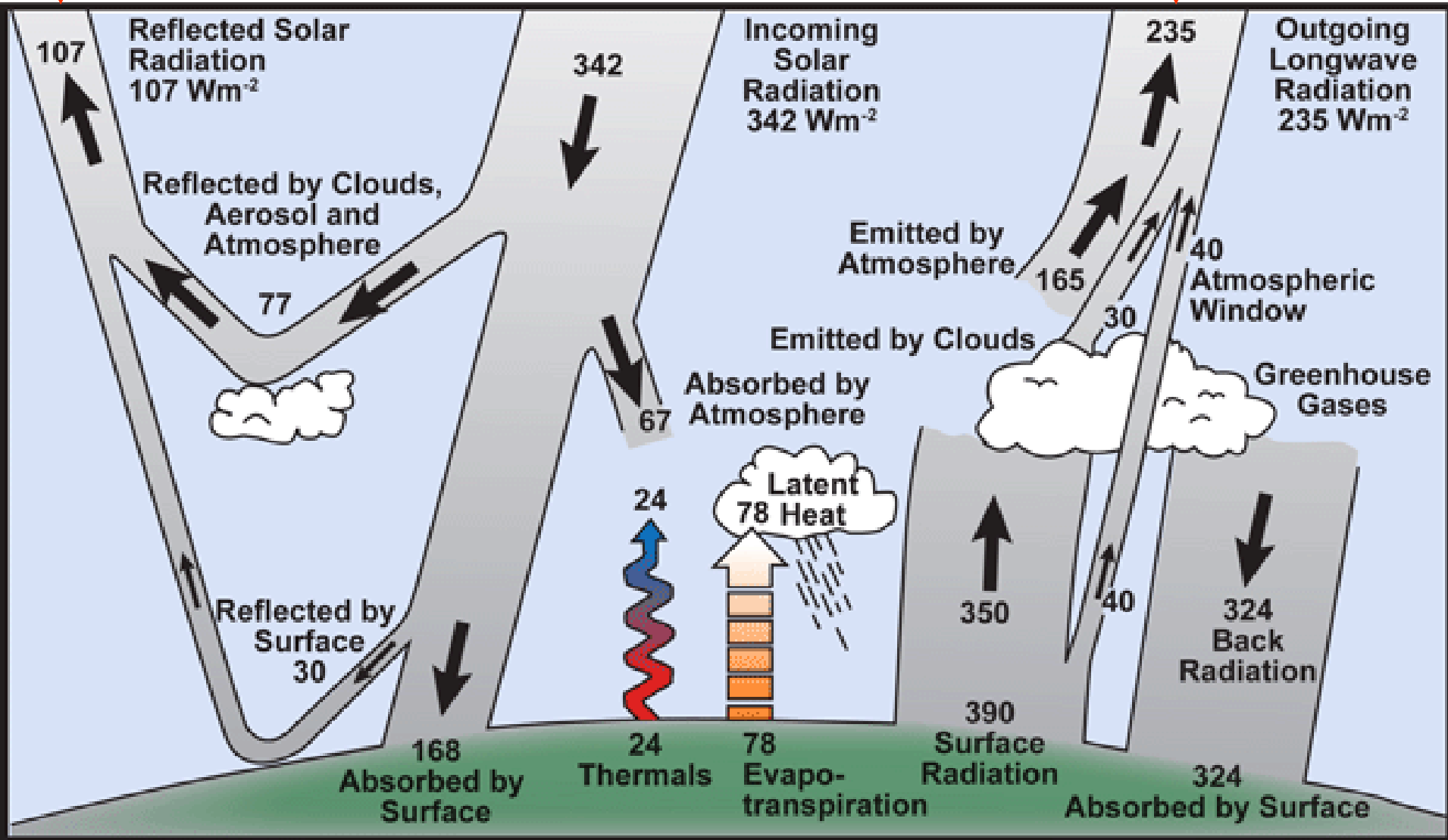




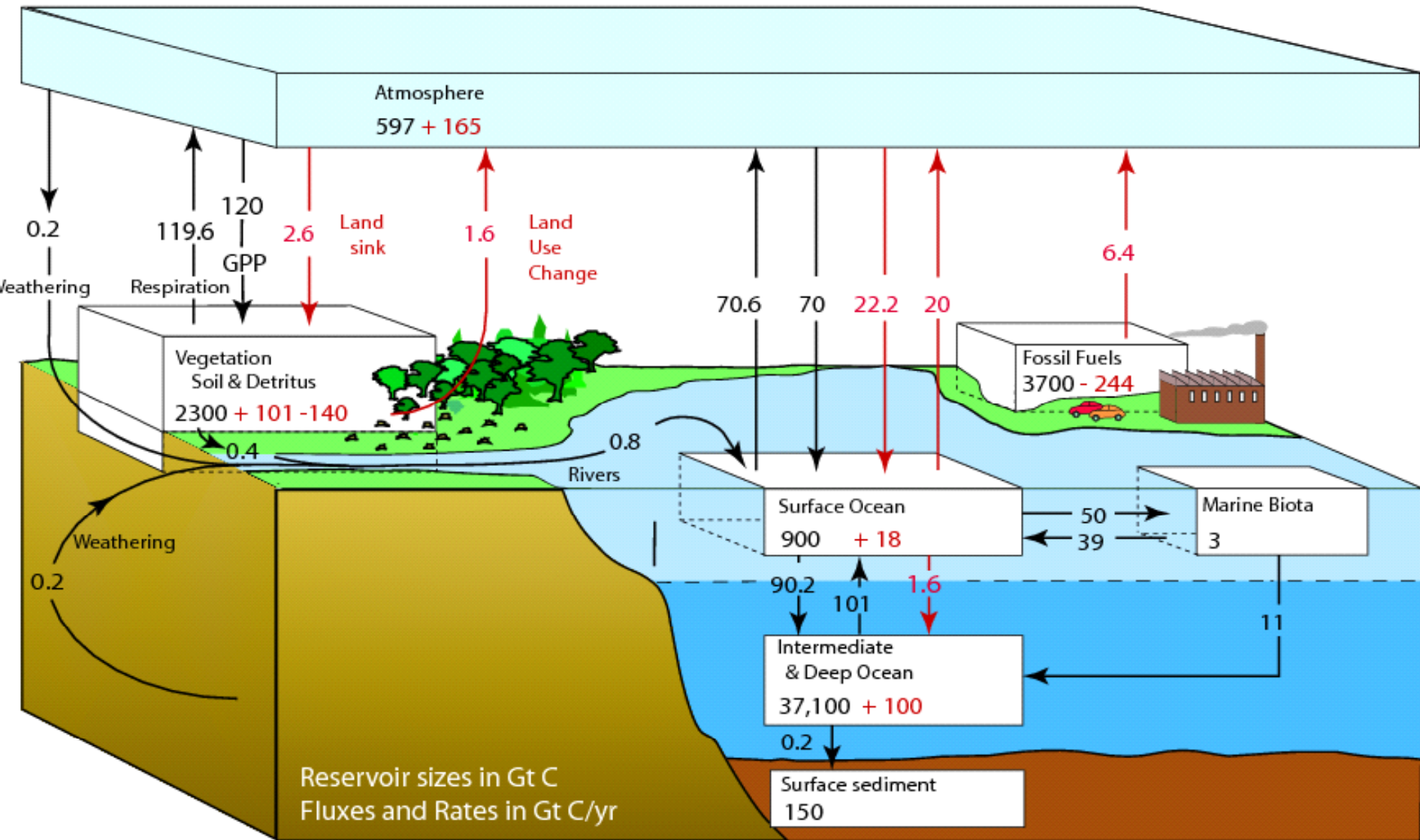
Esquema das diversas componentes que participam da definição do clima



