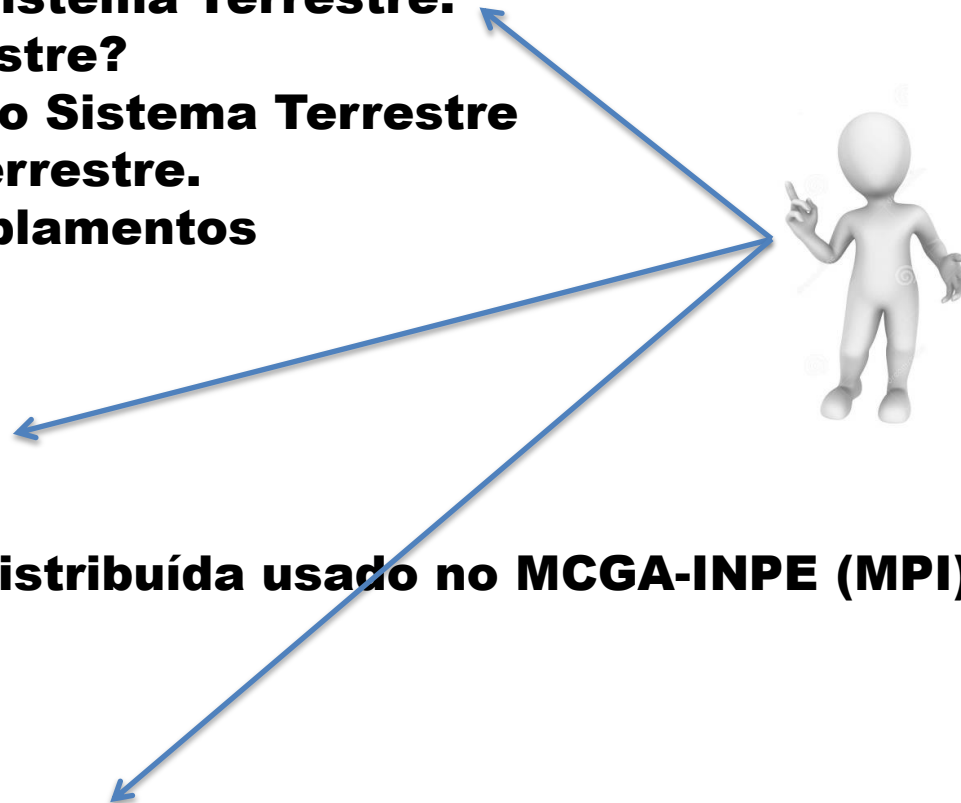


**Acoplamento dos Módulos do  
Sistema Terrestre**

Cachoeira Paulista-SP  
CPTEC/INPE  
26 Outubro 2023  
Dr. Paulo Yoshio Kubota

## **1. O que é acoplamento do Sistema Terrestre.**

- a. O que é um Sistema Terrestre?**
- b. Evolução da Modelagem do Sistema Terrestre**
- c. Os Módulos do Sistema Terrestre.**
- d. Considerações sobre Acoplamentos**
- e. Quais campos acoplar**



## **1. Software de Acoplamento**

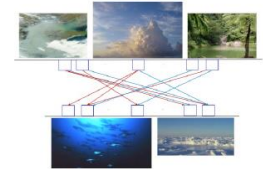
- a. Paralelismo de Memória Distribuída usado no MCGA-INPE (MPI)**
- b. Eficiência Computacional.**

## **1. O Que é Melhor para o INPE.**

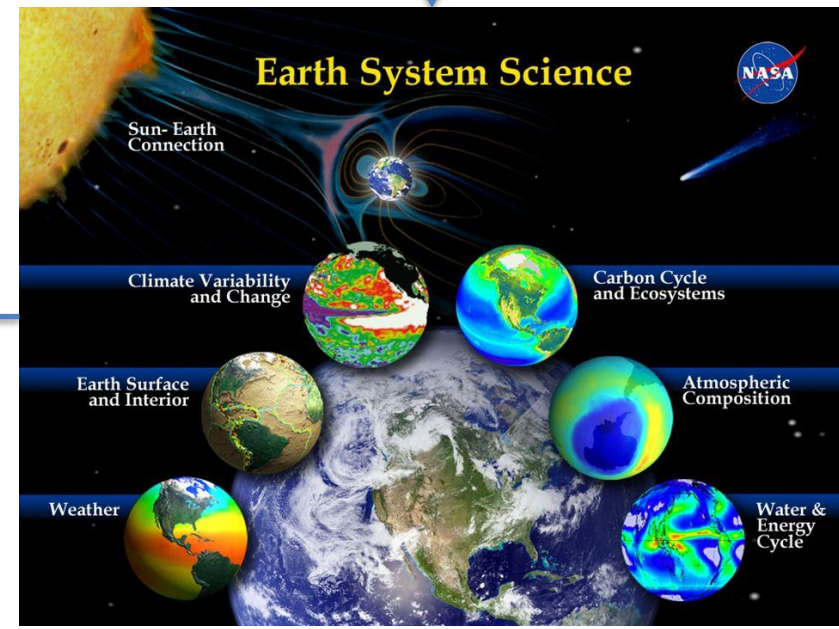
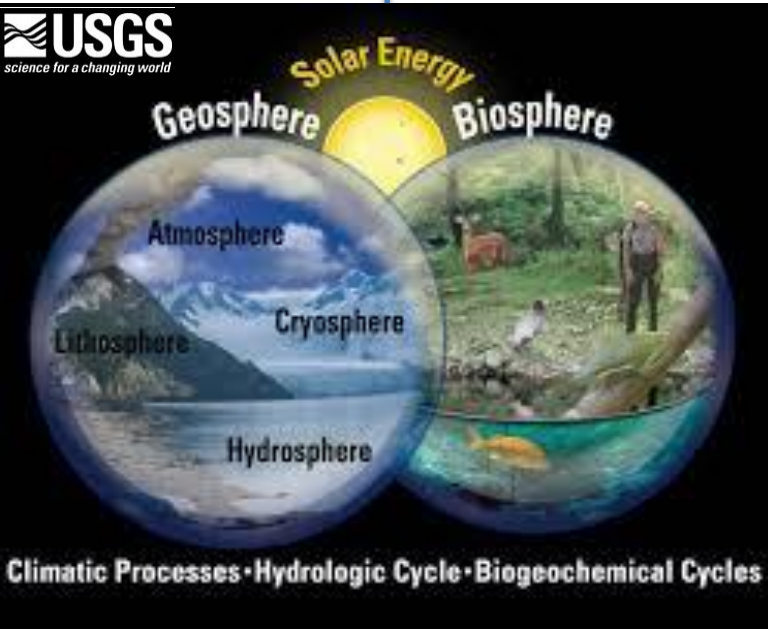
- a. Desafios do INPE na Modelagem do Sistema Terrestre.**



# O que é um Sistema Terrestre?



**Por que acoplar oceano e atmosfera + ...?**  
**R: Tratar o Sistema Terrestre globalmente**



## Modelos de Circulação Geral da Atmosfera

Mid-1970s

Atmosphere

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\delta_{i3}g + f_c \varepsilon_{ij3} \bar{u}_j - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\nu \partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial (\bar{u}'_i \bar{u}'_j)}{\partial x_j}$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} = -\bar{\mathbf{v}} \cdot \nabla \bar{\theta} - \bar{w} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{u}'_i \bar{\theta}') + \frac{L}{\pi c_p} (c - e) + Q_{rad}$$

$$\frac{\partial \bar{q}_v}{\partial t} = -\bar{\mathbf{v}} \cdot \nabla \bar{q}_v - \bar{w} \frac{\partial \bar{q}_v}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{u}'_i \bar{q}'_v) - (c - e)$$

$$\frac{\partial \bar{q}_l}{\partial t} = -\bar{\mathbf{v}} \cdot \nabla \bar{q}_l - \bar{w} \frac{\partial \bar{q}_l}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{u}'_i \bar{q}'_l) + (c - e) - P_r$$

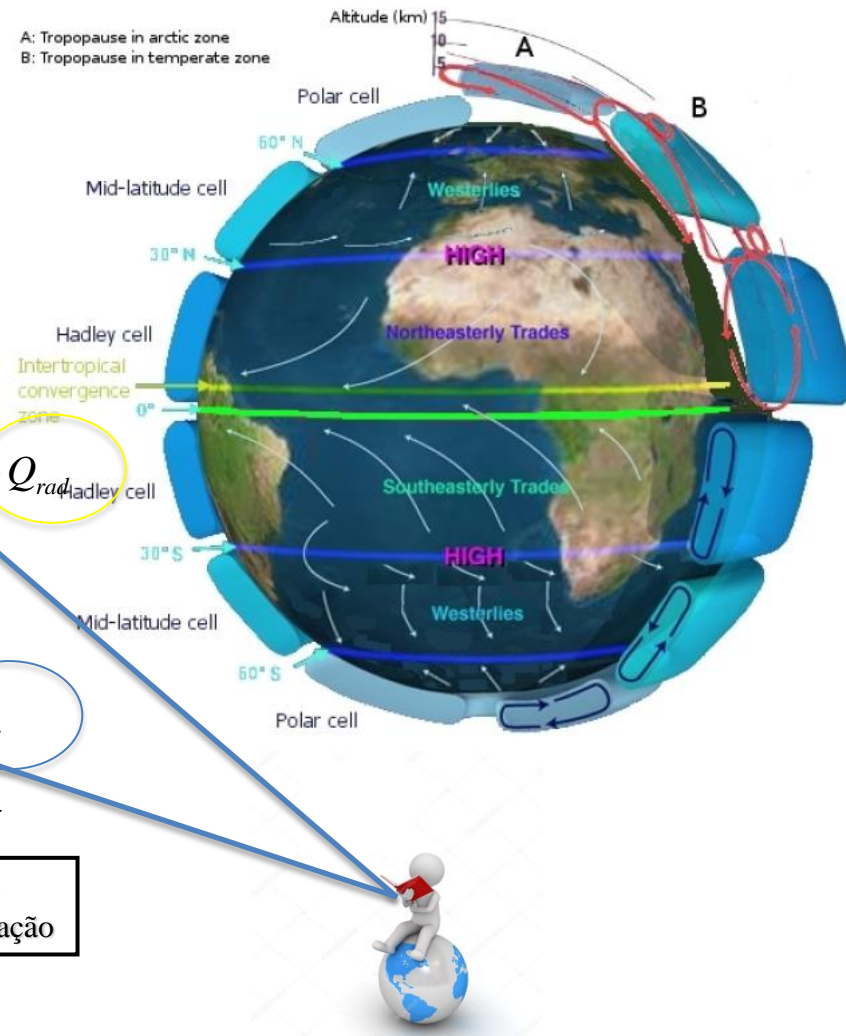
Advecção de  
Larga escala

Subsiden-  
cia de Larga  
Escala

Transporte  
turbulento

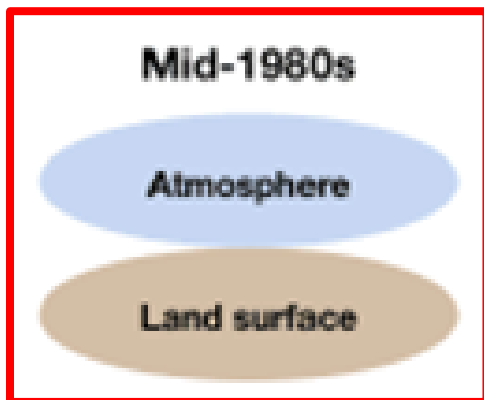
Taxa de  
Condens-  
ação  
líquida

Taxa de  
Precipitação



➤ **Circulações impulsionadas por aquecimento desigual em um esfera rotativa**

## Modelo de processos de superfície terrestre



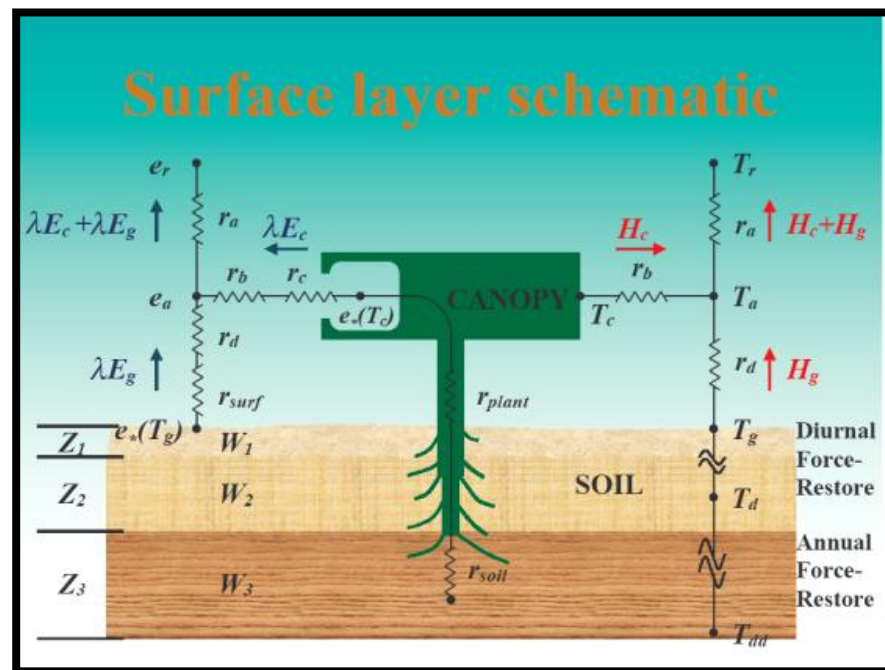
SSiB

$$L_e \approx \overline{u'_i X'}$$

$$S_h \approx \overline{u'_i X'}$$

$$\tau_i \approx \overline{u'_i X'}$$

$$Q_s, T_s$$



SSiB (Xue et al., 1991)

$$\frac{\partial \bar{X}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{X})}{\partial x_i} = \dots - \left. \frac{\partial \bar{u}'_i X'}{\partial x_i} \right|_{\text{superficie}} - \left. \frac{\partial \bar{u}'_i X'}{\partial x_i} \right|_{\text{conv}} + \bar{S}_x \Big|_{\text{conv}} + \bar{S}_x \Big|_{\text{outros}}$$

Simplified Simple Biosphere Model 2 – SSiB2 (Zhan et al., 2003) em desenvolvimento>>> future SSiB4



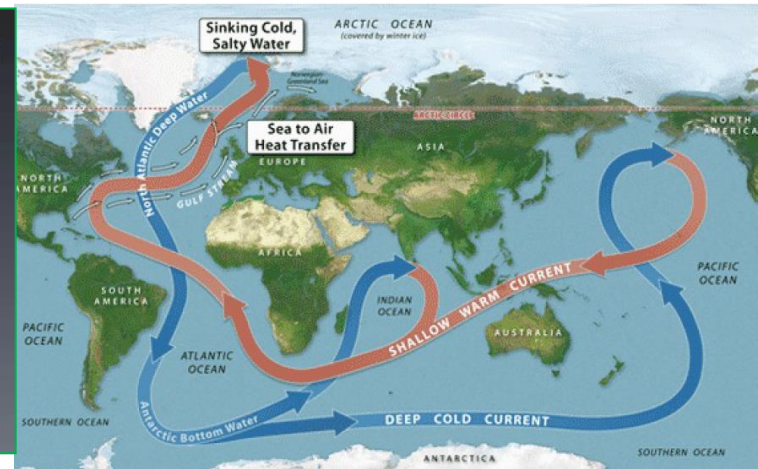
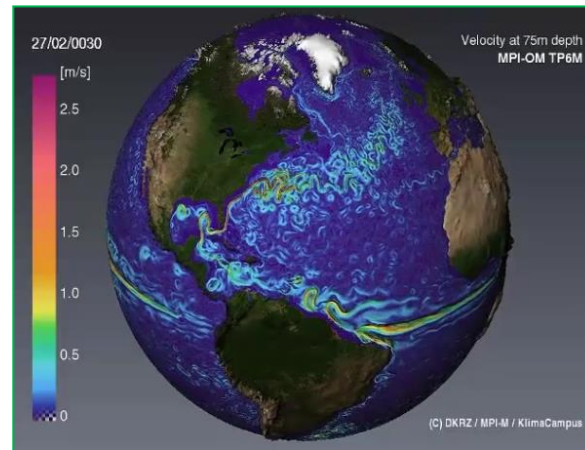
## Modelo de Circulação Geral do Oceano