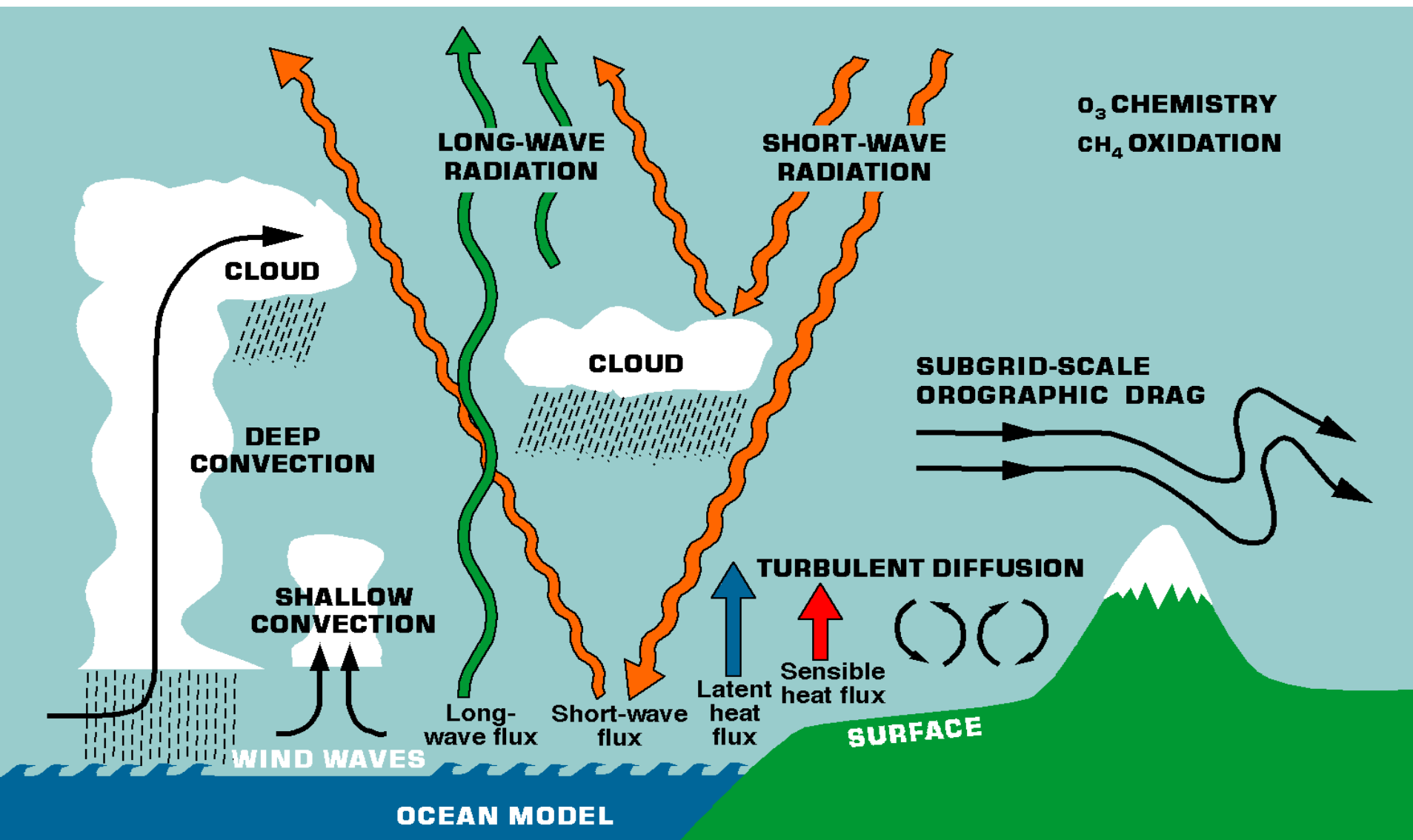
$$107 + 235 = 342$$

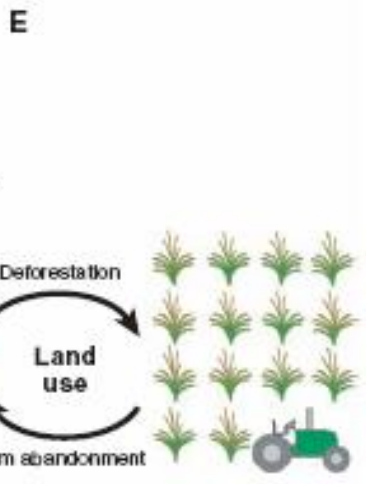
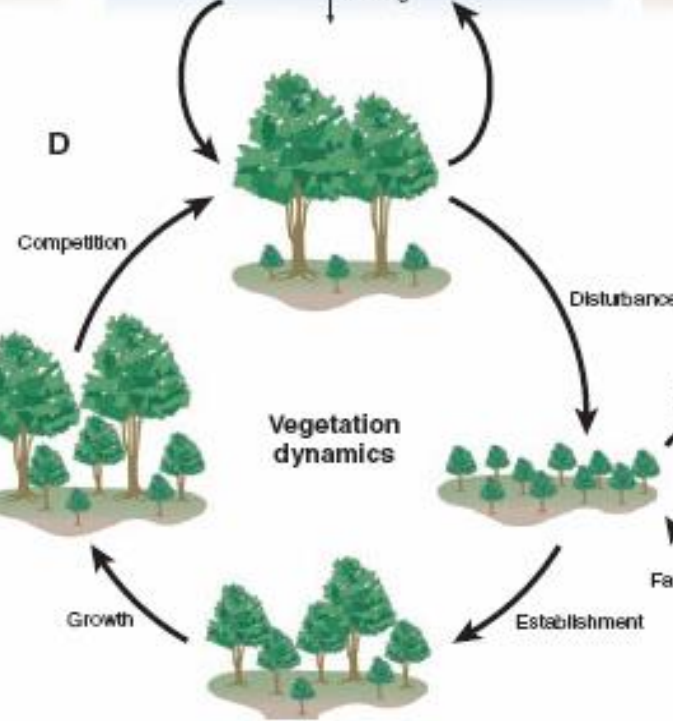
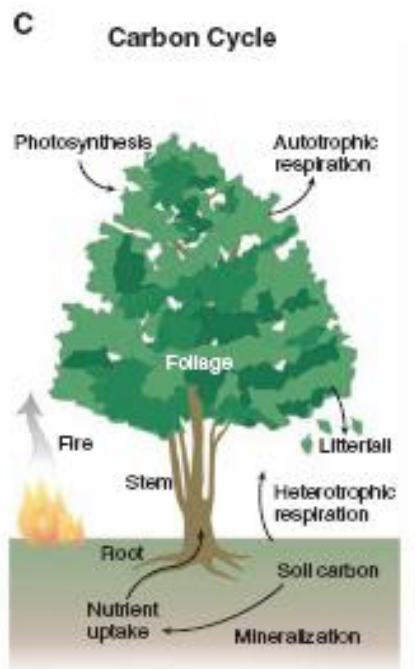
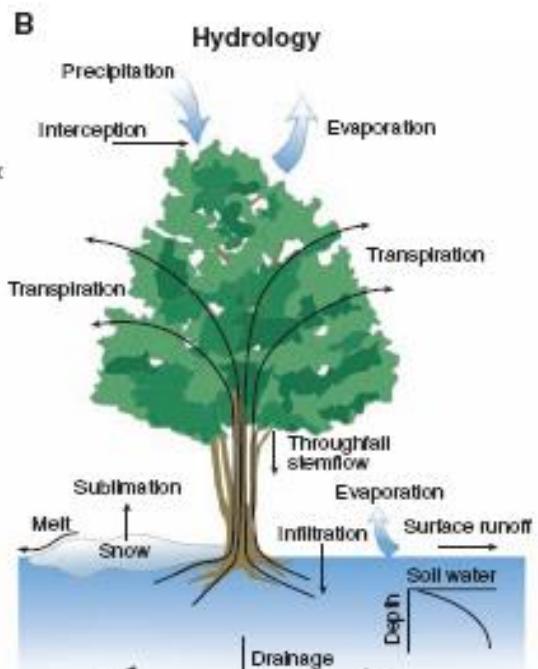
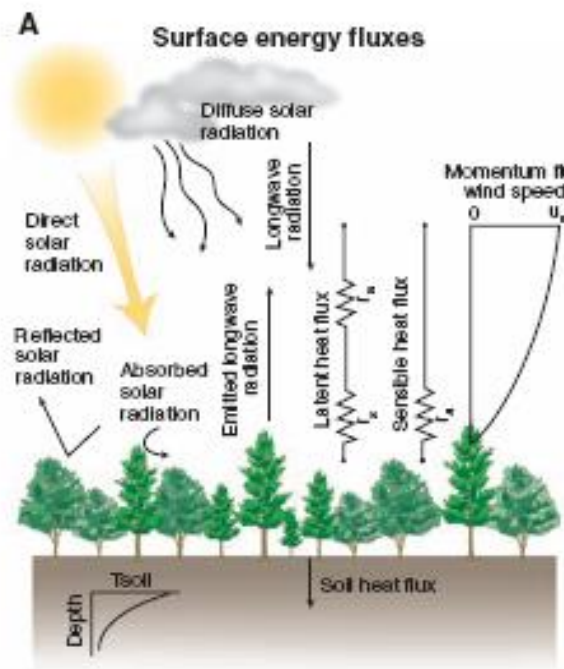


Balanço de Energia

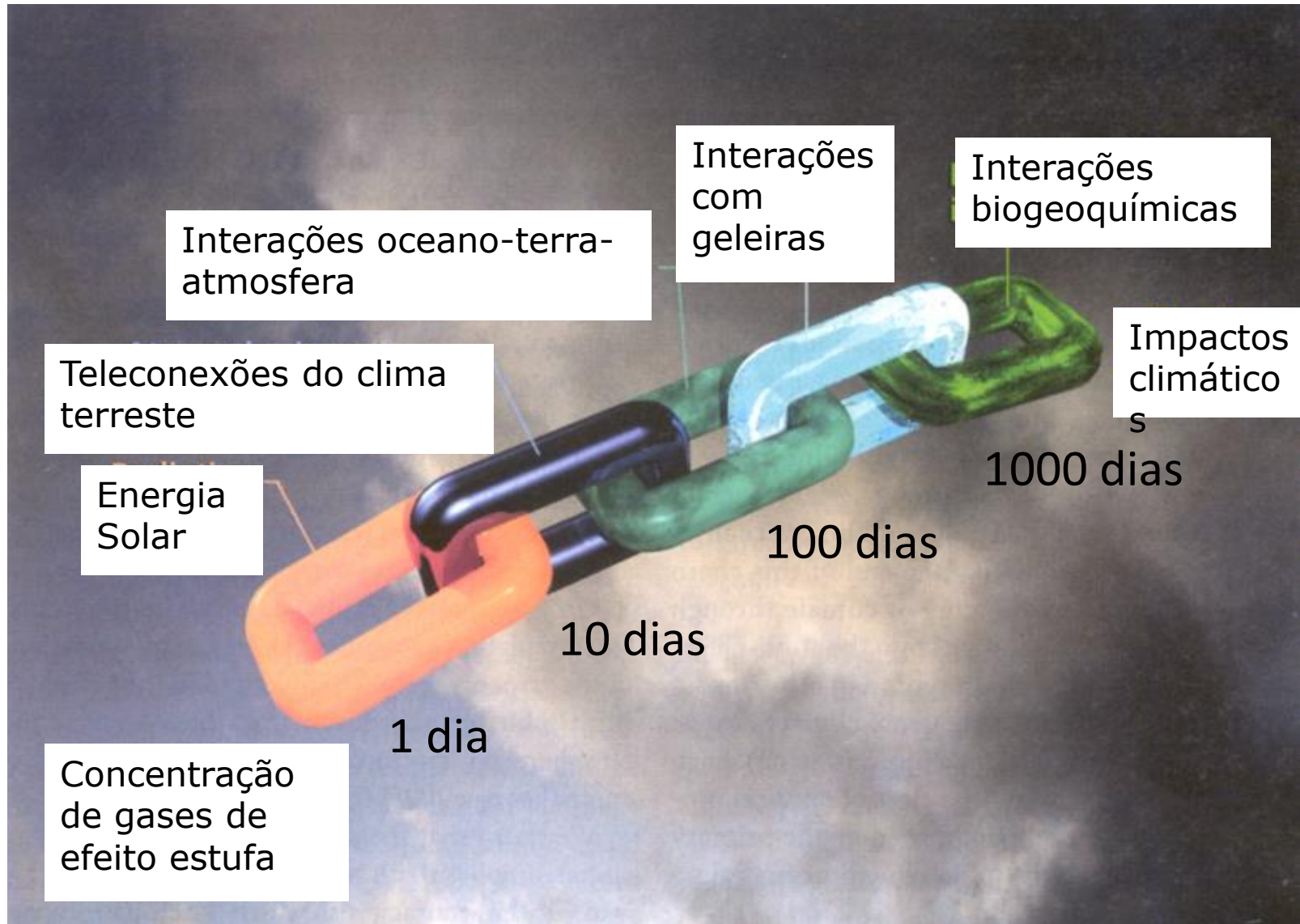


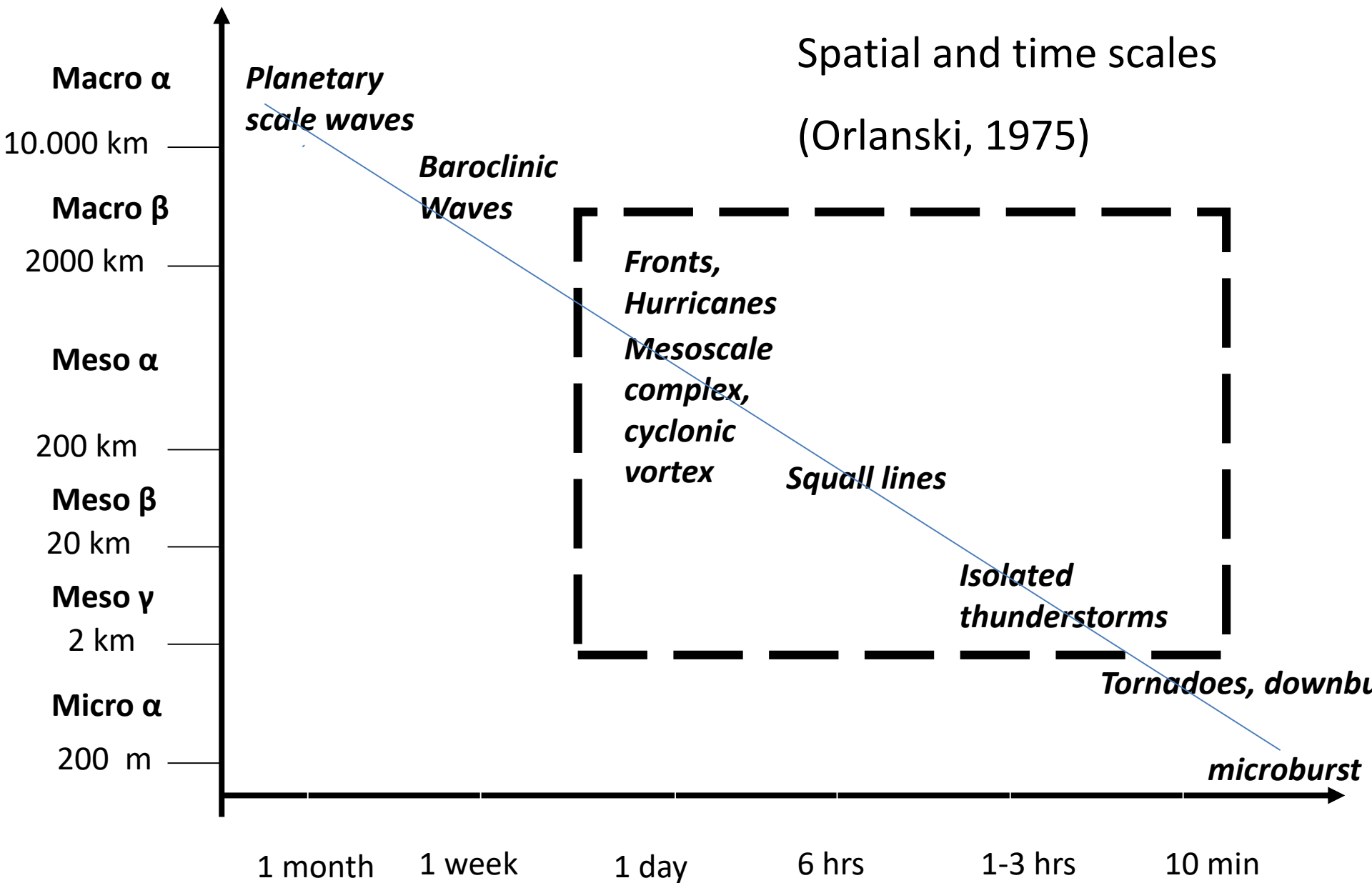
O ciclo global de gás carbônico para 1990 mostrando os fluxos principais em GtC/ano: em preto os fluxos naturais – pré-industriais - e em vermelho a alteração atribuída às atividades humanas.





A cadeia de processos que define o clima





Mensagens

- Muitas coisas acontecendo simultaneamente
- Modelos precisam considerar multi-escalas e multidão de processos, físicos, químicos, biogeoquímicos, geológicos, astronômicos

- Por exemplo: MPAS

<https://www.mmm.ucar.edu/slideshow/april-3-2014-426pm-model-prediction-across-scales-mpas>

Modelos do Sistema Físico-Químico

The diagram shows five differential equations arranged vertically. A red dashed box encloses the left side of the equations, and a yellow dashed box encloses the right side. To the right of each equation is a label in red text.

$$\frac{\partial X_a}{\partial t} + L_a X_a = N_a(X_a, X_o, X_v, X_c, X_s) + F_a(X_a, X_o, X_v, X_c, X_s) \quad \text{atmosfera}$$

$$\frac{\partial X_o}{\partial t} + L_o X_o = N_o(X_a, X_o, X_v, X_c, X_s) + F_o(X_a, X_o, X_v, X_c, X_s) \quad \text{oceano}$$

$$\frac{\partial X_s}{\partial t} + L_s X_s = N_s(X_a, X_o, X_v, X_c, X_s) + F_s(X_a, X_o, X_v, X_c, X_s) \quad \text{solo}$$

$$\frac{\partial X_v}{\partial t} + L_v X_v = N_v(X_a, X_o, X_v, X_c, X_s) + F_v(X_a, X_o, X_v, X_c, X_s) \quad \text{vegetação}$$

$$\frac{\partial X_c}{\partial t} + L_c X_c = N_c(X_a, X_o, X_v, X_c, X_s) + F_c(X_a, X_o, X_v, X_c, X_s) \quad \text{espécies químicas}$$

$$X_a = (u, v, w, T, q_v, q_l, q_r, q_i, \dots)$$

$$X_o = (u, v, w, T, s_v, \dots)$$

$$X_s = (T^i_s, W^i_s, N^i_n, \dots)$$

$$X_v = (lai^i, sig^i_v, root^i_d, stom^i_c, VOC^i, C^i, N_i, \dots)$$

$$X_c = (CO_2, CH_4, O_3, NO_x, VOC's, SO_2, \dots)$$

Histórico da capacidade de simulação numérica da atmosfera



Modelagem Numérica

Progressivo aumento na capacidade de simular processos físicos e biogeoquímicos



Primeiras previsões numéricas de tempo no computador ENIAC em Princeton

Início da assimilação de dados de satélites



Início das operações do ECMWF



Início das operações do CPTEC

1950 1960 1970 1980 1990 2000 2010 2020

Evolução tecnológica dos sensores a bordo de satélites meteorológicos

Satélites

Órbita Polar Operacional



Órbita Geostacionária



Órbita Polar de Pesquisa Usado Operacionalmente



História da previsão numérica do tempo (1)