Early 1990s

Atmosphere

Land surface

Ocean and sea ice



$$L_e \approx \overline{u'_i X'} = \text{!!!!}$$

$$S_h \approx \overline{u'_i X'} = \text{!!!!}$$

$$\tau_i \approx \overline{u'_i X'} = \text{!!!!}$$

$$Q_s, T_s$$

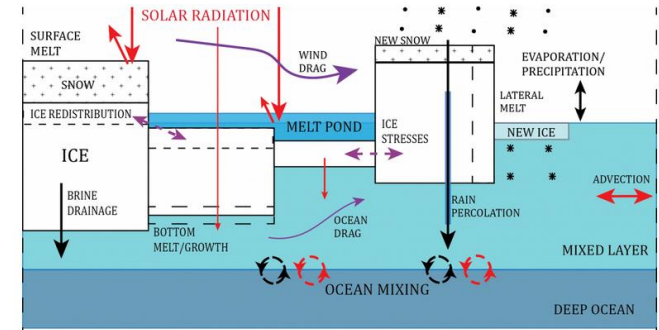
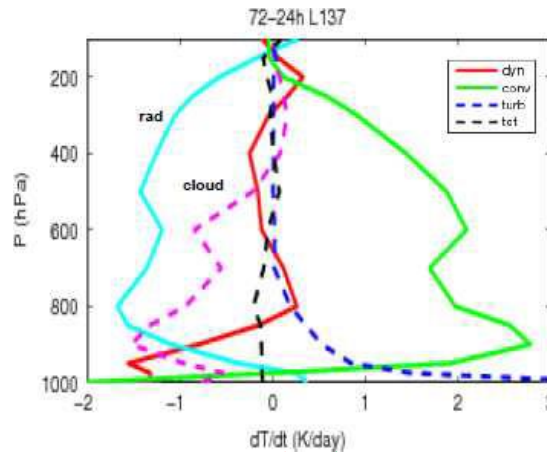
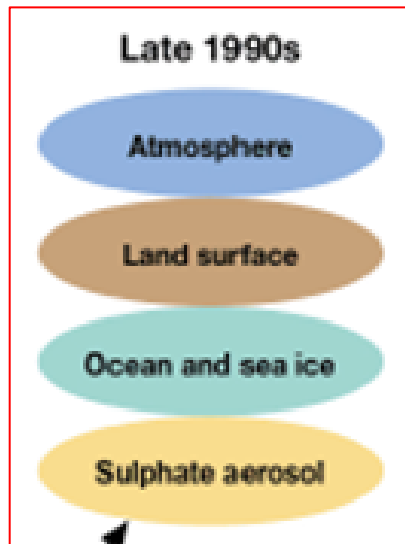


Figure 2: Some of the various physics now included in state-of-the-art sea ice models (e.g. CICE). Red arrows indicate heat fluxes, black arrows indicate salt/freshwater fluxes, and purple arrows indicate dynamic forces

$$\frac{\partial \bar{X}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{X})}{\partial x_i} = \dots - \left. \frac{\partial \bar{u}'_i X'}{\partial x_i} \right|_{\text{superficie}} - \left. \frac{\partial \bar{u}'_i X'}{\partial x_i} \right|_{\text{conv}} + \bar{S}_x \Big|_{\text{conv}} + \bar{S}_x \Big|_{\text{outros}}$$

**Circulações impulsionadas por aquecimento desigual em um esfera rotativa**

## Química e Aerossol



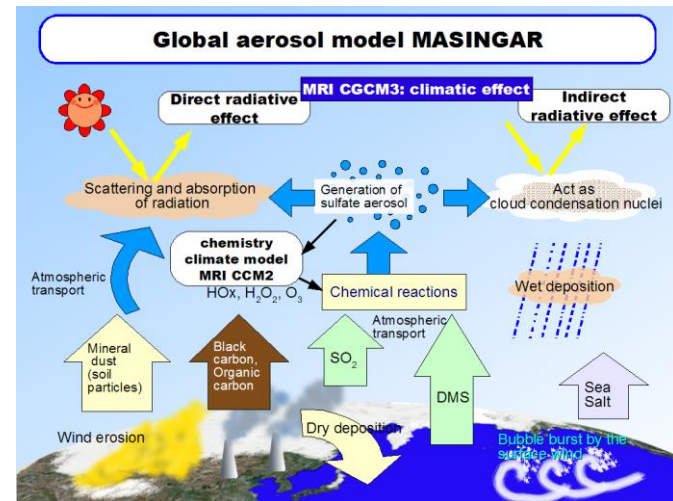
Reações químicas

$$\frac{\partial \bar{X}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{X})}{\partial x_i} = \dots$$

Transporte-Advecção

$$\left. \frac{\partial \overline{u'_i X'}}{\partial x_i} \right|_{chem}$$

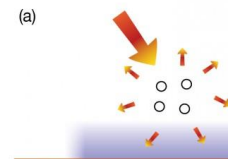
$$\left. \frac{\partial \overline{u'_i X'}}{\partial x_i} \right|_{aerosol}$$



### Interações Aerossóis-Radiação

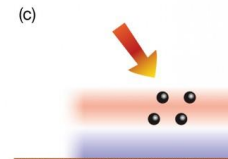
espalhamento por aerossóis

<http://www.climatechange2013.org/report/reports-graphic/ch7-graphics/>

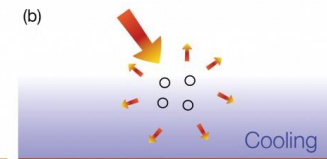


Espalhamento da radiação solar por aerossóis. Menos radiação solar chega a superfície. Na qual induz a um resfriamento localizado

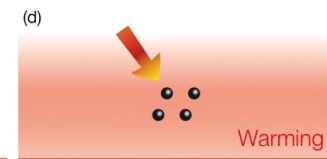
#### Absorção Por Aerossóis



A radiação solar absorvida por aerossóis. Aquece a camada de aerossóis mas a superfície, que recebe menos radiação solar pode resfriar localmente.



A circulação atmosférica e os processos de mistura espalham o resfriamento regionalmente e na vertical

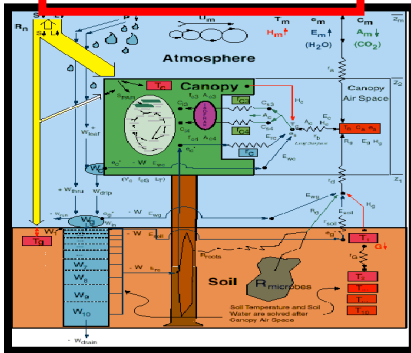


Em larga escala há um aquecimento líquido da superfície e atmosfera porque a circulação atmosférica e os processos de mistura redistribuem a energia térmica.

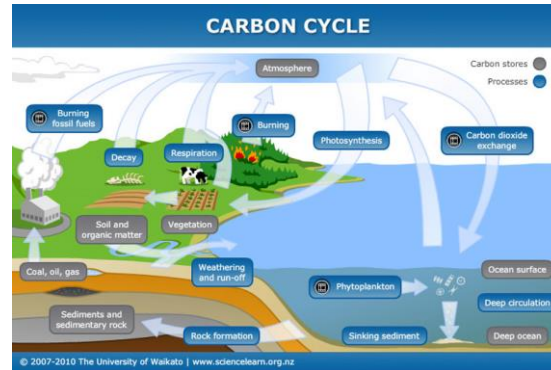
$$+ \overline{S_x} \Big|_{chem} + \overline{S_x} \Big|_{aerosol}$$

## Interações entre ecossistemas e o ciclo do carbono

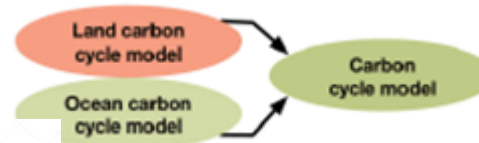
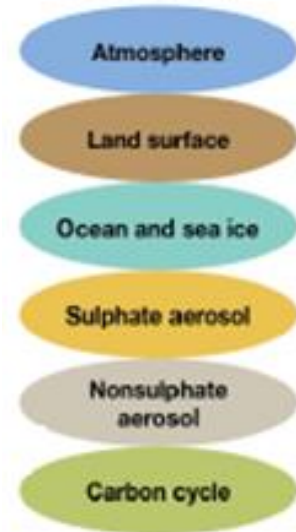
SiB 2.5



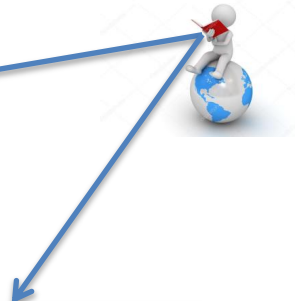
SiB 2.5 (Baker et al., 2003)



Present Day



$$C_x \approx \overline{u'_i C'} = !!!!$$

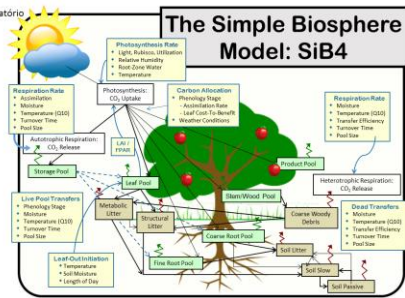


$$\frac{\partial \bar{X}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{X})}{\partial x_i} = \dots - \left. \frac{\partial \bar{u}'_i X'}{\partial x_i} \right|_{superficie} - \left. \frac{\partial \bar{u}'_i X'}{\partial x_i} \right|_{conv} + \bar{S}_x|_{conv} + \bar{S}_x|_{outros}$$

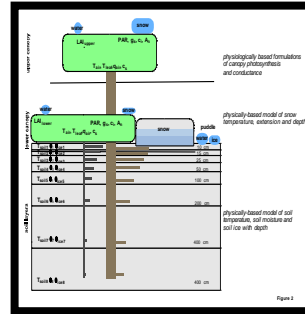


# Evolução da Modelagem do Sistema Terrestre

## Interações entre ecossistemas e o ciclo do carbono



SiB 4 (Xue)



IBIS (Foley)

Early 2000s?

Atmosphere

Land surface

Ocean and sea ice

Sulphate aerosol

Nonsulphate aerosol

Carbon cycle

Dynamic vegetation

Atmospheric chemistry

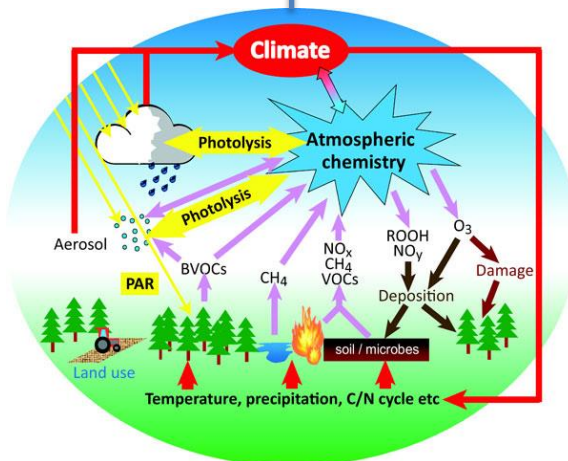
Dynamic vegetation

Dynamic vegetation

Atmospheric chemistry

Atmospheric chemistry

Atmospheric chemistry

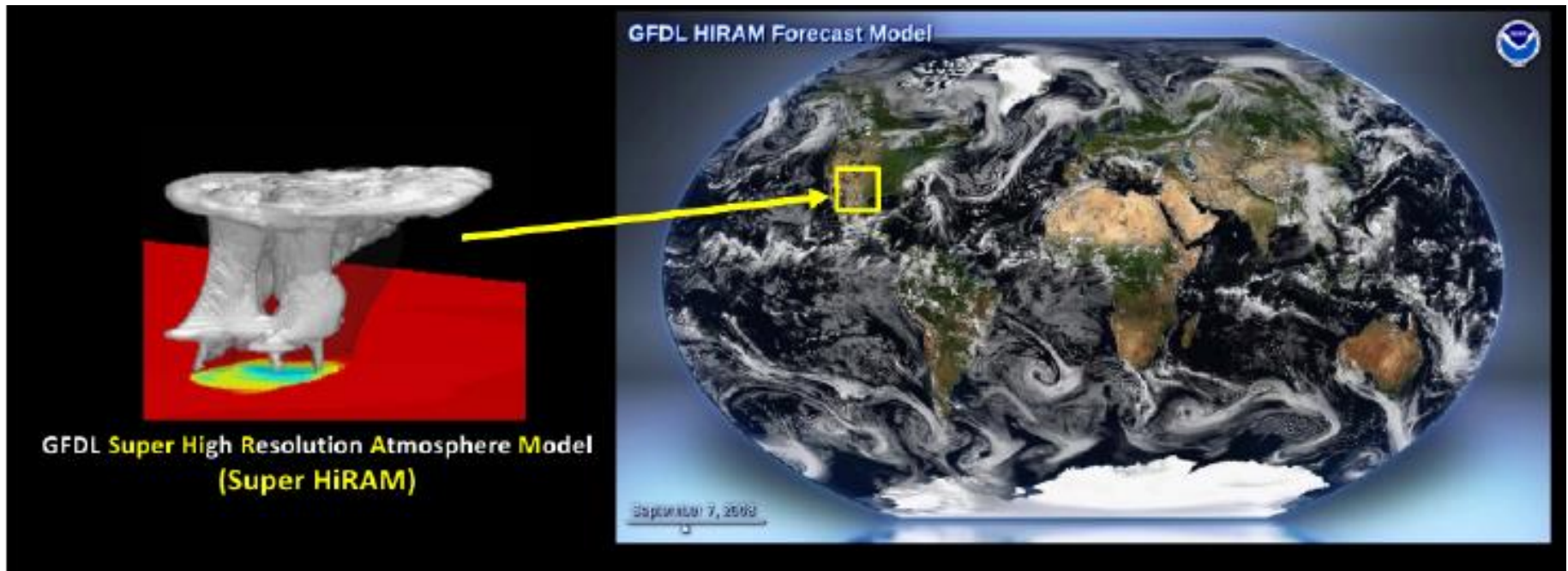


O Que Fazer com todas as componentes?

# Evolução da Modelagem do Sistema Terrestre

## Modelagem de Alta Resolução (CRM-AGCM)

O campo global da nuvem: um sistema multiescala



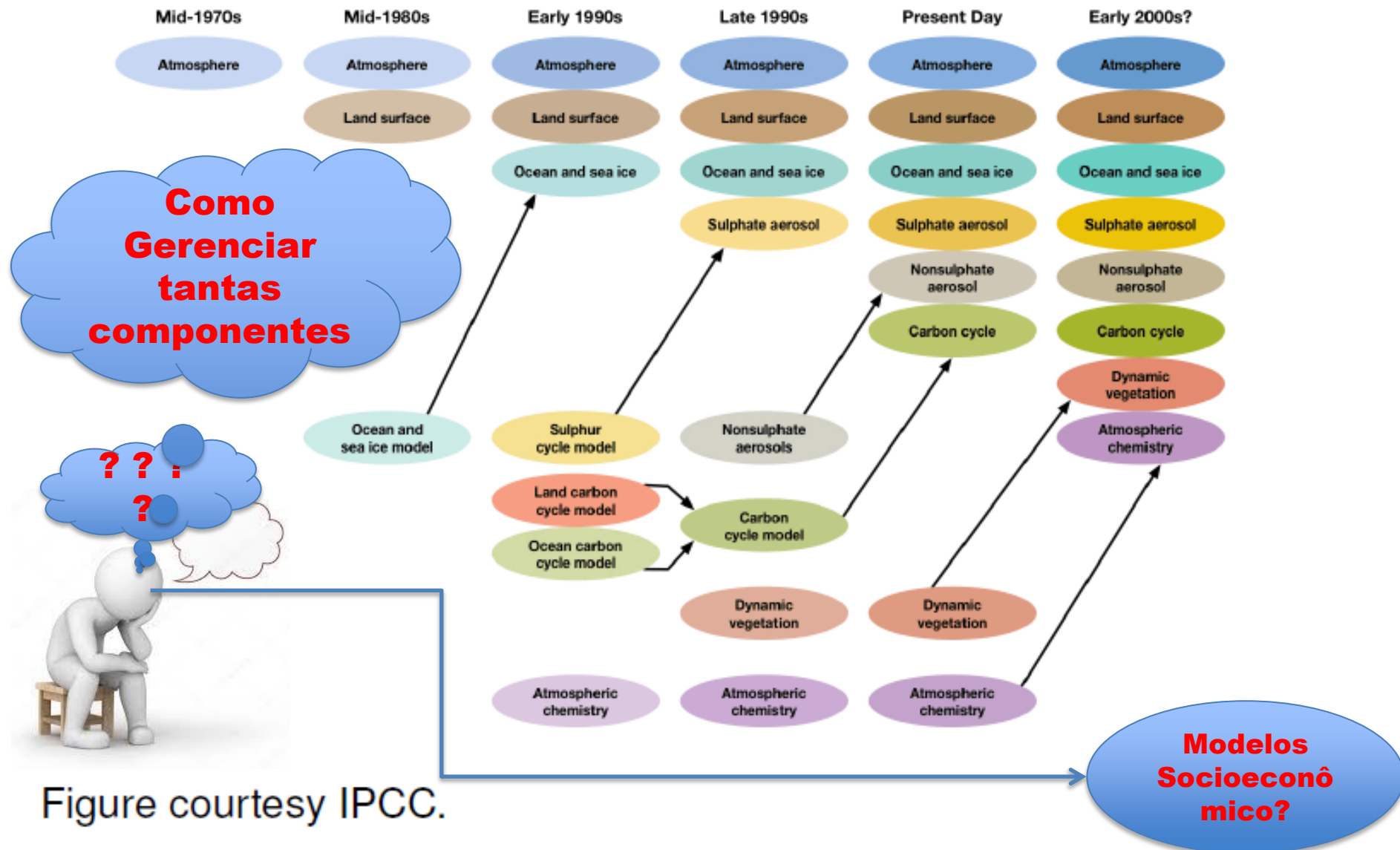
NOAA / GFDL. Estrutura de centenas de metros para escala planetária.