- Em 1904 o físico norueguês **Vilhelm Bjerkness** sugeriu que o tempo era previsível através do uso das equações da hidrodinâmica (escola de Bergen).
- Em 1922 **Lewis Fry Richardson** desenvolveu as idéias de Bjerkness e idealizou a fábrica de previsões que teria 64.000 computadores humanos, cada um responsável por uma pequena parte do globo terrestre.
- Em 1948 o Instituto de Estudos Avançados de Princeton, New Jersey inicia as pesquisas no uso de computadores para previsão do tempo. Jules Charney desenvolveu modelos simplificados para rodar nos primeiros computadores

História da previsão numérica do tempo (2)

- Em 1950 a primeira previsão numérica de tempo para 1 dia foi rodada no computador ENIAC e levou 24 horas para ficar pronta. (**A OMM se estabeleceu em 1950**)
- Em 1955 os EUA já faziam previsões numéricas operacionais e em 1958 essas previsões começaram a ter alguma vantagem sobre as feitas conceitualmente.
- A partir dos anos 1970 e 1980 - evolução rápida com a introdução de novas técnicas, novos processos físicos, modelos acoplados e...
- Início da assimilação dos dados de satélite a partir de 1972...
- O ECMWF lançou sua primeira previsão operacional em 1 de agosto de 1979
- No Brasil, o CPTEC começou a operar em 1994 (O INMET é do começo do século XX)

Desenvolvimento dos modelos numéricos: passado, presente e futuro



Imagens e Dados de Satélites

História da Meteorologia por Satélite (1)

- Satélites com imageadores para Meteorologia foram lançados no fim da década de 1950.
- O primeiro satélite completamente dedicado à Meteorologia foi lançado em 1 de abril de 1960: **TIROS (Television and Infrared Observational Satellite)**. Esteve 79 dias no ar.
- 9 TIROS adicionais foram lançados até 1965.

História da Meteorologia por Satélite

(2)

- Em seguida veio a série Nimbus. O Nimbus 1 foi lançado em 28 de agosto de 1964.
- Os satélites Nimbus foram os primeiros a ter três eixos de estabilização o que permitia que os sensores apontassem diretamente para a terra.
- Mais 6 satélites da série Nimbus foram lançados até 1978.
- A cobertura contínua da terra com esses satélites permitiu o monitoramento inédito de tempestades tropicais.
- Os satélites da série NOAA de órbita polar são descendentes dos satélites Nimbus.

História da Meteorologia por Satélite

(3)

- Em 16 de setembro de 1966 foi lançado o primeiro satélite **DMSP (Defense Meteorological Satellite Program)**.
- Os dados da série DMSP são de altíssima qualidade.
- Em 7 de dezembro de 1966 foi lançado o primeiro satélite ATS (**Applications Technology Satellite**) -**ATS 1**, colocado em órbita geoestacionária produzindo imagens com alta frequência temporal, pela primeira vez.

História da Meteorologia por Satélite

(4)

- **GOES 1** (Geostationary Operational Environmental Satellite) foi lançado em 16 de outubro de 1975.
- No momento a América do Sul é coberta pelo GOES-16 estacionado sobre o Equador na longitude de 75 W
- O primeiro satélite dedicado à pesquisa climática foi lançado em 5 de outubro de 1984 a partir do Space Shuttle Challenger.
- Esse satélite recebeu o nome de **Earth Radiation Budget Satellite (ERBS)**

História da Meteorologia por Satélite

(5)

- O primeiro satélite com sensor ativo em micro-ondas foi o TRMM – Tropical Rainfall Measuring Mission que começou a operar em 1998 e durou 17 anos
- As atividades do TRMM foram seguidas e expandidas pela missão GPM – Global Precipitation Measurement mission que foi lançada em 2014.

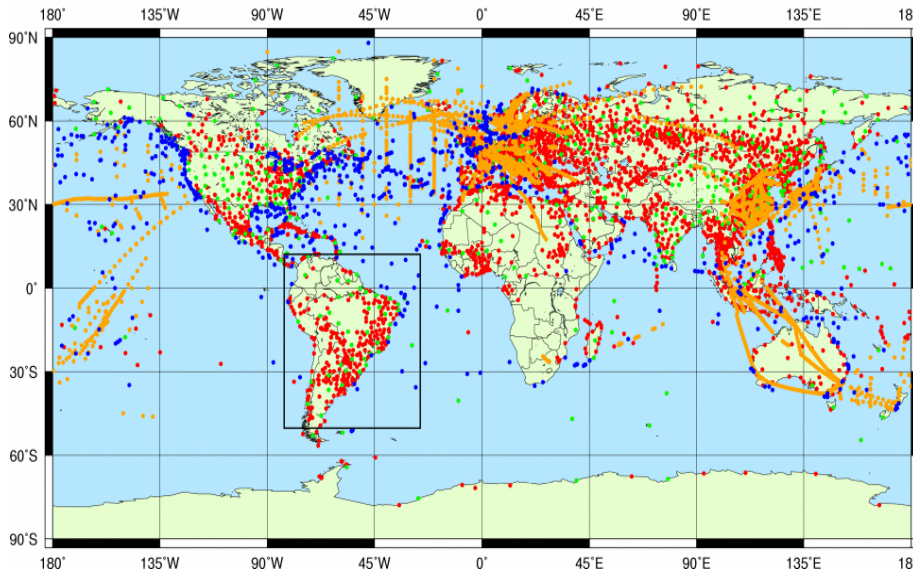
Ampliação do Volume de Dados Utilizados na Assimilação de Dados Atmosféricos

COBERTURA DE DADOS GTS – CPTEC/INPE

Data : 15/Jun/2005 – 12UTC

Número Total de OBS GLOBAL/AS = 11465/386

● SYNOP = 3226/313 ● SHIP = 898/ 31 ● TEMP = 546/ 42 ● AIRCRAFT = 6795/ 0

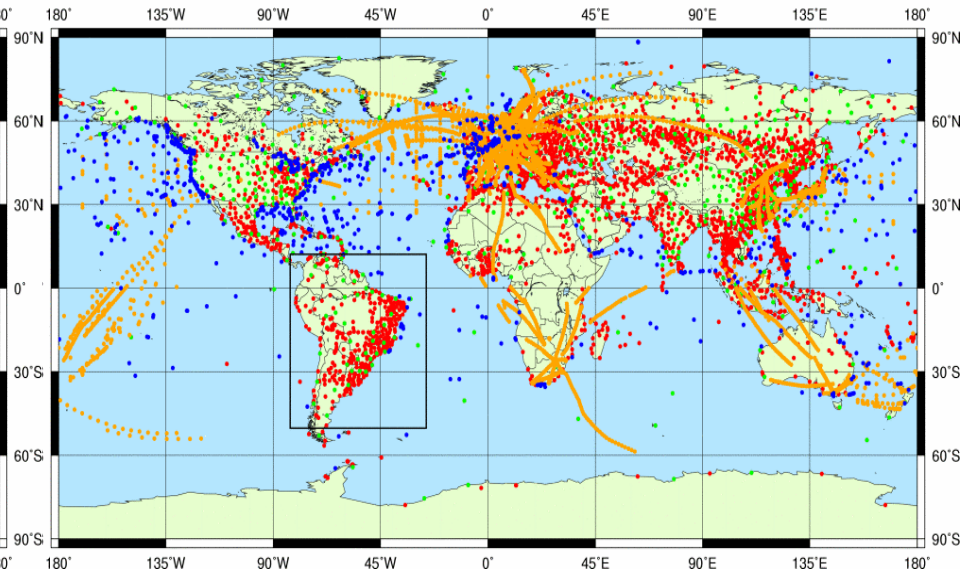


COBERTURA DE DADOS GTS – CPTEC/INPE

Data : 15/Jun/2007 – 12UTC

Número Total de OBS GLOBAL/AS = 12882/452

● SYNOP = 3274/393 ● SHIP = 832/ 16 ● TEMP = 590/ 43 ● AIRCRAFT = 8186/ 0



Distribuição espacial dos dados provenientes de instrumentos em bases terrestres disponível para a assimilação no CPTEC-INPE para o dia 14 de junho em 2005 (a) e em 2007 (b) às 12:00 UTC: estações meteorológicas de superfície (SYNOP), sensores em navios (SHIP), radiossondagens (TEMP), e a bordo de aviões (AIRCRAFT)

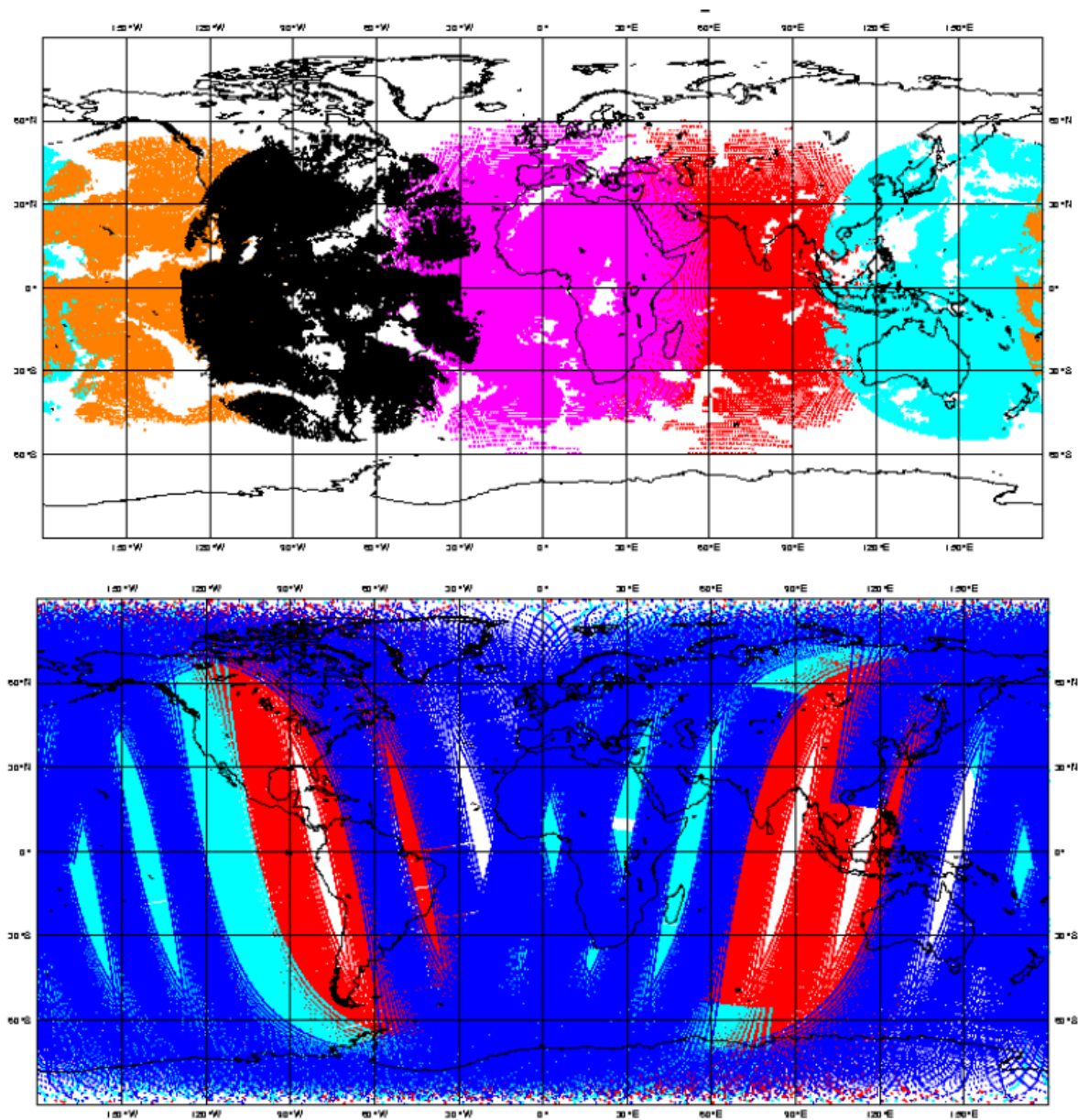


Figure 1: Typical data coverage provided by the Geostationary constellation (top): GOES-W/E (orange/black), Meteosat-7/5 (pink/red) and GMS-5/GOES-9 (cyan). Bottom plot displays the LEO constellation from the NOAA satellites (NOAA-15 in red, NOAA-16 in cyan, NOAA-17 in blue).

Table 1 List of satellite data (excluding ozone data and cloud-drift winds) used in ECMWF operational system, for the date 20031028-00 UTC (12 hour window).

Space craft	Instrument	Total number processed	Number of used data	Measurement
METEOSAT-5	Imager	182,519		water-vapour radiances, sensitive to upper tropospheric humidity
METEOSAT-7		273,498	26,542	
GOES-9		905,376	37,319	
GOES-10		546,256	25,333	
GOES-12		538,132	18,359	
NOAA-16	HIRS	1,683,020	78,804	infrared, temperature and humidity sounding
NOAA-17		1,433,436	66,949	
NOAA-16	AMSU-B	402,450	29,217	microwave humidity sounding
NOAA-17		402,790	29,799	
NOAA-15	AMSU-A	2,046,460	173,216	microwave radiances, temperature sounding in stratosphere and upper/mid troposphere
NOAA-16		2,380,110	188,935	
NOAA-17		2,365,200	213,424	
AQUA		2,427,030	153,380	
DMSP-13	SSMI	89,579	40,901	microwave, tropospheric humidity
DMSP-14		86,394	33,166	
DMSP-15		88,403	39,452	
QuikSCAT	Seawinds	203,272	111,800	Near-surface winds over ocean
AQUA	AIRS	52,019,901	1,893,169	infrared temperature and humidity sounding
Total		68,073,826	3,159,765	

REVIEW

doi:10.1038/nature14956

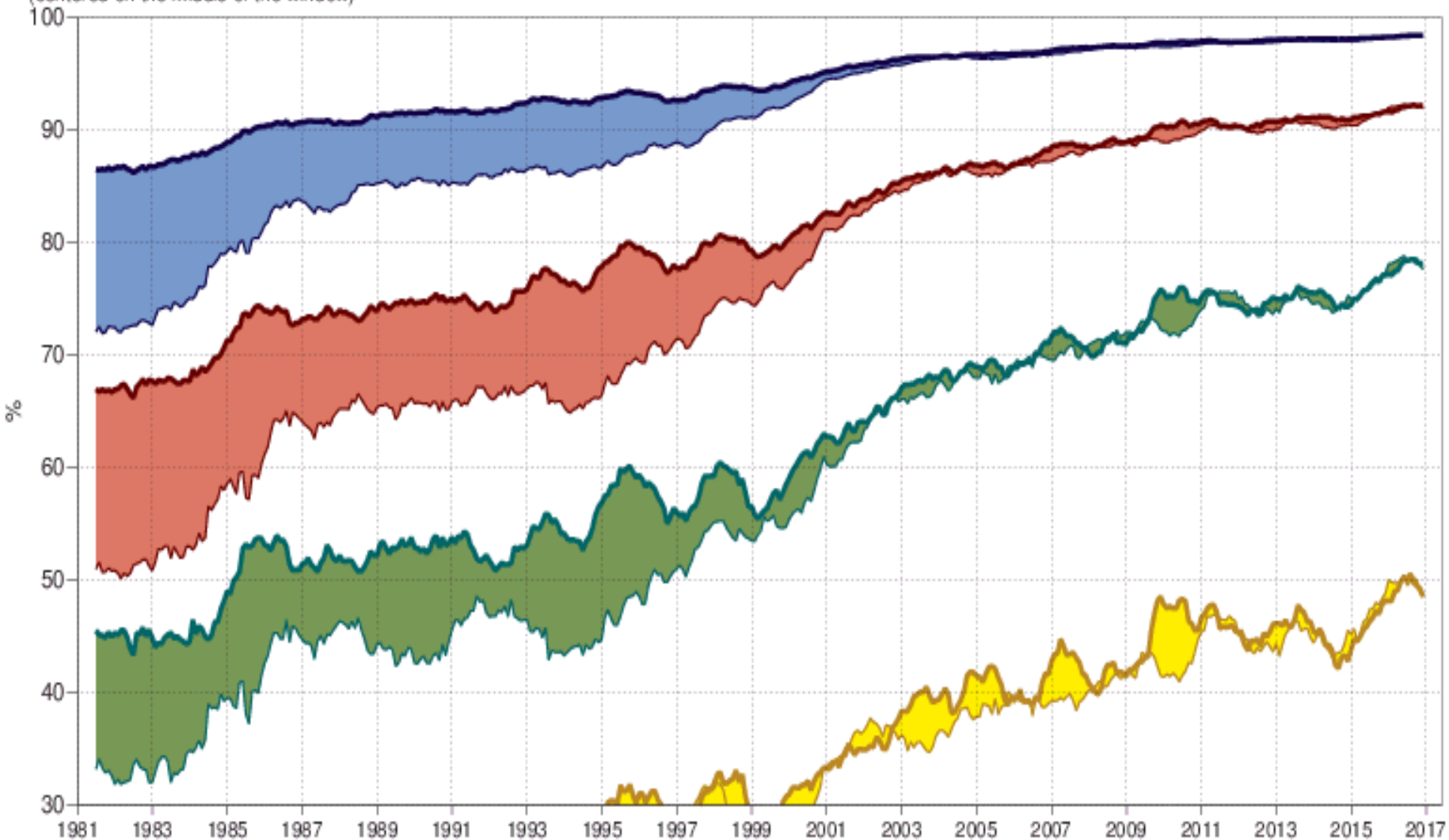
The quiet revolution of numerical weather prediction

Peter Bauer¹, Alan Thorpe¹ & Gilbert Brunet²

Nature, 525 (7567), 47–55,
<http://dx.doi.org/10.1038/nature14956>

500hPa geopotential height
Anomaly correlation
12-month running mean
(centered on the middle of the window)

- Day 7 NHem
- Day 7 SHem
- Day 10 NHem
- Day 10 SHem
- Day 3 NHem
- Day 3 SHem
- Day 5 NHem
- Day 5 SHem



Grandes avanços e grandes desafios para o futuro da previsão de tempo.