**Mais essa?**

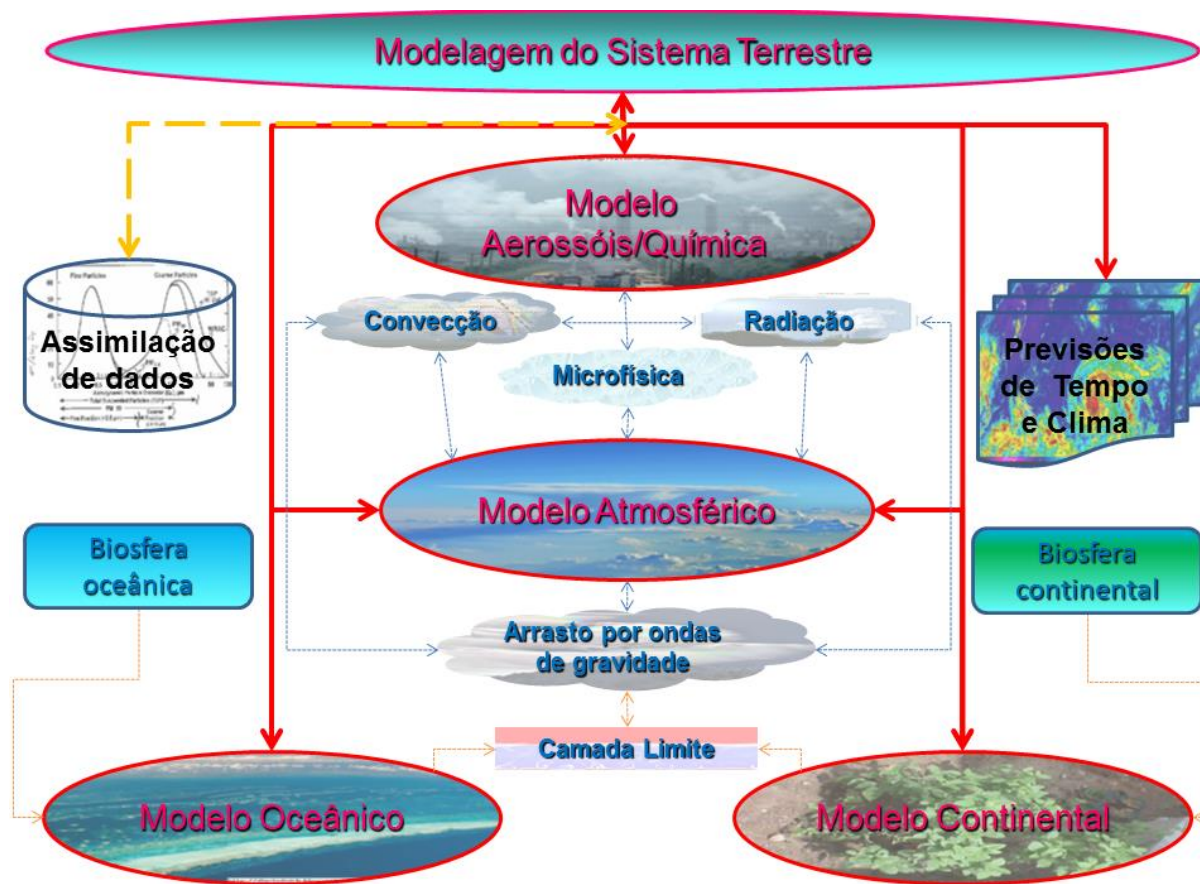


# Evolução da Modelagem do Sistema Terrestre

## Evolução do modelo do sistema terrestre



## Solução utilizar acopladores







# Evolução da Modelagem do Sistema Terrestre

---

**Quais são as considerações do *Acoplamento de código na modelagem climática*?**

**Restrições Numericas:** por ex. conservação de energia nas interfaces.

**Algoritmo de acoplamento** deve ser baseado na **ciência e modelagem**.

**O acoplamento deve ser fácil de implementar, flexível, eficiente e portátil.**

**Iniciar com códigos existentes e desenvolvidos independentemente.**

**O desempenho global e os problemas de balanceamento de carga são cruciais**

[illegible]

stratosphere troposphere

Advection

NMVOCs, CO

OH

$\text{HO}_2, \text{RO}_2$

Atmospheric Model Layers

Stratosphere-Troposphere Exchange

$\text{O}_3$

$\text{O}(^1\text{D})$

$\text{H}_2\text{O}$

$\text{OH}$

$\text{O}_1$

Chemical Production

Chemical Destruction

Advection

Mixing

Deposition

Boundary Layer

Anthropogenic & Natural Emissions

Land

Ocean

Land

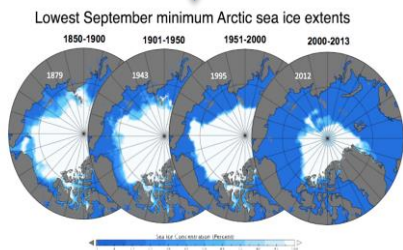
Young et al. Tropospheric Ozone Assessment Report

The diagram illustrates the three-cell model of atmospheric circulation on a globe. It shows the following components:

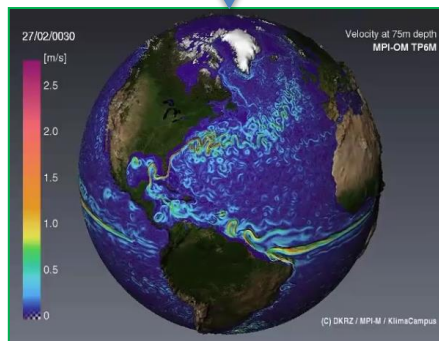
- Polar Cell:** Located at the top, with a **Polar high** at the pole and a **Subpolar low** at approximately 60° latitude. It features **Polar easterlies** blowing from the high to the low.
- Ferrel Cell:** Located in the middle, with a **Polar front** at approximately 60° latitude and a **Subtropical high** at approximately 30° latitude. It features **Westerlies** blowing from the high to the low.
- Hadley Cell:** Located at the bottom, with a **Subtropical high** at approximately 30° latitude and an **Equatorial low** at the equator. It features **Northeast trade winds** (NE trade winds) and **Southeast trade winds** (SE trade winds) blowing from the high to the low.

Red arrows indicate the vertical movement of air (rising at the low pressure zones and sinking at the high pressure zones), while blue arrows indicate the horizontal movement of air in the upper atmosphere. The diagram also shows the **Horse latitudes** at approximately 30° latitude.

# Dinâmica Sealce



# Dinâmica Ocea



**Surface Exchange Scaling Issues**

The diagram illustrates the scaling of surface exchange processes across different spatial and temporal scales. The vertical axis represents **Time** (from seconds to months/years), and the horizontal axis represents **Space** (from centimeters to 10,000 km).

The diagram is divided into two main sections: **Measurements** (left) and **Earth System Models (ESM)** (right).

**Measurements:** This section shows the scaling from **Leaf/soil** (cm) to **Canopy** (m). Key processes include **Trace gases, O<sub>2</sub>, VOCs, NO<sub>x</sub>** and **energy** exchange between the **Leaf/soil** and the **Canopy**.

**Earth System Models (ESM):** This section shows the scaling from **Ecosystem** (10m) to **ESM grid** (100m to 1000km) and finally to **Earth System Models (ESM)** (10,000 km). Key processes include **Trace gases, O<sub>2</sub>, VOCs, NO<sub>x</sub>** and **energy** exchange between the **Ecosystem** and the **ESM grid**. The **ESM grid** section also shows **Sea ice** and **Wet rain** processes.

The diagram highlights the challenges of scaling surface exchange processes from measurements to Earth System Models (ESM).

<https://www.dkrz.de/communication/galerie/Vis/ozean/storm>



# Considerações sobre Acoplamentos.

## Considerações Física

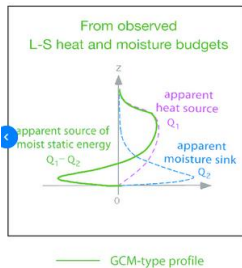
- 1- Detalhamento dos Processos físicos
- 2- Escalas dos Processos físicos
- 3-Interação dos processos físicos entre os módulos do sistema terrestre.

## Considerações Computacionais.

- 1-Custo Computacional
- 2-Engenharia de Software
- 3-Paralelismo e balanceamento de carga
- 4-Evolução dos processadores

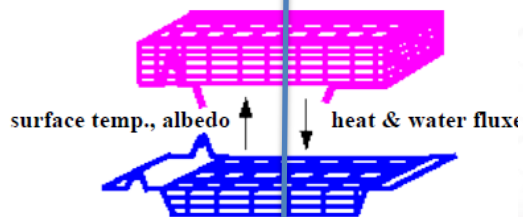


# Considerações sobre Acoplamentos.



?

**Escalas de processo físicos atmosférico (m,seg)**



**Escalas de acoplamento (s)**

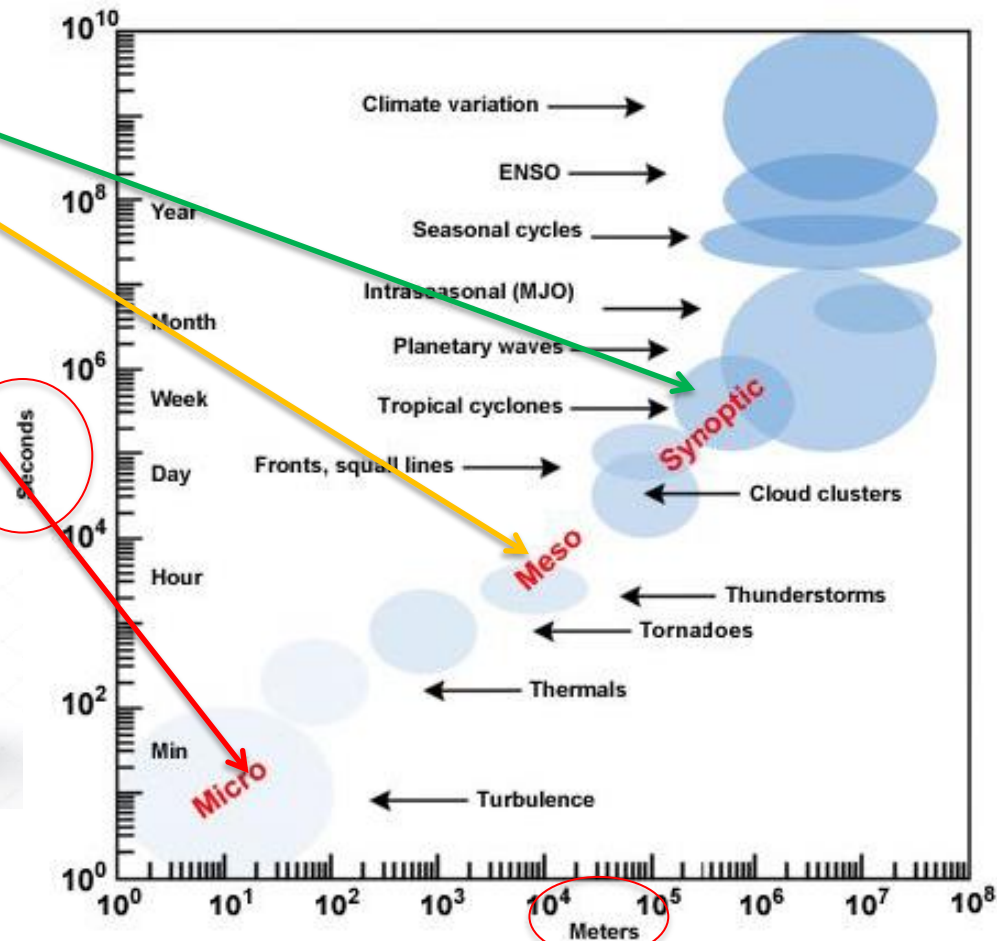
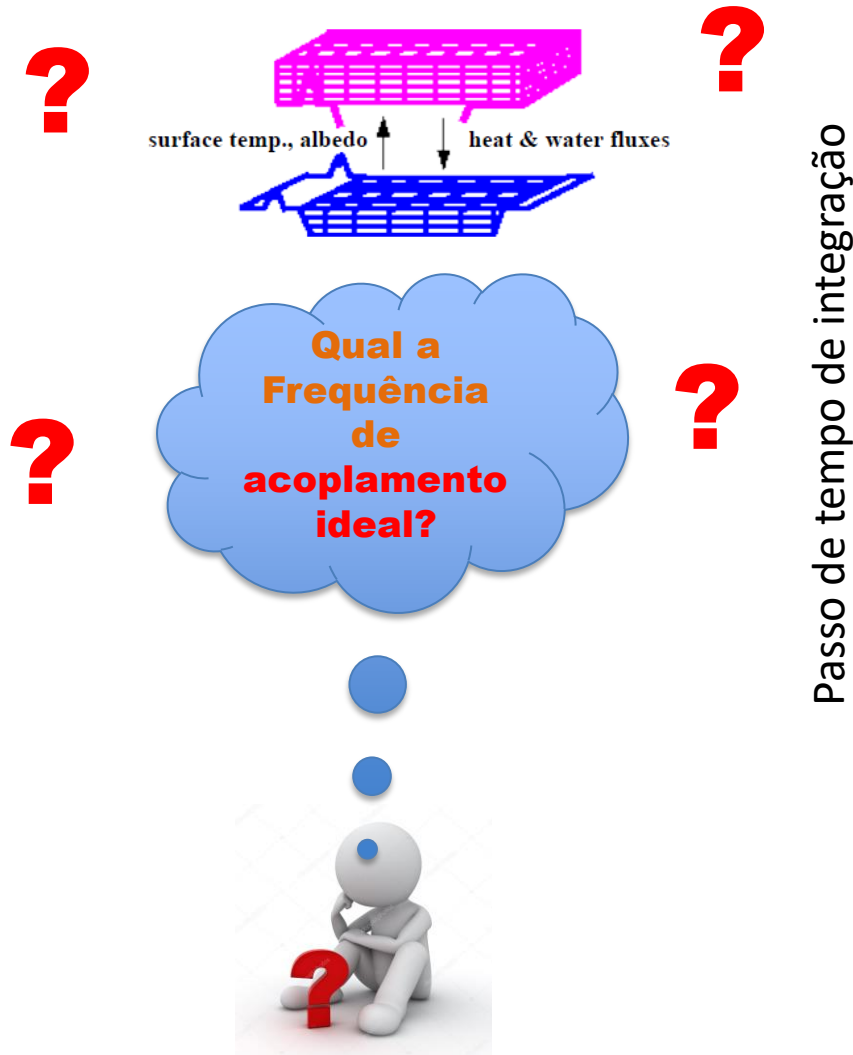


Figure courtesy UCAR.

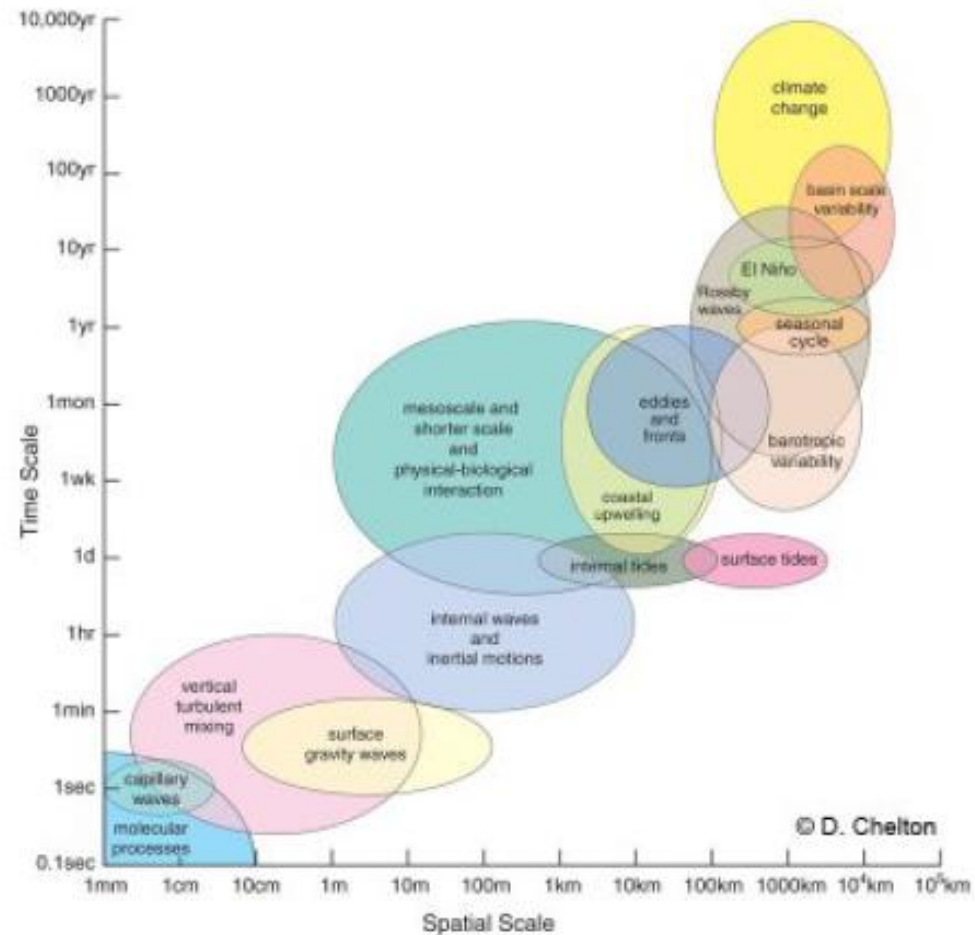


# Considerações sobre Acoplamentos.

## Escalas de processo oceanicos



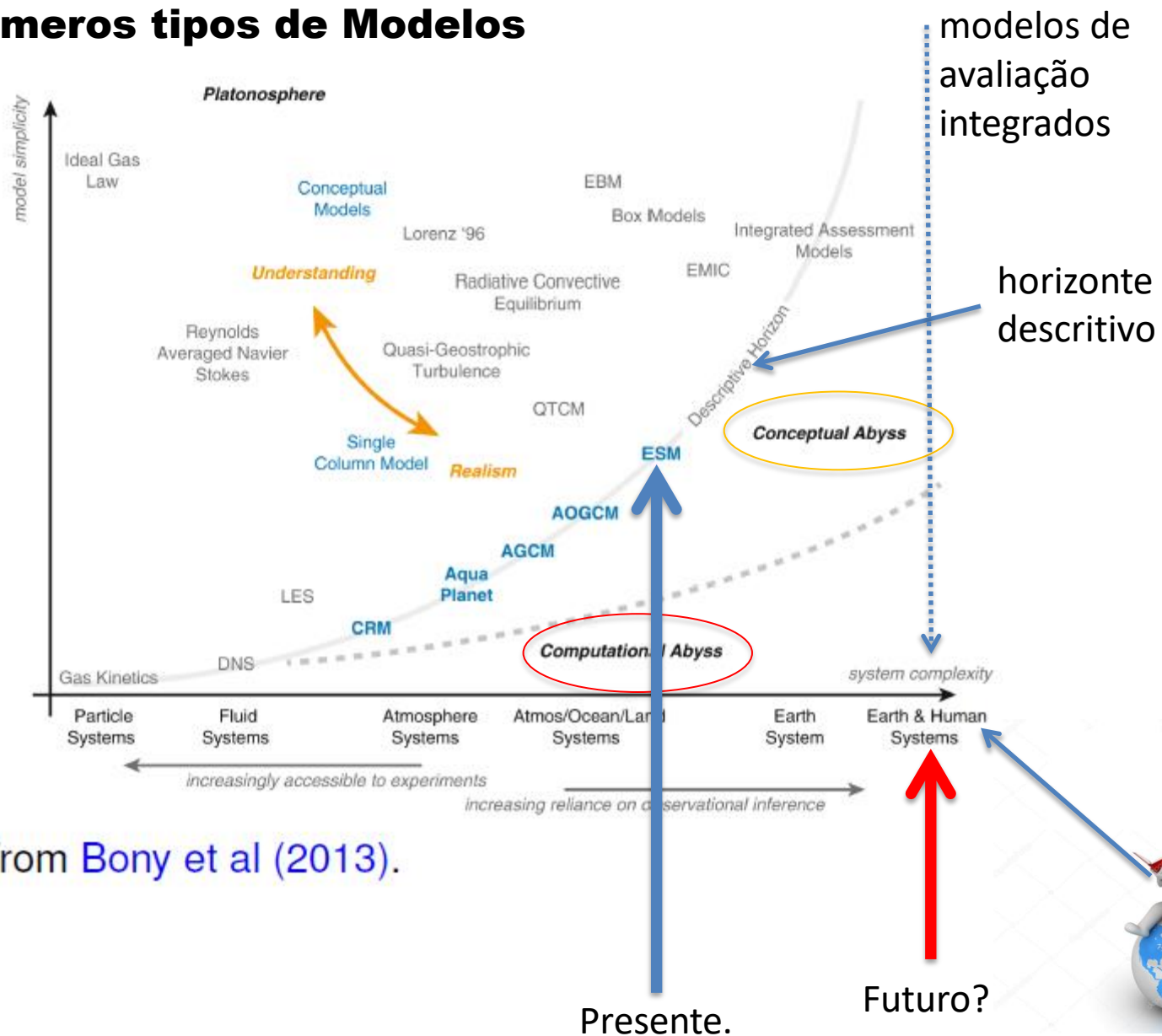
Passo de tempo de integração



Grade do modelo

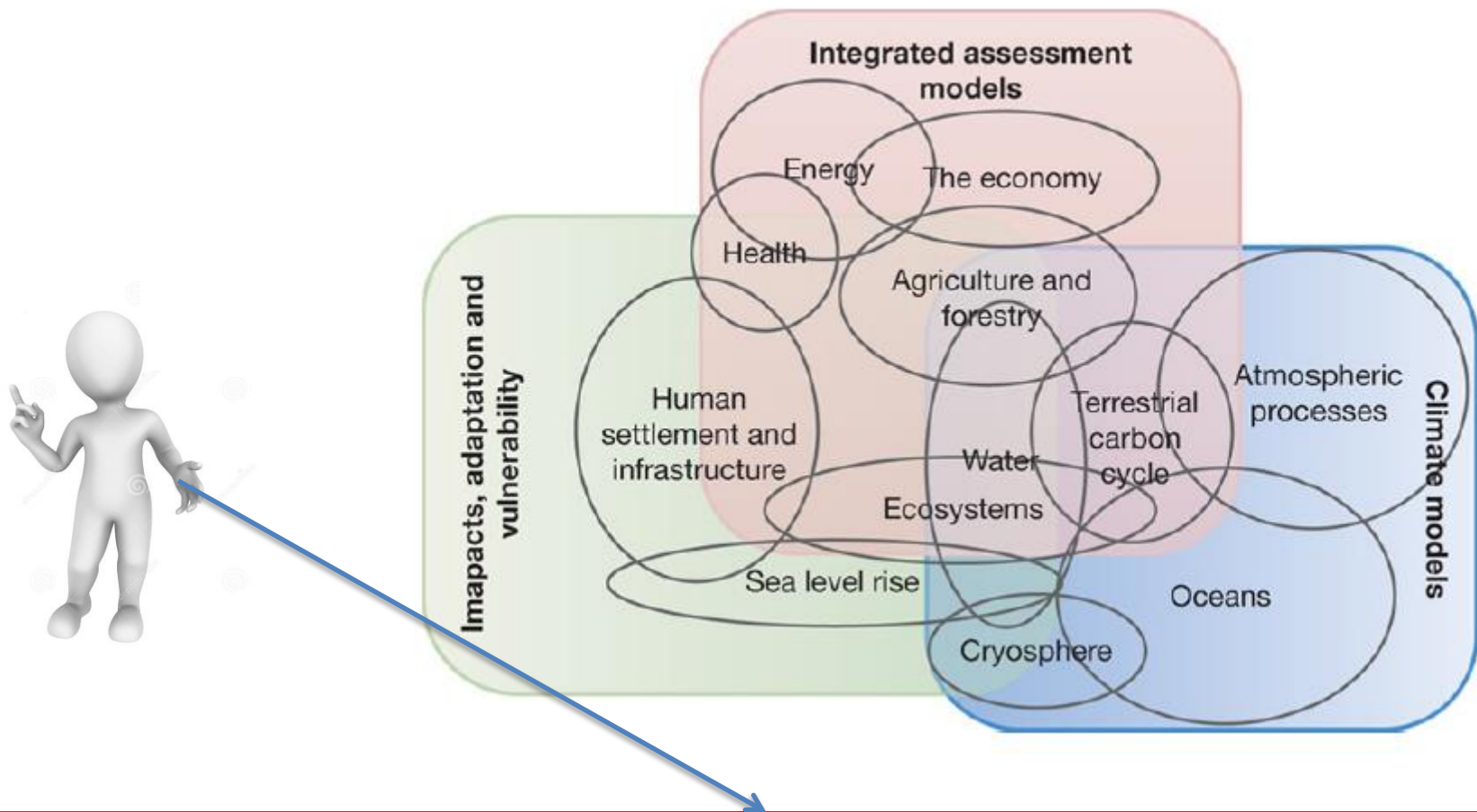
# Considerações sobre Acoplamentos.

## 0 Inumeros tipos de Modelos



# Considerações sobre Acoplamentos.

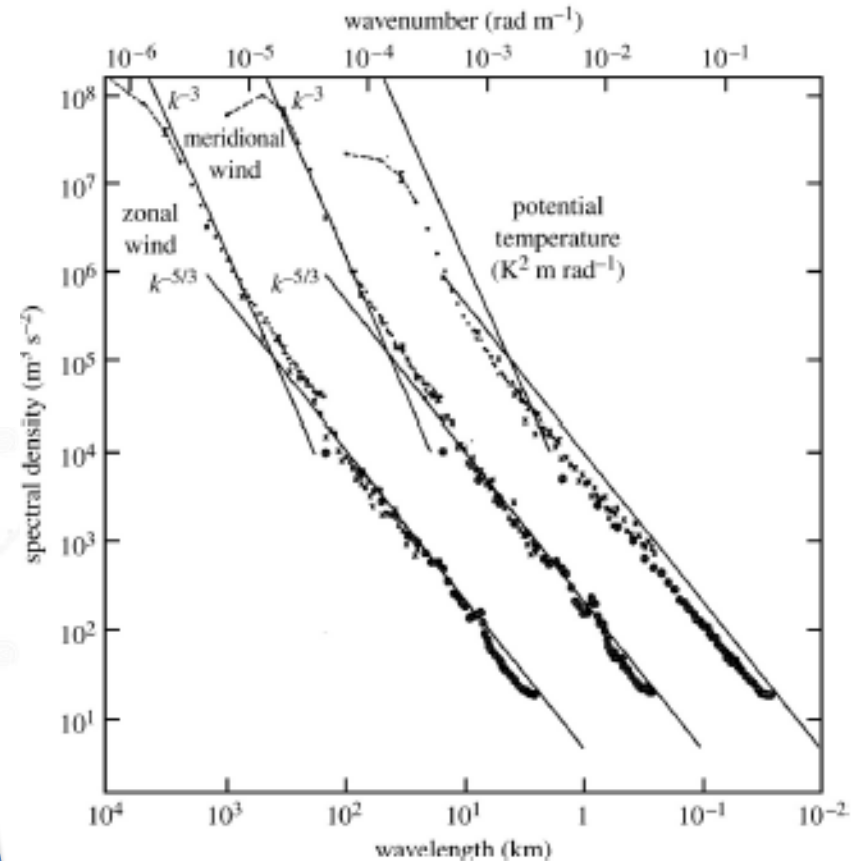
## A fragilidade dos sistemas acoplados



**Moss et al 2010. O acoplamento em toda esta cadeia de modelos é um Desafio científico, semântico e de software.**

# Considerações sobre Acoplamentos.

Natureza não há separação de escalas "grandes" e "pequenas"



**Nastrom e Gage (1985).** Nós arbitrariamente truncamos a resolução em alguns ponto para separar "**dinâmica**" de "**física**".





# Considerações sobre Acoplamentos.

---

## O que significa “acoplamento de códigos”?

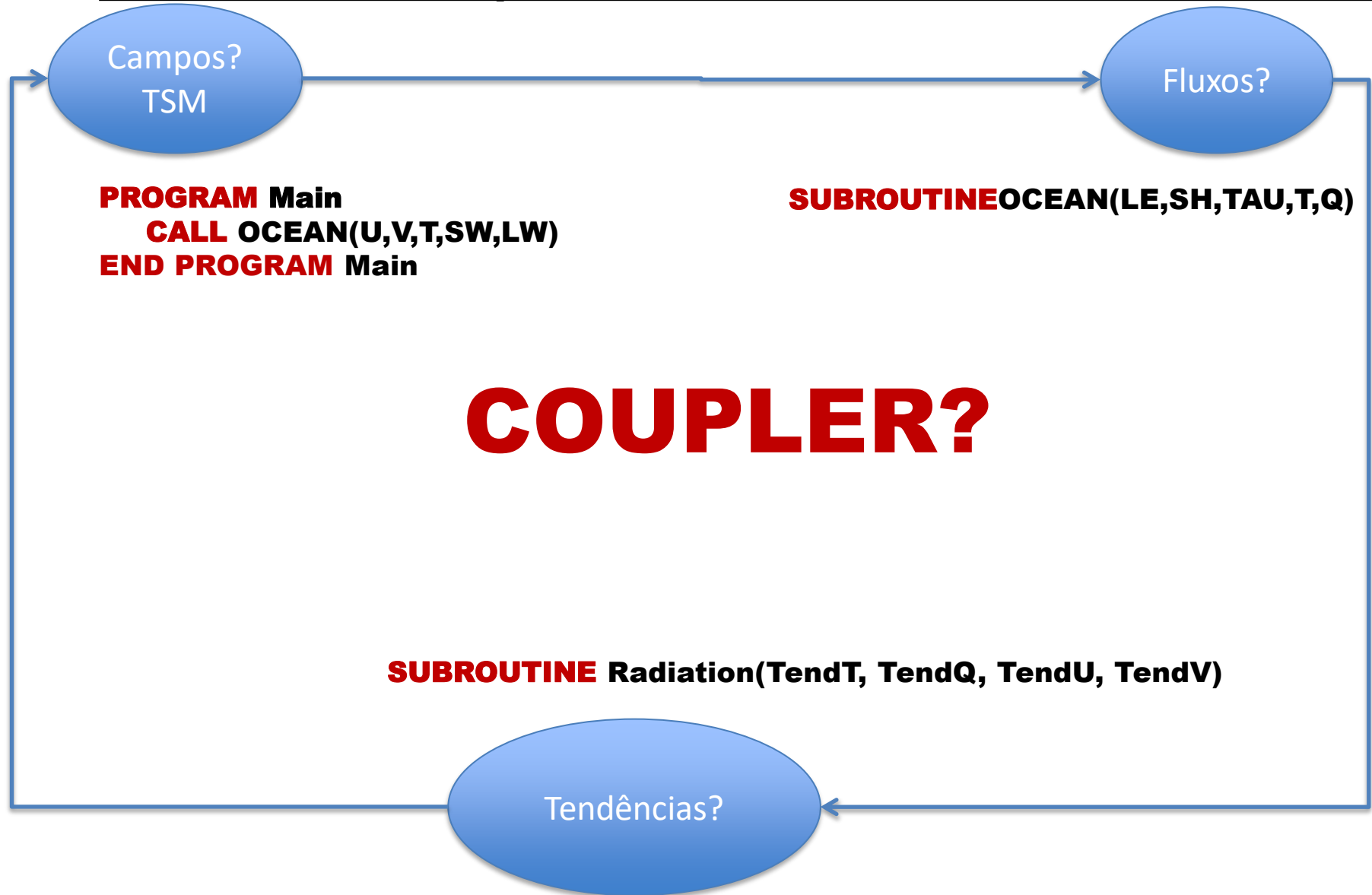
- **Troca e transformação de informações na interface de código.**
- **Gerenciar a execução e sincronização dos códigos.**





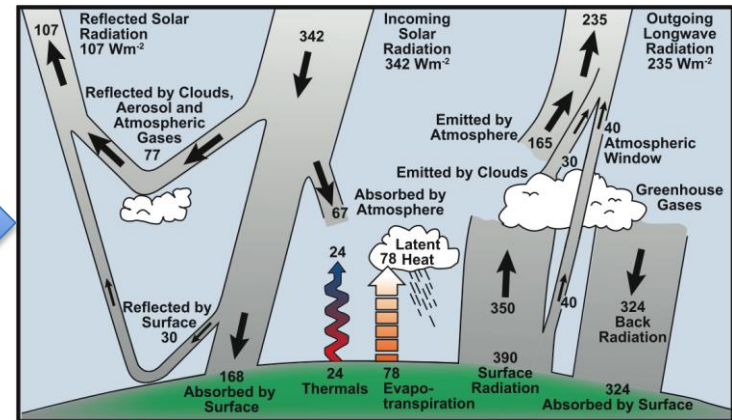
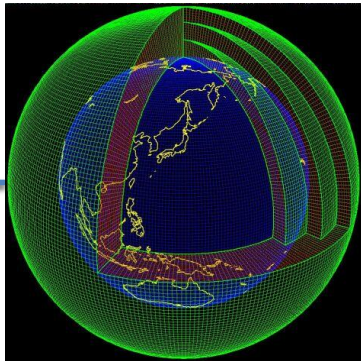
# Considerações sobre Acoplamentos.