- Representação dos processos físicos
- Previsão por conjuntos
- Assimilação de dados nos modelos com dados in loco e obtidos por sensoriamento remoto
- Desafios tecnológicos associados com novas observações e com computação de alto desempenho

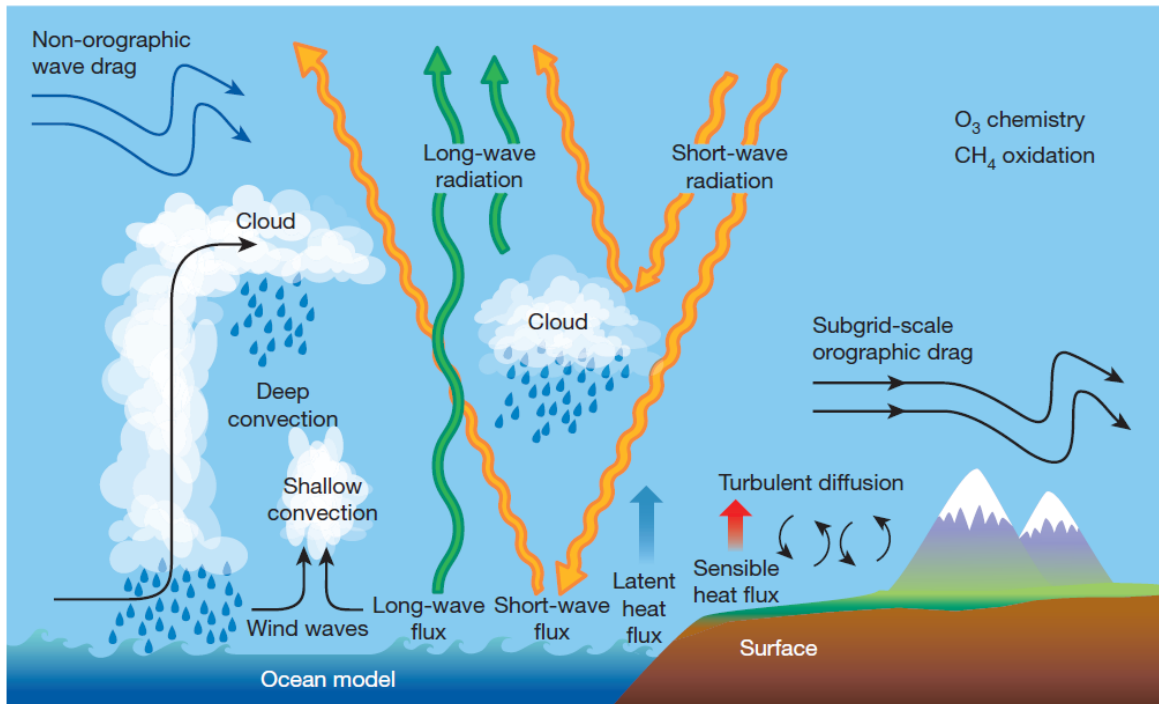
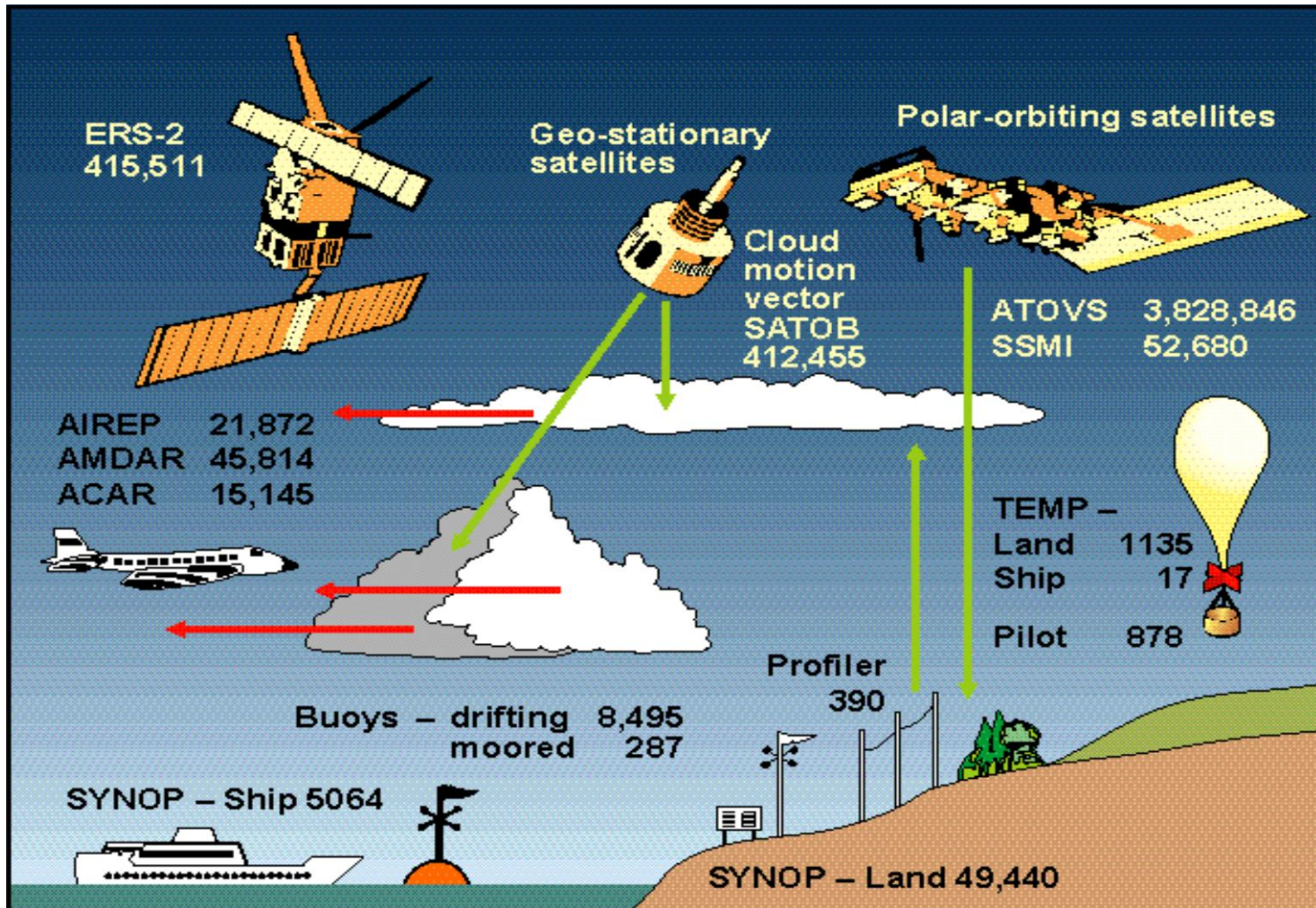


Figure 2 | Physical processes of importance to weather prediction. These are not explicitly resolved in current NWP models but they are represented via parameterizations describing their contributions to the resolved scales in terms of mass, momentum and heat transfers.

Os números indicam observações recebidas - por dia - em um centro de previsão de tempo



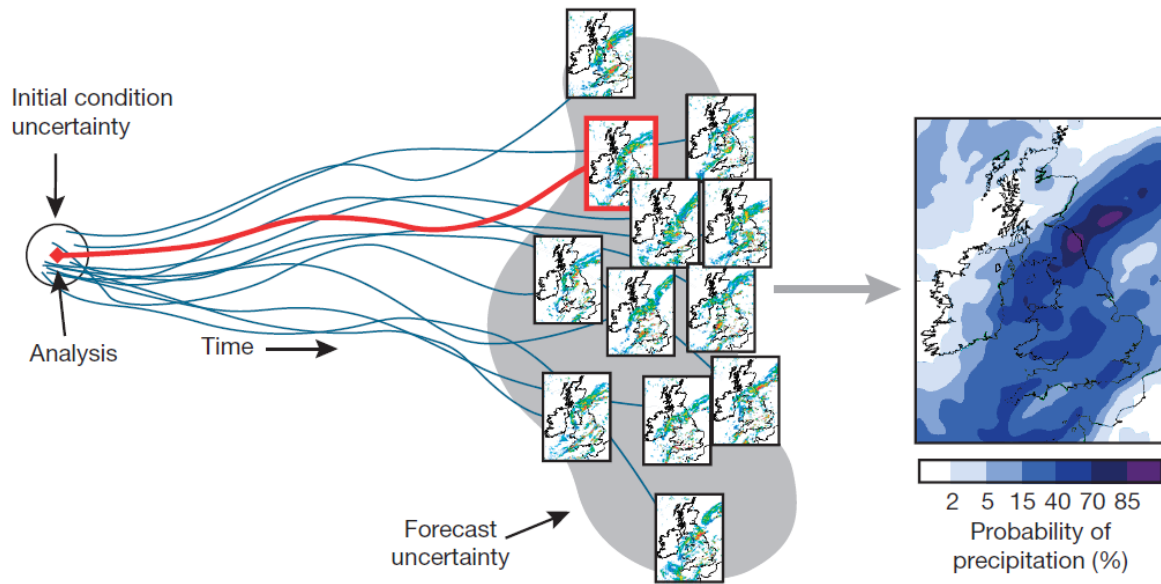


Figure 3 | Schematic diagram of 36-h ensemble forecasts used to estimate the probability of precipitation over the UK. A single forecast (red frame, centre) is generated by integrating the model forward in time from the analysis of initial atmospheric state (left). Small perturbations to the analysis, within known analysis uncertainty, provide an ensemble of forecast solutions, which sample the forecast uncertainty (multiple frames). These solutions are combined, including some spatial neighbourhood sampling, to provide a smooth estimate of probability of precipitation (right). Image courtesy of K. Mylne (Met Office).