Quais Variáveis acoplar entre os módulos do Sistema Terrestre?



# Considerações sobre Acoplamentos.

## Acoplamento da Radiação Global



**PROGRAM Main**  
**CALL RADIATION(Q,T,CLD,TendT,SW,LW)**  
**END PROGRAM Main**

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{T})}{\partial x_i} = - \left. \frac{\partial \bar{u}'_i T'}{\partial x_i} \right|_{conv} - \left. \frac{\partial \bar{u}'_i T'}{\partial x_i} \right|_{turb} - \left. \frac{\partial R_i}{\partial x_i} \right|_{rad} + L(\bar{c} - \bar{e}) \Big|_{conv} + L(\bar{c} - \bar{e}) \Big|_{grid-scale}$$

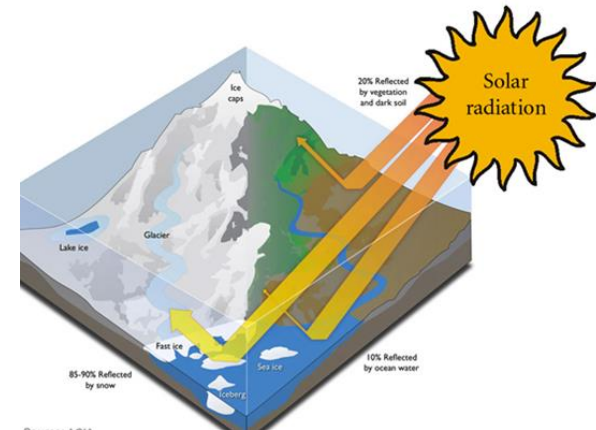
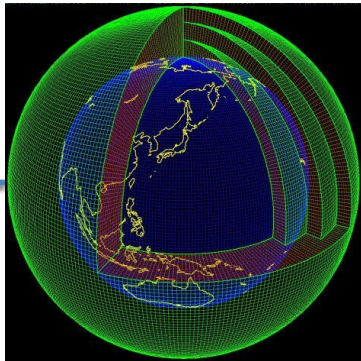
$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{q})}{\partial x_i} = - \left. \frac{\partial \bar{u}'_i q'}{\partial x_i} \right|_{conv} - \left. \frac{\partial \bar{u}'_i q'}{\partial x_i} \right|_{turb} + (\bar{c} - \bar{e}) \Big|_{conv} + (\bar{c} - \bar{e}) \Big|_{grid-scale}$$

O aquecimento resulta de um pequeno desequilíbrio na soma de muitos componentes e feedbacks.



# Considerações sobre Acoplamentos.

## Acoplamento da Superfície



```
PROGRAM Main
CALL Surface(Q,T,u,u,CLD, &
TendT, TendQ, TendU, &
TendV, TendT,SW,LW,)
END PROGRAM Main
```

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{T})}{\partial x_i} = - \left. \frac{\partial \bar{u}'_i T'}{\partial x_i} \right|_{conv} - \left. \frac{\partial \bar{u}'_i T'}{\partial x_i} \right|_{surf} - \left. \frac{\partial R_i}{\partial x_i} \right|_{rad} + L(\bar{c} - \bar{e}) \Big|_{conv} + L(\bar{c} - \bar{e}) \Big|_{grid-scale}$$

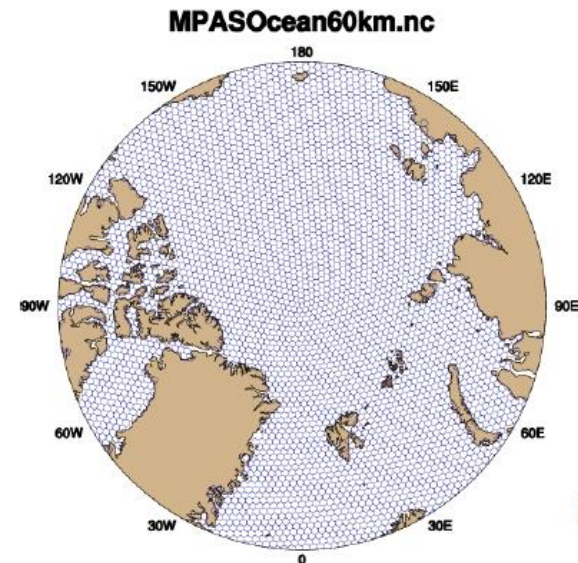
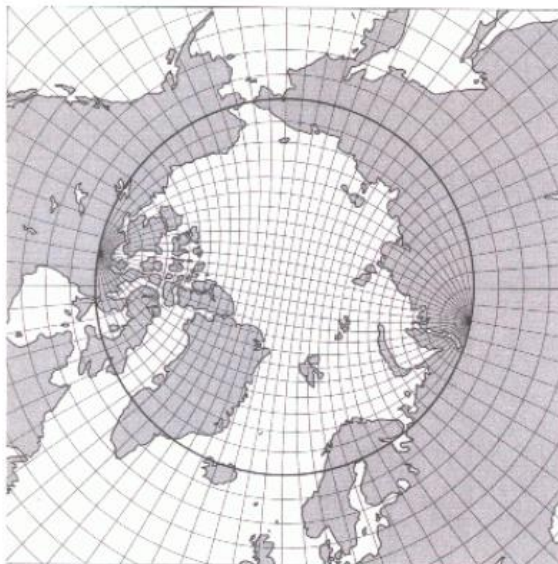
$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{q})}{\partial x_i} = - \left. \frac{\partial \bar{u}'_i q'}{\partial x_i} \right|_{conv} - \left. \frac{\partial \bar{u}'_i q'}{\partial x_i} \right|_{surf} + (\bar{c} - \bar{e}) \Big|_{conv} + (\bar{c} - \bar{e}) \Big|_{grid-scale}$$

O aquecimento resulta de um pequeno desequilíbrio na soma de muitos componentes e feedbacks.



## Diversidade entre os componentes do modelo

- **Nucleo Dinamico:** poucas variáveis-chave que representam massa, momento, energia, mas fortes dependências entre células de grade. Ampla gama de valores numéricos: métodos DF, VF, EF, ES todos usados atualmente.
- **Land:** não há dependências de dados entre as células, mas representações altamente variadas da dinâmica do ecossistema dentro de uma célula.
- Questões numéricas associadas a polos e singularidades.





# Considerações sobre Acoplamentos.

---

## As terminologia de acoplamento

- 1-Acoplamento:** entre diferentes subsistemas climáticos com feedbacks e fluxos em ambas as direções.
- 2-Aninhamento:** um componente de resolução mais fina acoplado dentro do mesmo componente em resolução mais grossa (**WRF**).
  - a. Aninhamento unidirecional:** Sem feedback do modelo de escala fina para o modelo de escala grossa (consulte também **downscaling dinâmico**, modelagem **regional** ou de **área limitada**).
  - b. Aninhamento bidirecional:** recursos de escala fina são realimentados para modificar o estado de grade grossa.
- 3-Encadeamento:** modelos de diferentes subsistemas sem feedback, por exemplo, saúde, agricultura, modelos de sistemas humanos.
- 4-Dinâmica e Física:** escalas de movimento resolvidas e não resolvidas.



## **A Estrutura de um Modelo do Sistema Terrestre Acoplado**



**a. Componentes e Grade.**

**b. Conservação e Acurácia**

**c. Time Step e estabilidade**

**d. A troca de Grade**



## Evolução do modelo do sistema terrestre

**Os desenvolvedores devem encontrar a melhor forma de separar e agrupar a componentes**

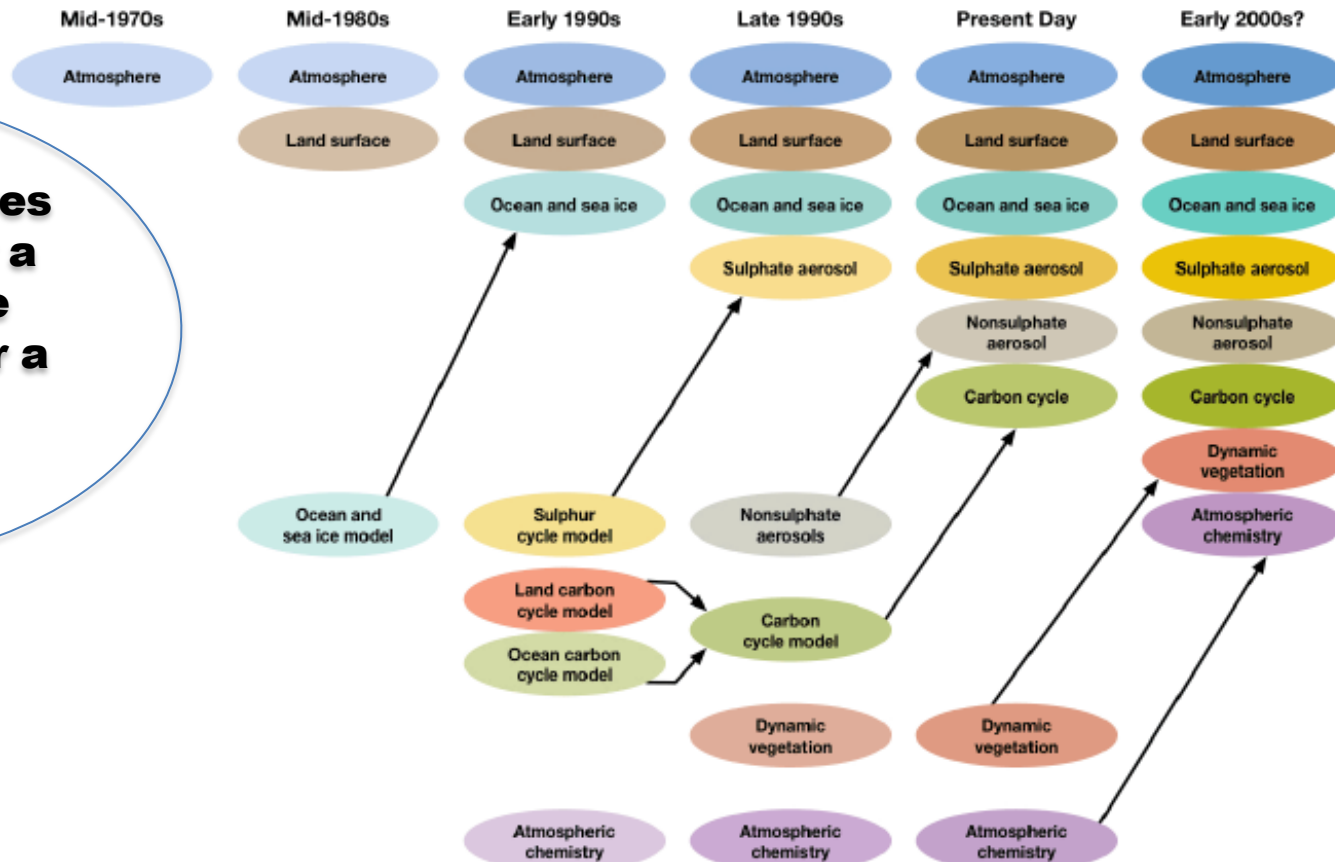


Figure courtesy IPCC.

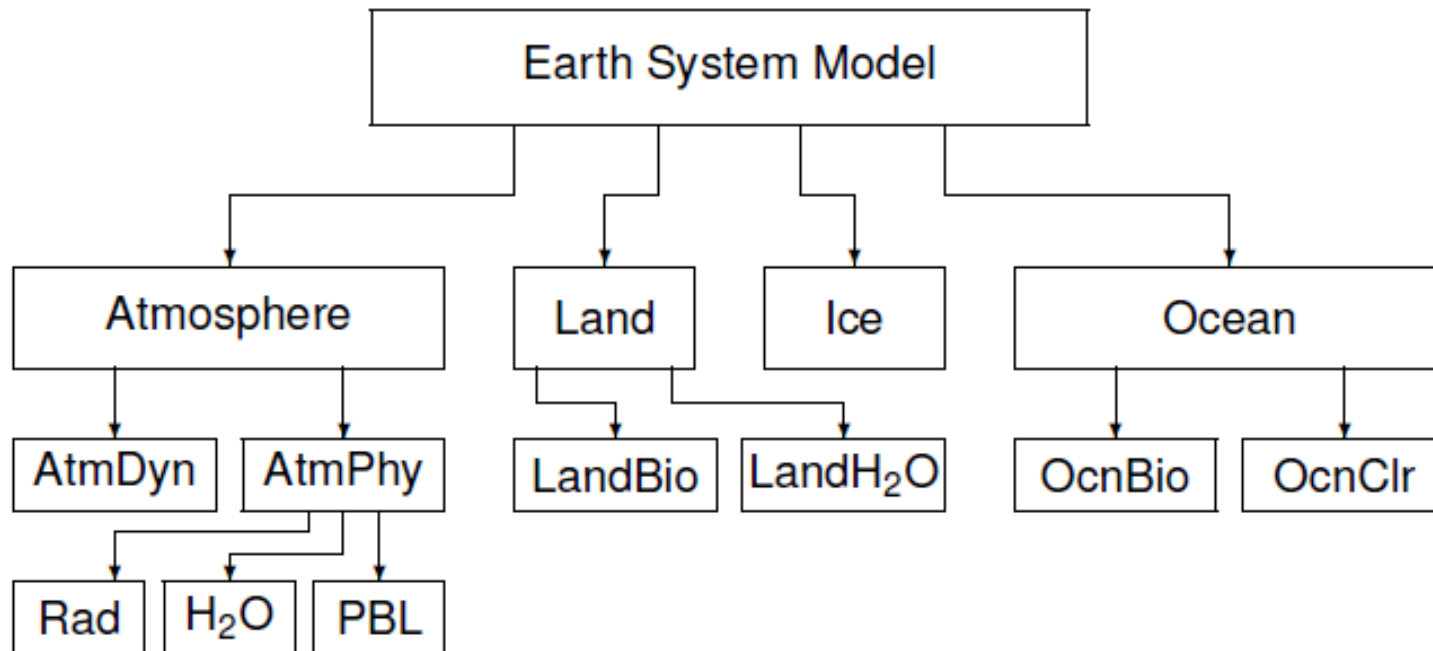






# Software de Acoplamento

## Arquitetura do modelo de sistema terrestre idealizado

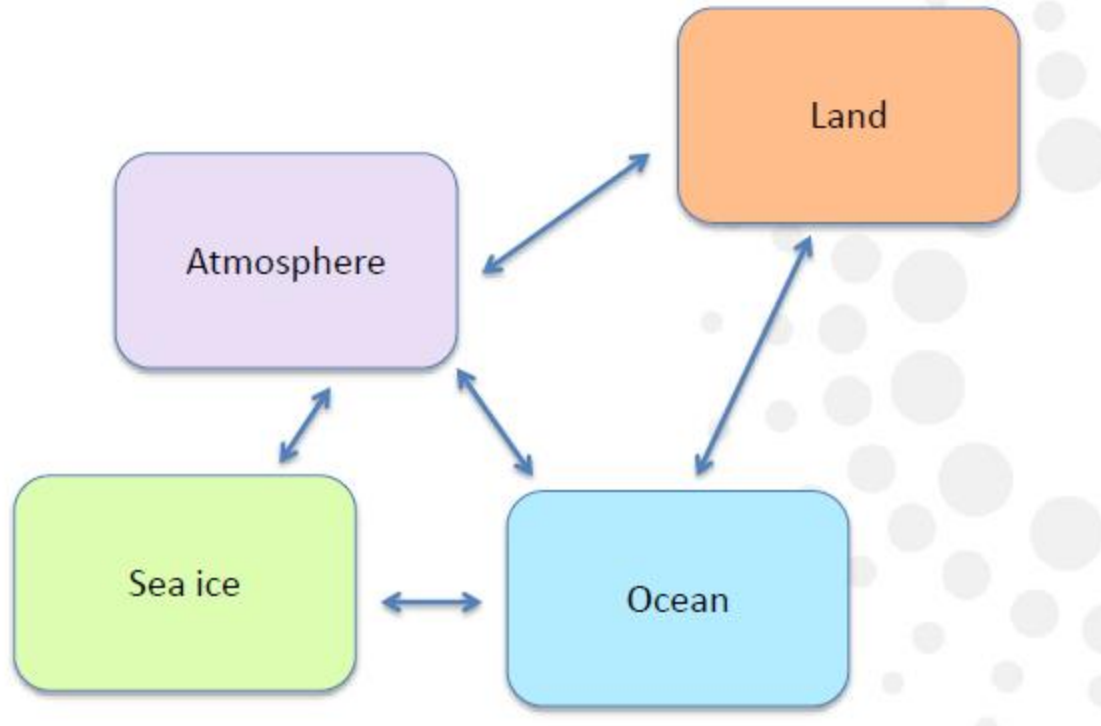


Os especialistas nas componentes devem ter a liberdade de escolher algoritmos, **grades**, **discretizações**, **escalonamento de tempo**, ...



# Software de Acoplamento

**Construído a partir de componentes**



**Os especialistas nas componentes devem ter a liberdade de escolher algoritmos, **grades, discretizações, escalonamento de tempo, ...****



# Software de Acoplamento

---

## Subroutine coupling

- Transform one code into a subroutine
- Make one code call the other code as a subroutine

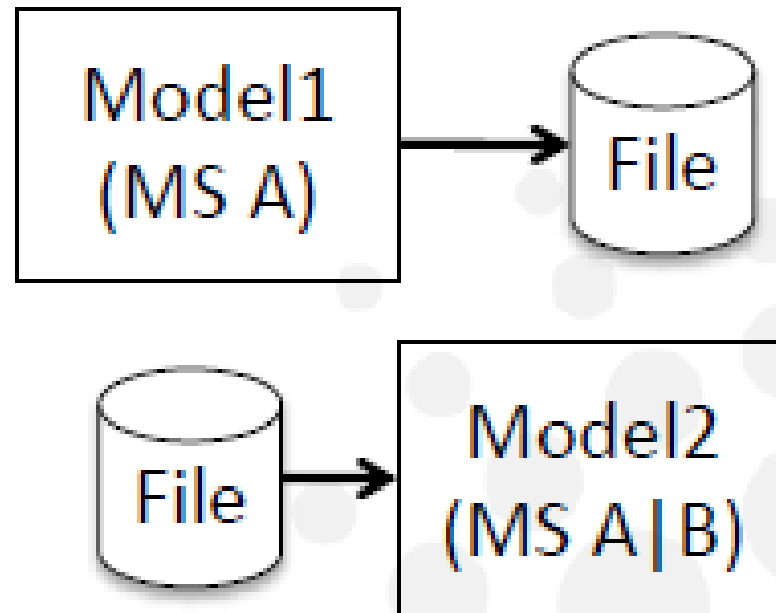
```
program prog1  
...  
call prog2 (fieldin, fieldout,...)  
...  
end prog1
```

```
program subroutine prog2  
...  
end prog2
```

😊 efficient  
😊 sequential components

😞 hard coded coupling  
😞 no flexibility in the component layout

## Escrita e Leitura de dados de Arquivos

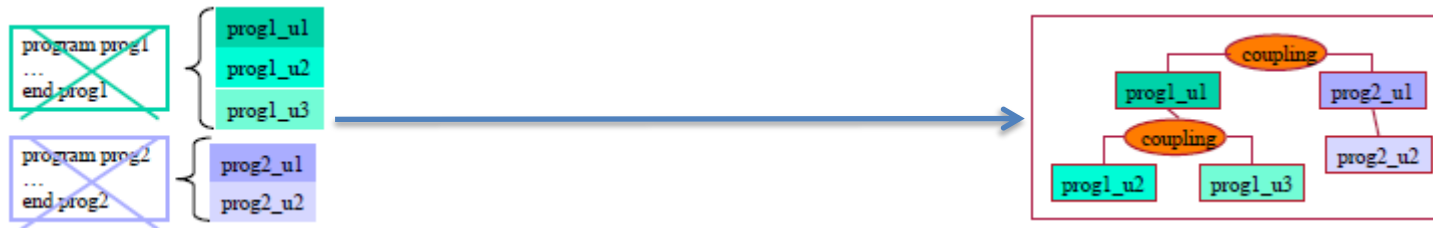




# Duas principais abordagens técnicas para o acoplamento

## Abordagem **integrada** do framework de acoplamento

- Dividir o código em unidades elementares, pelo menos, "init/run/finalize"
- Escreva ou use unidades de acoplamento
- Adapte a estrutura de dados e a interface de chamada.
- Use o framework (para construir) um **código hierárquico e mesclado**



- 😊 **eficiente.**
- 😊 **componentes sequenciais e concorrentes.**
- 😊 **uso de utilitários genéricos (paralelização, regridding, gerenciamento de tempo, etc.)**

- 😞 **códigos existentes.**
- 😞 **fácil)**

ESMF

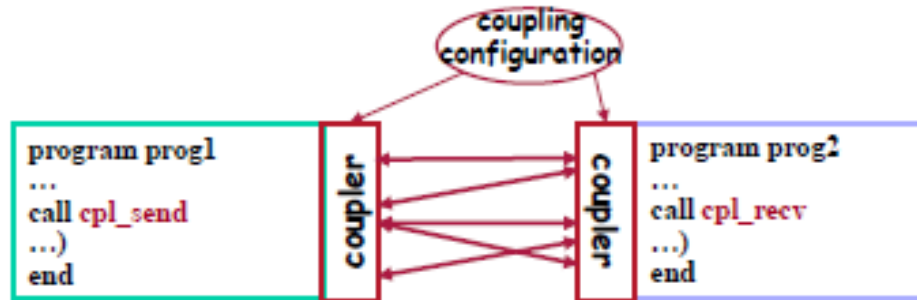
FMS  
(GFDL)

CESM  
(NCAR)

➤ **provavelmente a melhor solução em um ambiente de desenvolvimento controlado**



## 2. **Acopladores** ou Abordagem de **biblioteca de acoplamentos**



- 😊 **códigos existentes.**
- 😊 **uso de transformações genéricas/regridding.**
- 😊 **acoplamento concorrente (paralelismo)**

- 😞 **Componentes sequenciais: desperdício de recursos?**
- 😞 **multi-executável: mais difícil de debugar, mais difícil de gerenciar para o sistema operacional.**
- 😐 **eficiente**



➤ **provavelmente a melhor solução para acoplar códigos desenvolvidos independentemente**



# Software de Acoplamento

---

## Forma de Paralelismo

### MPI-2 Spawn Functions

- **MPI\_COMM\_SPAWN**

- Starts a set of new processes with the same command line
- **S**ingle **P**rocess **M**ultiple **D**ata

- **MPI\_COMM\_SPAWN\_MULTIPLE**

- Starts a set of new processes with potentially different command lines
- Different executables and / or different arguments
- **M**ultiple **P**rocesses **M**ultiple **D**ata



# Software de Acoplamento

---

## Forma de Paralelismo

### Lancement

Single Process Multiple Data (SPMD) Model:

```
mpiexec [ options ] <program> [ <args> ]
```

Multiple Programme Multiple Data (MPMD) Model:

```
mpiexec [ global_options ] [ local_options1 ] <program1> [ <args1> ] :  
[ local_options2 ] <program2> [ <args2> ]
```

```
mpiexec -n 2 hello : -n 3 hello
```

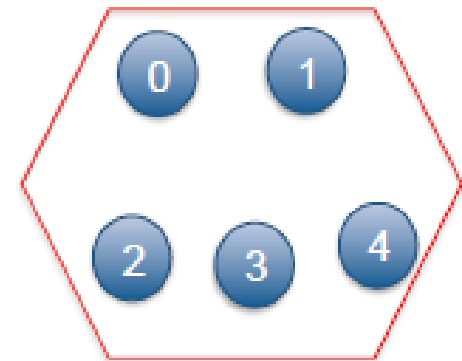
Hello world, je suis le processus 3 parmi 5.

Hello world, je suis le processus 4 parmi 5.

Hello world, je suis le processus 0 parmi 5.

Hello world, je suis le processus 1 parmi 5.

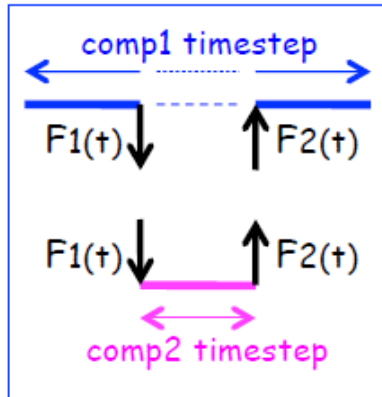
Hello world, je suis le processus 2 parmi 5.



MPI\_COMM\_WORLD

## Forma de Paralelismo

### Acoplamento Sequencial

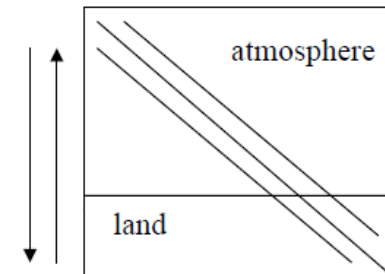


Resolução implícita equação de difusão de calor do topo da atmosfera à superfície do continente

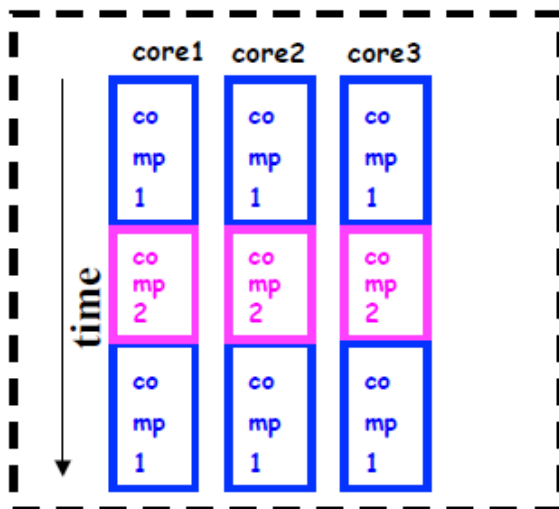
$$\frac{\partial T}{\partial t} = K \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

$$\frac{T_k^{n+1} - T_k^n}{\Delta t} = K \frac{T_{k+1}^{n+1} + T_{k-1}^{n+1} + 2T_k^{n+1}}{\Delta z^2}$$

$$AT^{n+1} = T^n$$



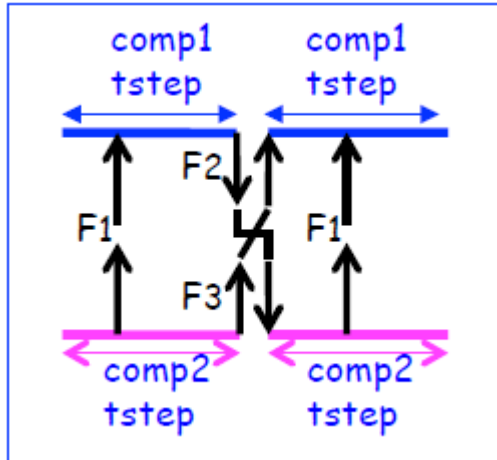
- Execução sequencial sobre o mesmo conjunto de cores e um executável



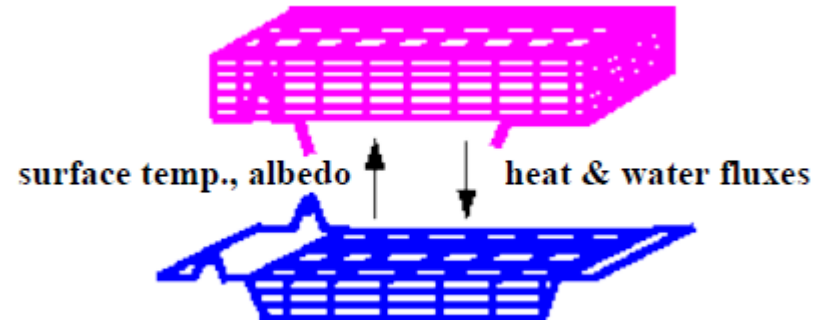
- 😊 Eficiente acoplamento de trocas através da memória
- 😊 Ótimo para balanceamento de carga se as componentes podem rodar eficientemente em um mesmo numero de cores.
- 😞 Possível conflito quando as componentes são sobrepostas em um mesmo executável (I/O, units, comm internos, etc).
- 😞 Não é flexível no acoplamento de algoritmos

## Forma de Paralelismo

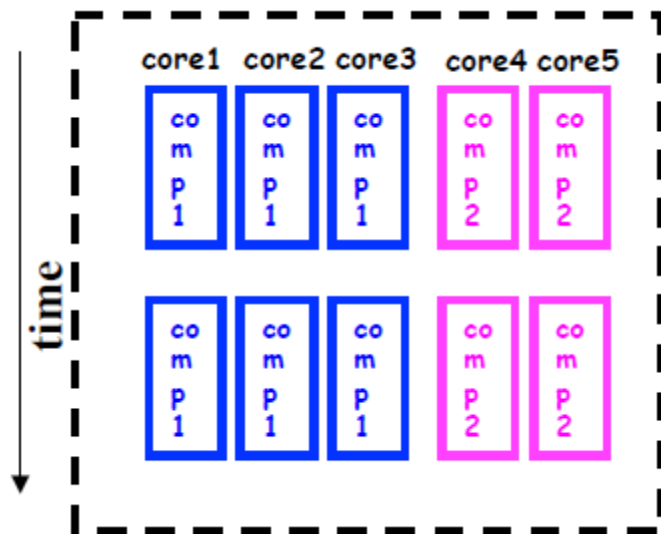
### Acoplamento Concorrente



### Acoplamento assíncrono tradicional oceano-atmosfera



- Execução concorrente sobre o diferentes conjunto de cores e um executáveis

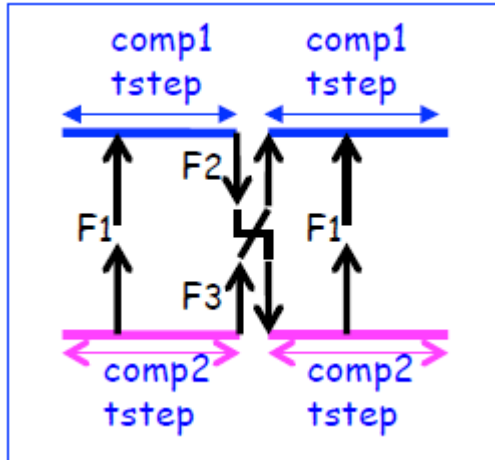


- 😊 Algoritmo de acoplamento flexível (trocas em timestep)
- 😞 Possíveis conflitos. Pois as componentes são mesclados em um executável (E / S, unidades, comunicação interna etc.)..
- 😞 Balanceamento de carga mais difícil.
- 😞 Trocas de acoplamento menos eficientes , pois os componentes podem estar em nós diferentes (sem memória compartilhada)