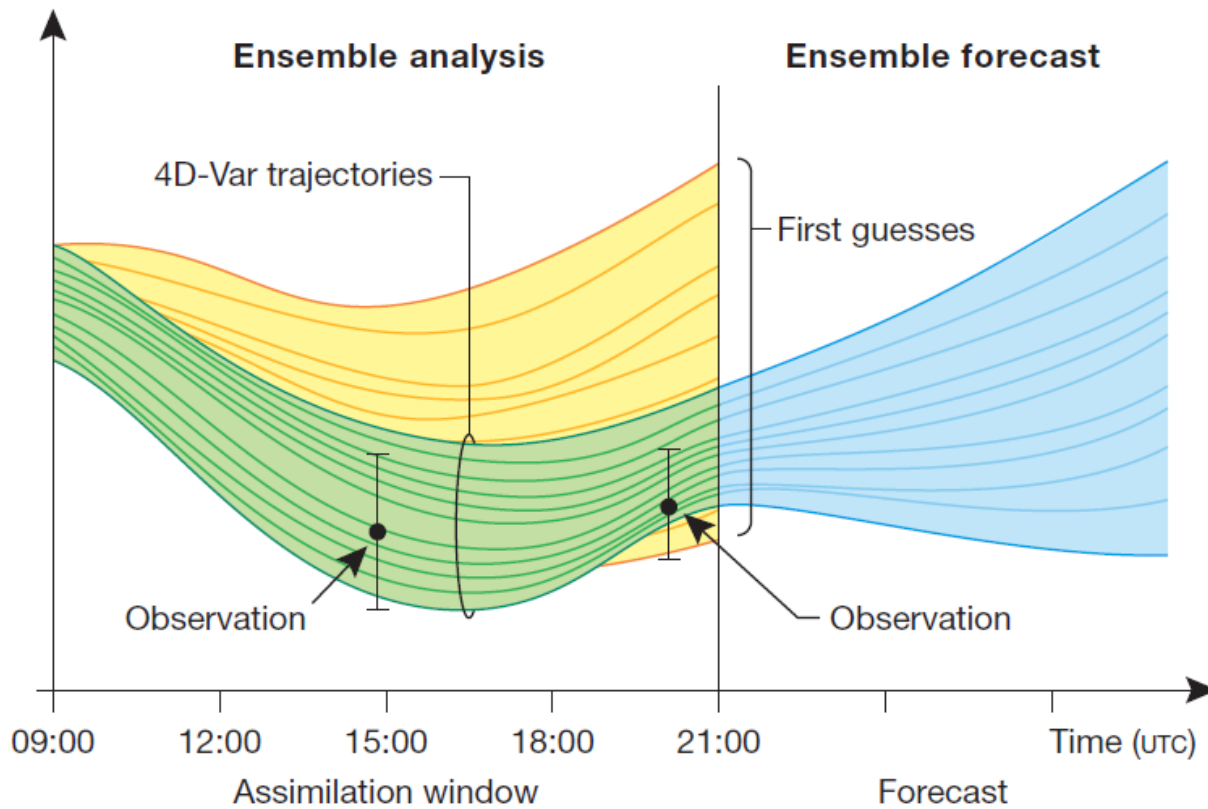


Figure 4 | Schematic of the ensemble analysis and forecast cycle. Global ensemble forecast trajectories, which have been initialized by a previous analysis ensemble, are produced over a time window (for example, 09:00–21:00 UTC). These provide estimates of the current weather (first guesses). The difference between these forecasts and available observations (shown as data points with error bars) is the short-range forecast error. By minimization in four dimensions employing variational techniques, improved estimates (4D-Var trajectories) are created with reduced distance to observations. The next cycle of ensemble forecasts is then initialized from these refined analyses. Image courtesy of M. Bonavita (ECMWF).

Technological challenges

Today's highest-performance computers employed in NWP rank in the top 20 of the 500 most powerful systems and execute computations at petaflop (10^{15} floating point operations) per second rates, ingesting of the order of 100 Mbytes of observational data and producing of the order of 10 Tbytes (that is, 10×10^{12} bytes) of model output per day. Future generations of global NWP models with kilometre scales in the horizontal will integrate of the order of 100 prognostic variables over about 5×10^8 grid points for of the order of 100 ensemble members with time steps of seconds in an atmosphere with about 100 levels, coupled to surface models of somewhat smaller dimensions. Observational data usage will also increase by an order of magnitude owing to the internationally coordinated availability of high-resolution spectrometers in low-Earth and geostationary orbits with thousands of spectral channels.

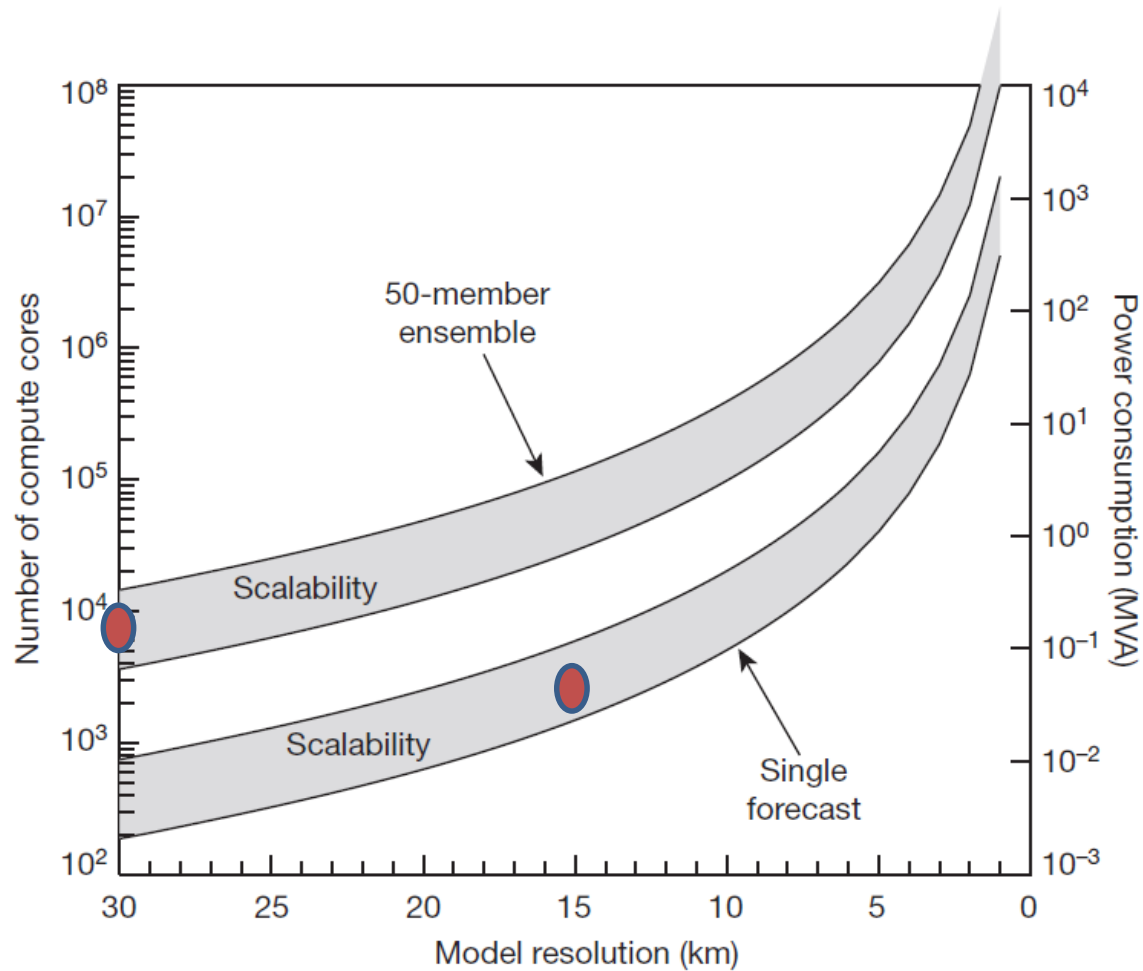
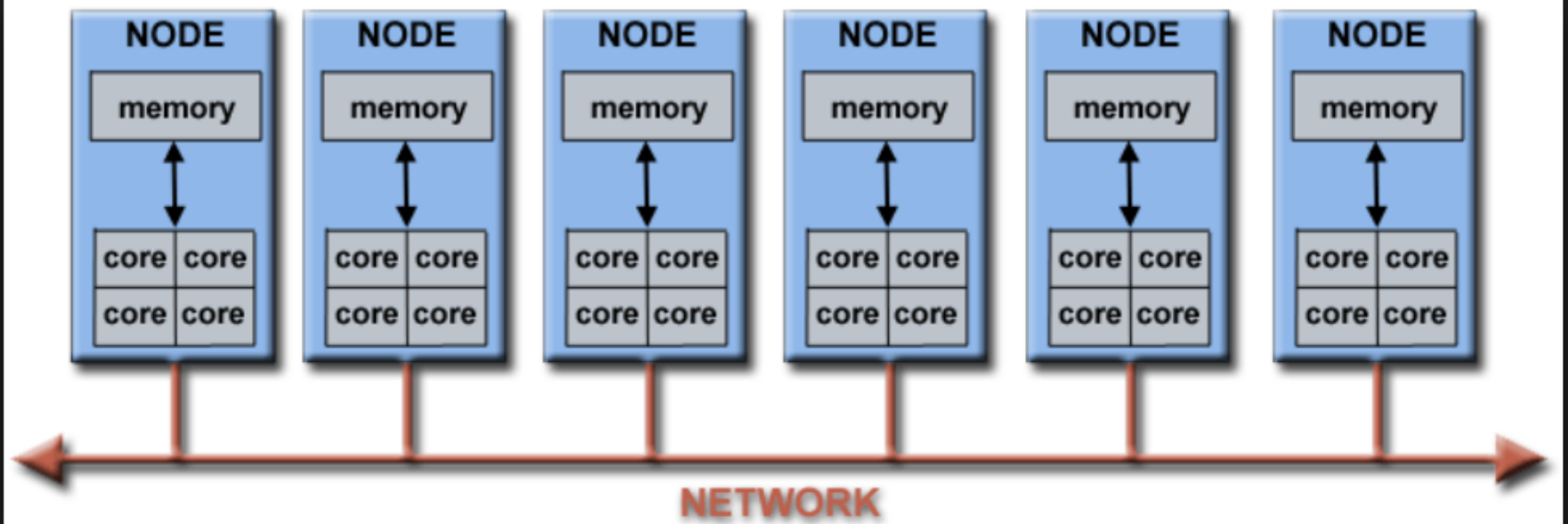
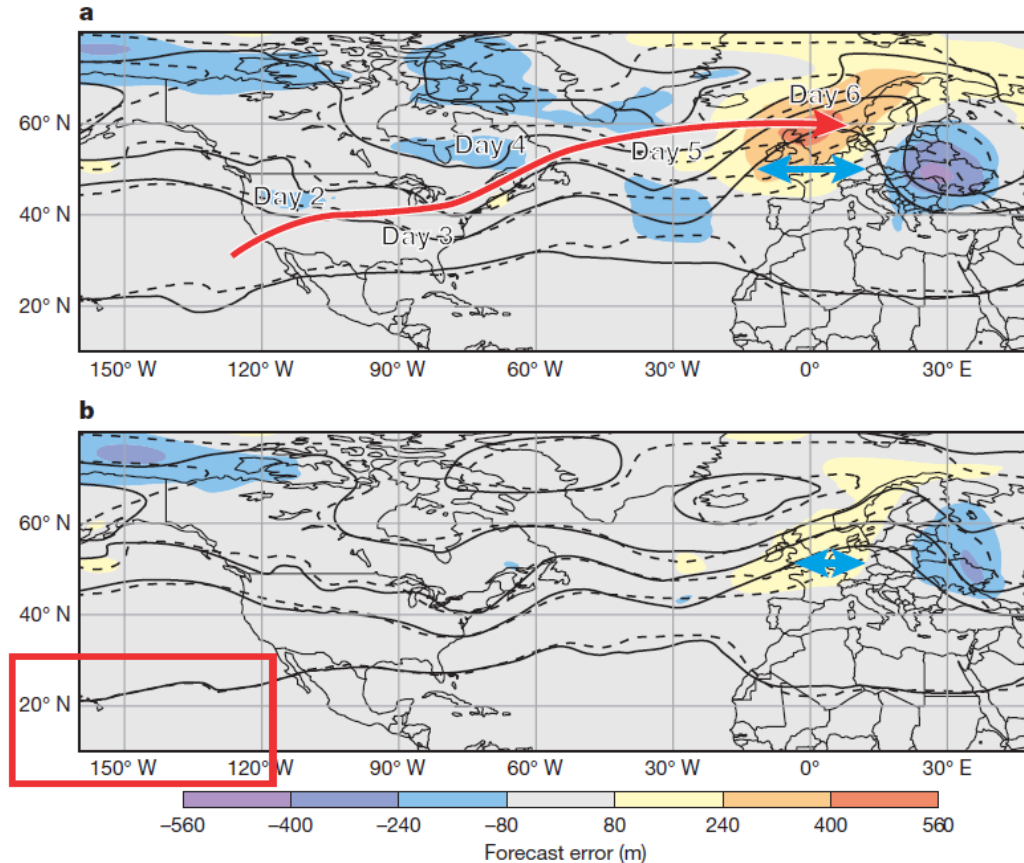