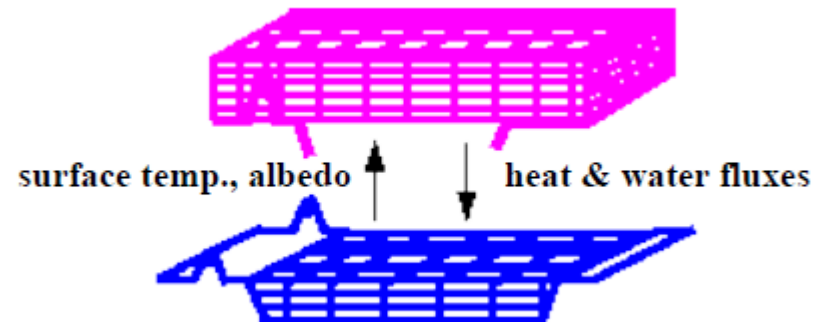


## Forma de Paralelismo

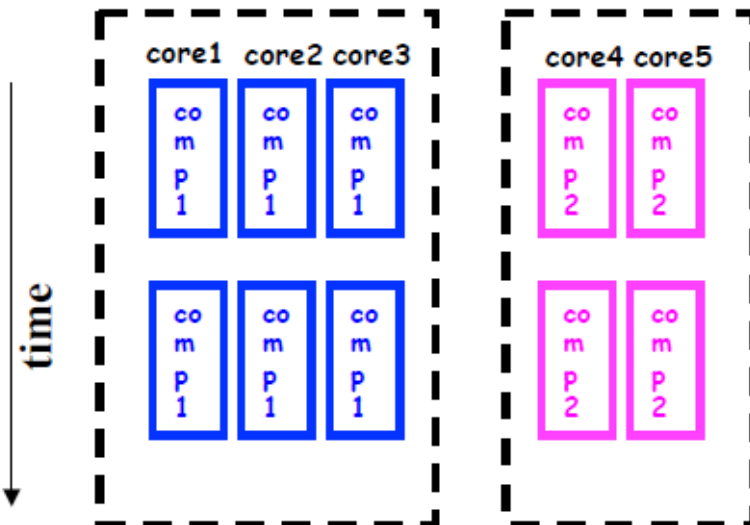
### Acoplamento Concorrente



### Acoplamento assíncrono tradicional oceano-atmosfera



- **Execução concorrente sobre o diferentes conjunto de cores e distintos e separados executáveis**



- 😊 **Algoritmo de acoplamento flexível (trocas em timestep)**
- 😊 **Não há conflitos com componentes que permanecem como executáveis separados (E/S, unidades, comunicação interna, etc.).**
- 😊 **Uso otimizado de memória**
- 😞 **Balanceamento de carga mais difícil.**
- 😞 **Trocas de acoplamento menos eficientes, pois os componentes podem estar em nós diferentes (sem memória compartilhada)**



### Earth System Modeling Framework



**Software de código aberto para a construção de aplicativos Tempo e climáticos com base em componentes desenvolvidos em diferentes centros de modelagem.**

- **Multi-agência Governamental (NSF, NASA, DoD, NOAA) com muitos parceiros.**
- **Principalmente escrito em C ++, com interfaces F90 e Python.**
- **Execute em mais de 24 plataformas usando um conjunto de mais de 4000 testes.**
- **13 sistemas de modelagem diferentes, ~ 80 componentes diferentes.**



### Design baseado em componentes:



Goddard Space Flight Center GEOS-5 model

**Componente = interface de chamada bem definida + função coerente**

- **Componentes em grade: código científico.**

- **Componentes do acoplador:**

**transformação/transferência de dados.**

- **user constrói um modelo como hierarquia de componentes**
- **pode ser executado sequencialmente, simultaneamente, no modo misto**
- **único executável.**



## Earth System Modeling Framework



### ESMF "Infraestrutura":

- gerenciamento de calendário; registro de mensagens, registro de dados e comunicação
- Geração de peso regrid: métodos, bilineares, patch ou de primeira ordem conservativo até 3D (pode ser usado off-line)

**ESMF "Superstructure":** ferramentas de acoplamento e invólucros de componentes com interfaces padrão

1. componentes de grade Definido: separa o código em métodos init, run e finalize.
2. Encapsule estruturas de dados nativas na estrutura de dados do ESMF.
3. Escreve os componentes do acoplador.
4. Registra os métodos init, run e finalize no comp. do ESMF (no aplicativo do driver).
5. Programa componentes e troca dados.
6. Executa o aplicativo.

```
subroutine myOceanRun (.. , impState, expState, clock, ...)  
  type(ESMF_State) :: impState
```

```
subroutine oceanToAtmCpl (.. )  
  call ESMF_FieldRedist(oceanField, atmField, ...)
```

```
...  
call ESMF_GridCompSetEntryPoint (oceanComp,  
  ESMF_SETRUN, myOceanRun, ...)  
...  
call ESMF_GridCompRun(oceanComp, ...)  
call ESMF_CplCompRun (oceanToAtmCpl, ...)  
call ESMF_GridCompRun(atmComp, ...)
```



## Coupling framework integrated approach – CPL7

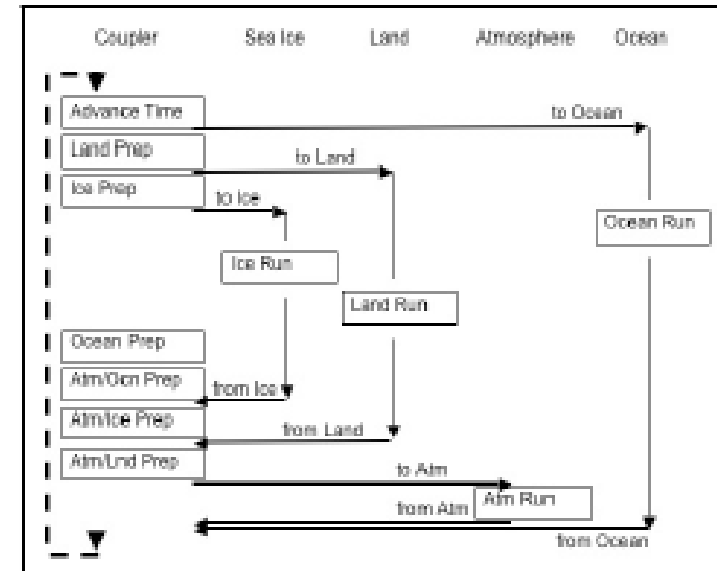
### Cpl7 para CCSM4 e CESM1



Software com uma Camada de nível superior (**driver**), que chama uma componente do acoplador e códigos de atmosfera, oceano, superfície e gelo do mar em **sequência** ou em **paralelo**.

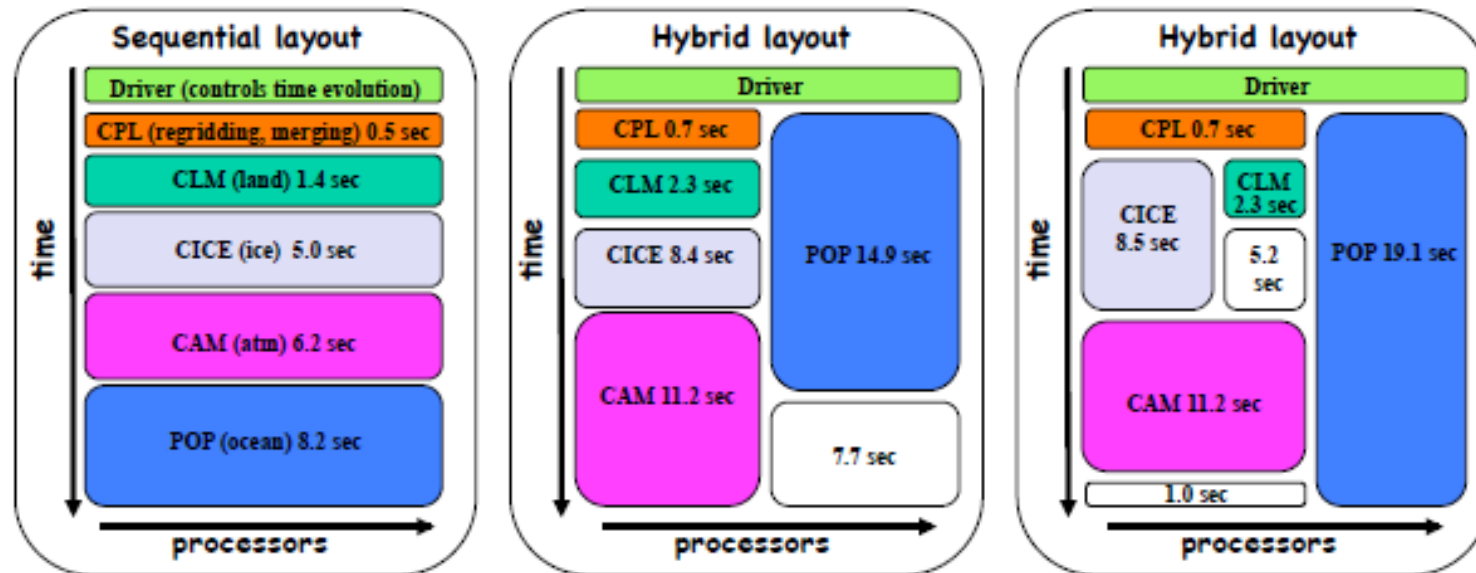
- Desenvolvido pelo **NCAR** Earth System Laboratory,
- De **múltiplos executáveis** simultâneos (**cpl6**) a um executável: fluxo de tempo mais fácil de entender, mais fácil de depurar.
- Capacidade de **adicionar novos componentes**, novos campos de acoplamento.
- **Compatibilidade** de interface para componentes compilados com **ESMF**.
- Portado para IBM p6, Cray XT4/XT5, BGP, Clusters Linux, SGI.

Driver Loop Sequencing



## Coupling framework integrated approach – CPL7

- Variando os níveis de paralelismo via configuração externa (metadados) para o layout proc:



- Escala avaliada em até 10 000 processadores:
  - kernels intensivos no flop: linear.
  - operações com uso intensivo de memória: linear em baixas contagens de proc, plana em altas contagens de proc.
  - kernels dominados por comunicações: sub-lineares em baixas contagens de proc; decai para + 1000 procs.



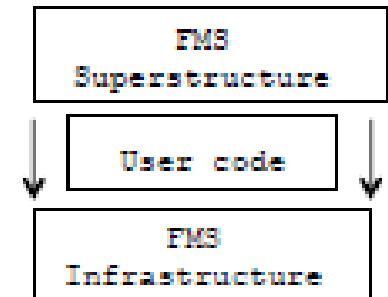


### The Flexible Modeling System (FMS)



Software para **montar um modelo climático com “slots” de domínio específicos** para a atmosfera, oceano, superfície oceânica, incluindo gelo marinho e superfície terrestre

- Ativo há mais de uma década na GFDL; desenvolvido em F90
- FMS mostrado **escalável** até O (10000) pes



- **FMS “Infraestrutura”:** I/O, exceto :manuseio, operações em campos de grade distribuída (expressas independentemente da plataforma subjacente)
- **FMS “Superestrutura”:**
  - Camada de acoplamento específica do domínio (“stubs” (nenhum componente) ou “dados” também são possíveis).
  - Componentes “envolvidos” em estruturas de dados e chamadas de procedimento específicas do FMS.
  - Único executável, com execução serial ou concorrente de componentes.
  - Regradeamento, redistribuição ou troca direta (hard-coded) entre componentes.

## The Flexible Modeling System (FMS)

Coupling framework integrated approach - FMS

FMS "Superstructure" obeys specific geophysical constraints

- Interface fluxes must be globally conserved
  - atmosphere water-land fractions adjusted to fit ocean sea-land mask
  - quantities are transferred from the parent grids to the *exchange grid*, where fluxes are computed; they are then averaged on the receiving grid



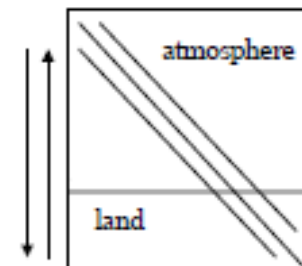
- Exchanges consistent with physical processes occurring near the surface

- Implicit calculation of vertical diffusive fluxes over the whole column
- Up-down sweep for tridiagonal matrix resolution through the exchange grid

$$\frac{\partial T}{\partial t} = K \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

$$\frac{T_k^{n+1} - T_k^n}{\Delta t} = K \frac{T_{k+1}^{n+1} + T_{k-1}^{n+1} + 2T_k^{n+1}}{\Delta z^2}$$

$$AT^{n+1} = T^n$$





- **ESMF:** (<https://www.earthsystemcog.org/projects/esmf/>) High-performance, flexible software for building climate and weather applications; US multi-agency governance (NSF, NASA, DoD, NOAA).
- **OpenPALM** ([http://www.cerfacs.fr/globc/PALM\\_WEB/](http://www.cerfacs.fr/globc/PALM_WEB/)) Dynamic coupler developed by Cerfacs and ONERA (France) originally for data assimilation suites
- **MCT** (<https://www.earthsystemcog.org/projects/mct/>) Set of open-source software tools for creating coupled models
- **YAC** ( <https://doc.redmine.dkrz.de/YAC/html/> ) Light weight coupling software infrastructure developed at DKRZ (Germany)
- **OESIS-PRIMS**(SPMD) e **OASIS3-MCT** (<https://portal.enes.org/oasis>) Legacy coupler developed at Cerfacs (France) and used by many climate modelling groups in Europe
- **CPL**(SPMD)
- **FMS** (SPMD)