Figure 5 | CPU and power requirements as a function of NWP model resolution. Simplified illustration of the number of compute cores (left y-axis) and power (in units of megavolt amps, MVA, right y axis) required for single 10-day model forecast (lower curves) and 50-member ensemble forecast (upper curves) as a function of model resolution, given today's model code and compute technology. The shaded area indicates the range covered when assuming perfect scaling (bottom curve) and inefficient scaling (top curve), respectively. Today's single global forecasts operate at around 15 km while



BOX 1

Sensitivity of forecasts to initial conditions and error propagation



Box 1 Figure | Maps showing the long-range impact of model initialization on the European forecast. Panel a shows the day-6 mean forecast error (the height of the 500 hPa pressure level in metres) of the flow at around 5 km height (colour-coded shading), the forecast itself (solid isolines) and the verifying analysis (dashed isolines) valid on 15 February 2014. Over the western US, the jet stream extended far to the south, aligned with a lower level trough. The long red arrow indicates the travel path of an atmospheric wave disturbance guided by the westerly flow. The presence of a large-scale dipole error pattern highlights the lag between forecast and analysed state (blue double-headed arrow). The large forecast errors over Europe were mostly produced by a phase-shift of the wave that increased with time. Back-tracking the wave propagation path

identifies the tropical East Pacific (boxed in b) as a likely location of a possible forecast error source. This area was characterized by very large 24-h forecast errors of upper-level winds because of the paucity of wind observations there. When running an experiment where the area in the box in b is relaxed towards the analysis rather than evolving in the forecast, the strong initial growth of forecast errors is reduced and, six days later, the lag of the wave patterns between forecast and analysis is reduced over Europe (blue double-headed arrow), producing about half of the original forecast errors. This experiment demonstrates the long-range impact of model initialization, the linkage between tropics and mid-latitudes, and thus shows an example of how predictive skill in the one-week time range can be increased.

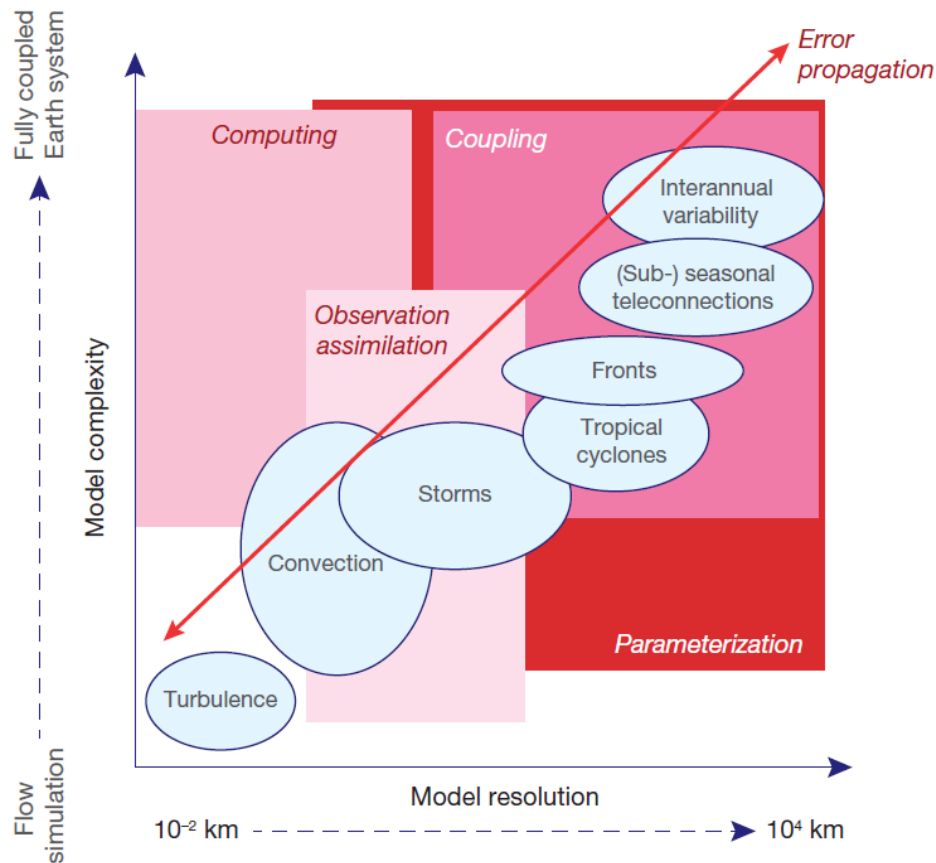


Figure 6 | Key challenge areas for NWP in the future. Advances in forecast skill will come from scientific and technological innovation in computing, the representation of physical processes in parameterizations, coupling of Earth-system components, the use of observations with advanced data assimilation algorithms, and the consistent description of uncertainties through ensemble methods and how they interact across scales. The ellipses show key phenomena relevant for NWP as a function of scales between 10^{-2} and 10^4 km resolved in numerical models and the modelled complexity of processes characterizing the small-scale flow up to the fully coupled Earth system. The boxes represent scale-complexity regions where the most significant challenges for future predictive skill improvement exist. The arrow highlights the importance of error propagation across resolution range and Earth-system components.

Avanços no desempenho das previsões virão de:

- inovações científicas e tecnológicas na computação de alto desempenho
- na representação de processos através das parametrizações
- acoplamento das diversas componentes do sistema terrestre
- uso de novos dados com técnicas avançadas de assimilação nos modelos
- descrição consistente das incertezas e como elas ocorrem através das escalas