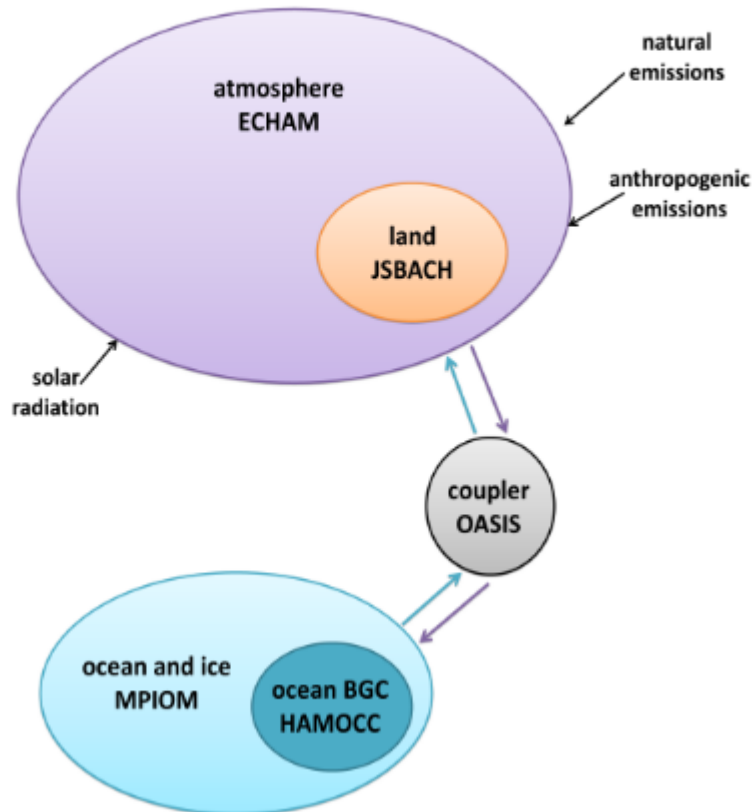


# Software de Acoplamento

## Diversidade de arquiteturas de acoplamento

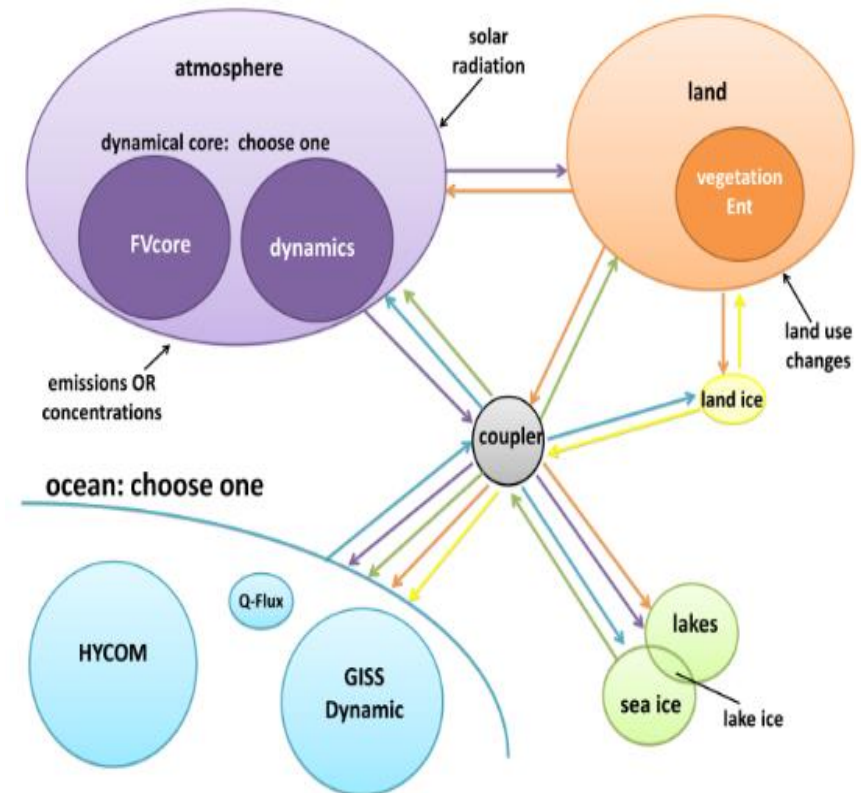
### COSMOS 1.2.1

Max-Planck-Institut für Meteorologie, Germany



### Model E October 11, 2011 revision

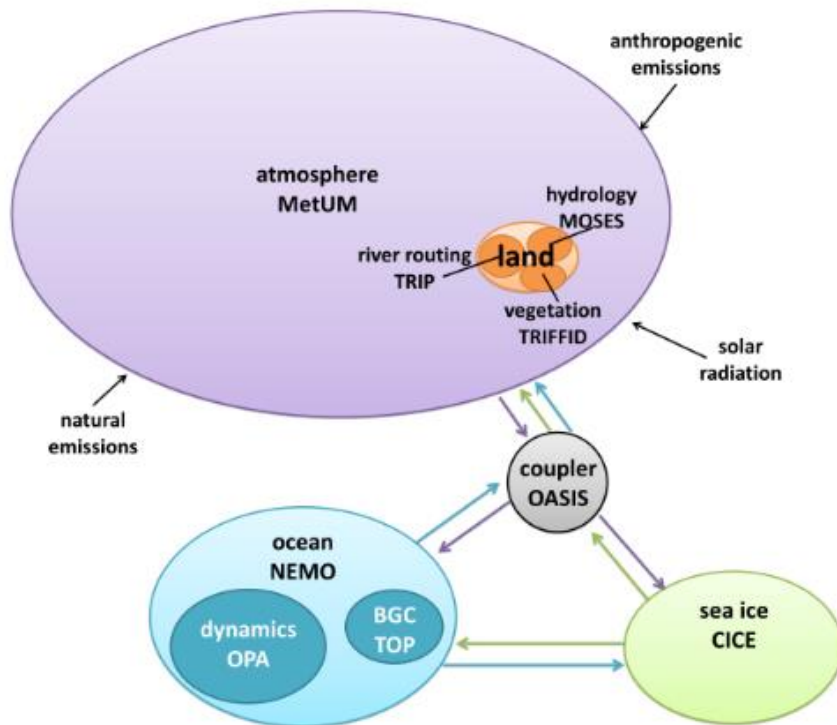
NASA Goddard Institute for Space Studies, USA



## Diversidade de arquiteturas de acoplamento

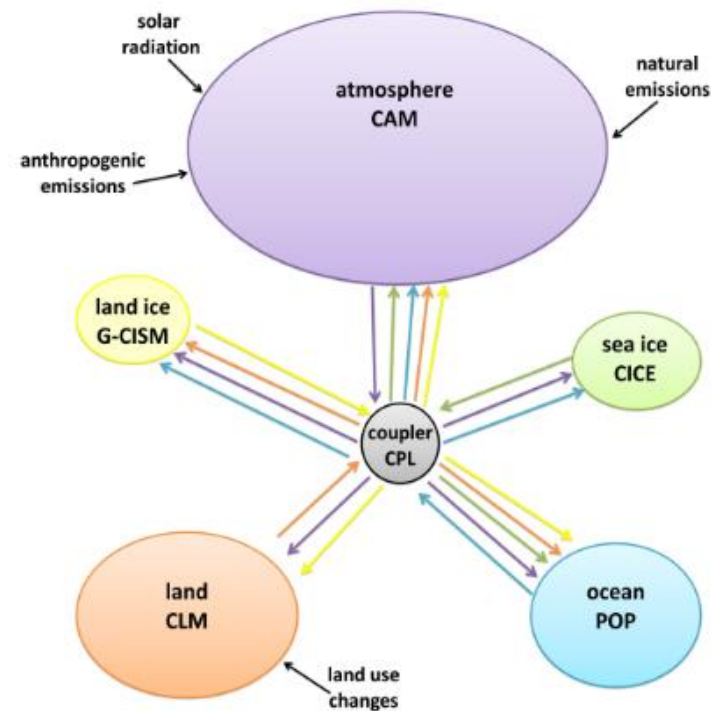
### HadGEM3

Met Office, UK



### CESM 1.0.3

National Center for Atmospheric Research, USA

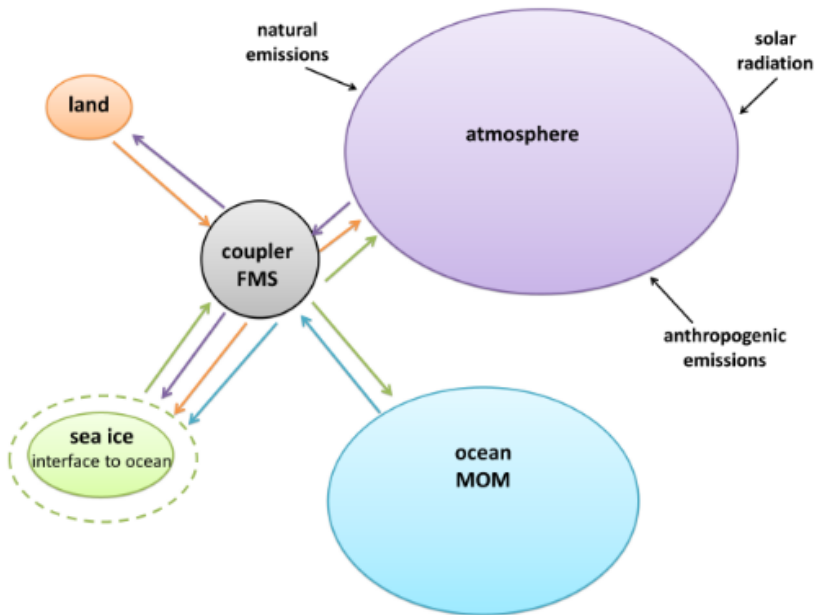




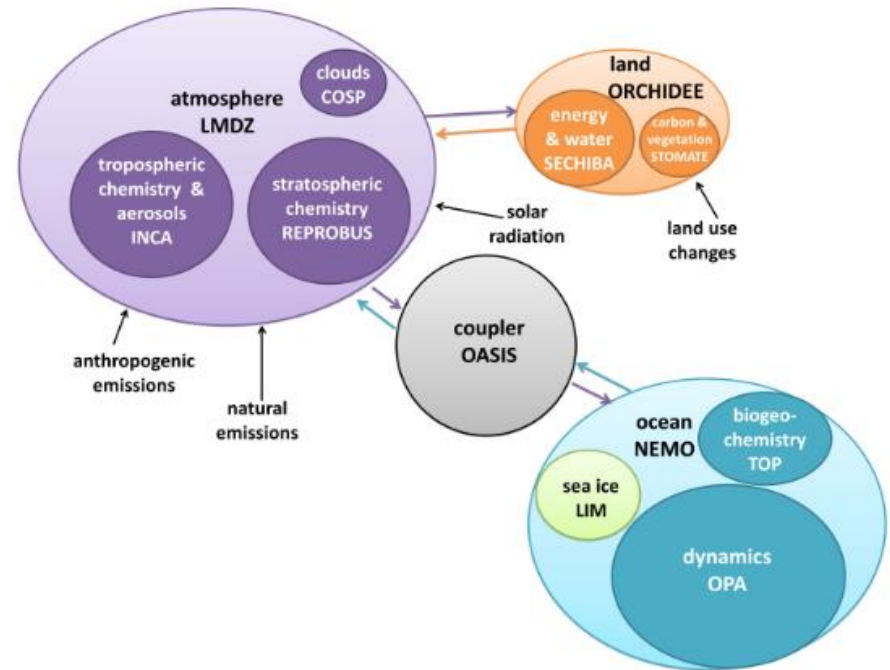
# Software de Acoplamento

## Diversidade de arquiteturas de acoplamento

**GFDL** Climate Model 2.1 (coupled to MOM 4.1)  
Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA



**IPSL** Climate Model 5A  
Institut Pierre Simon Laplace, France



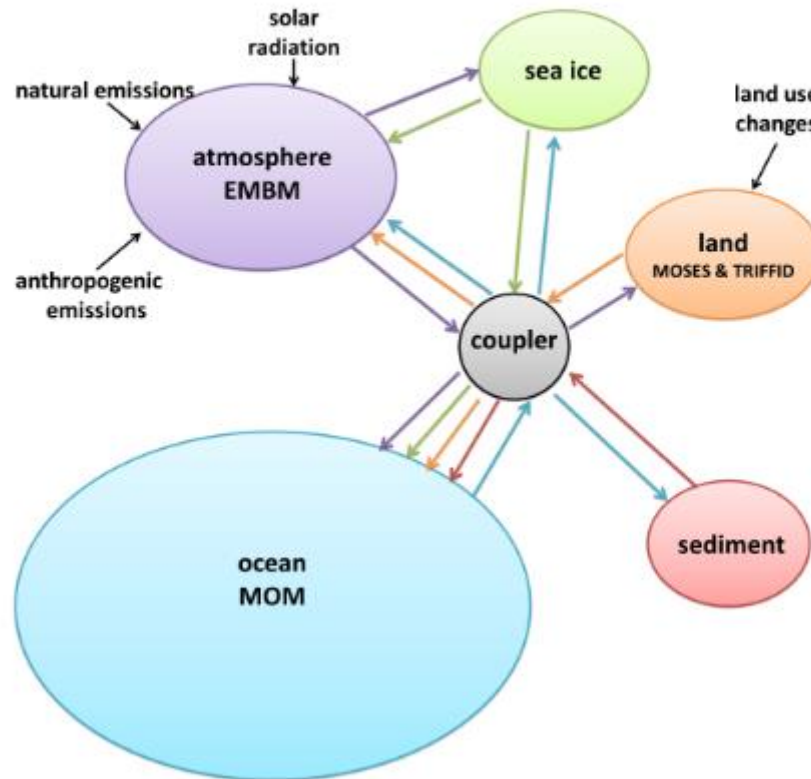




# Software de Acoplamento

## Diversidade de arquiteturas de acoplamento

**UVic** Earth System Climate Model 2.9  
University of Victoria, Canada





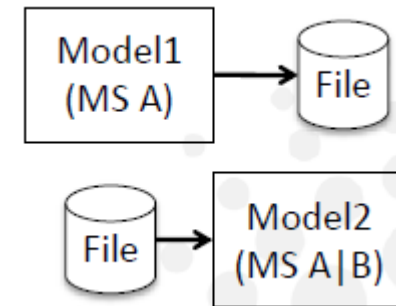
## **Diversidade de arquiteturas de acoplamento**



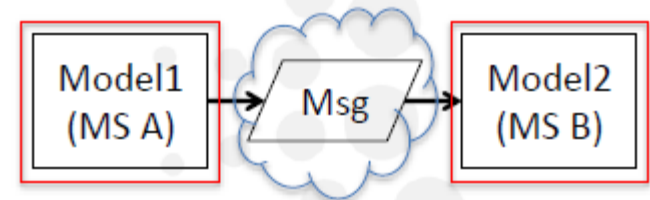
# Software de Acoplamento

## Diversidade de arquiteturas de acoplamento

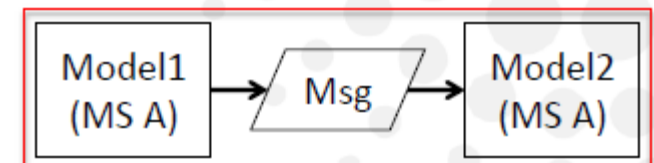
**Solta (por meio de arquivos, ordem sequencial para componentes)**



**Mais forte (através de mensagens através da **WAN**, componentes simultâneos distribuídos)**



**Apertado (através de mensagens [MPI] sobre **LAN** / IC local, componentes simultâneos paralelos)**

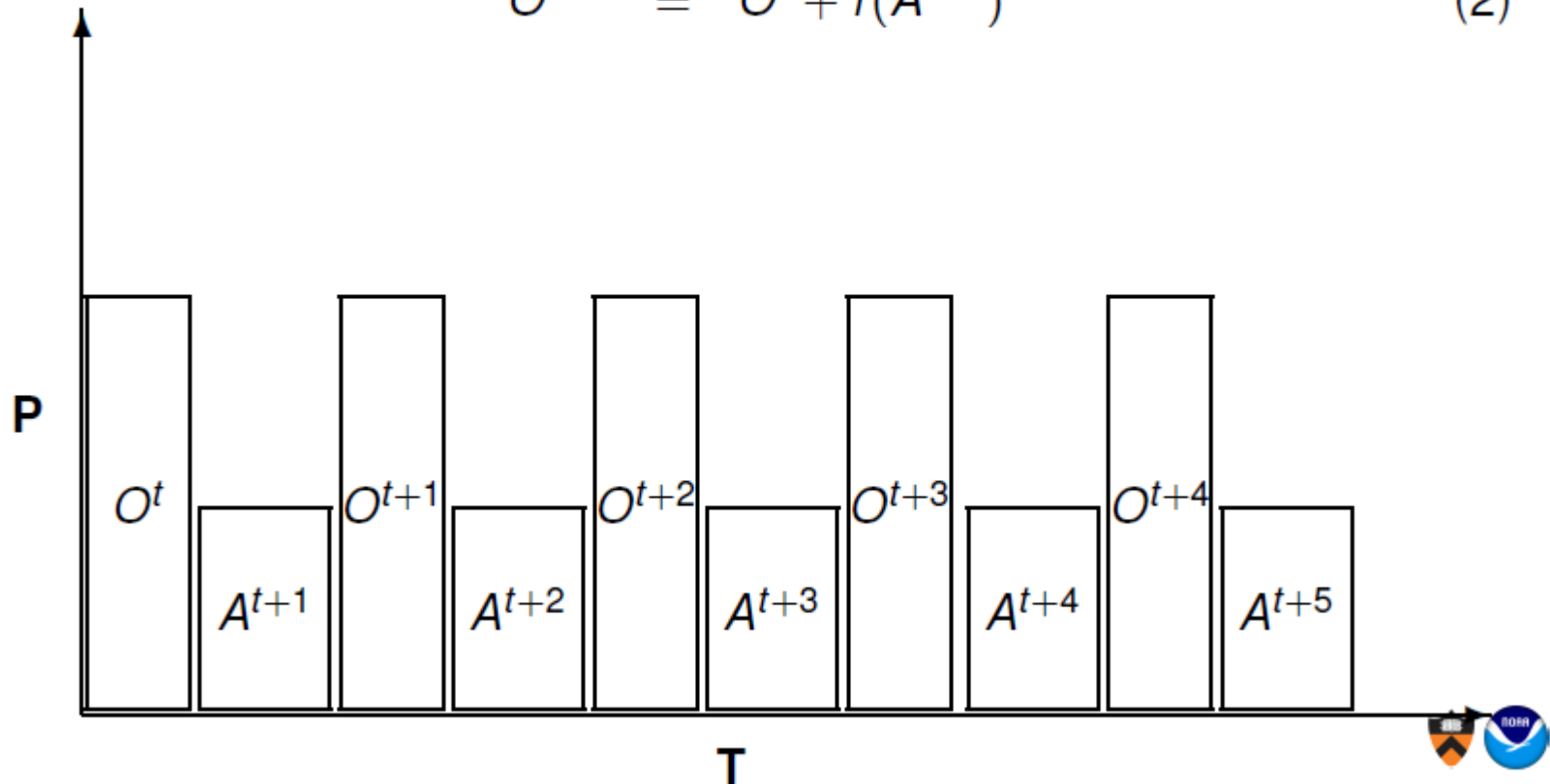


## Acoplamento serial

Usa um timestep de forward-backward para o acoplamento.

$$A^{t+1} = A^t + f(O^t) \quad (1)$$

$$O^{t+1} = O^t + f(A^{t+1}) \quad (2)$$

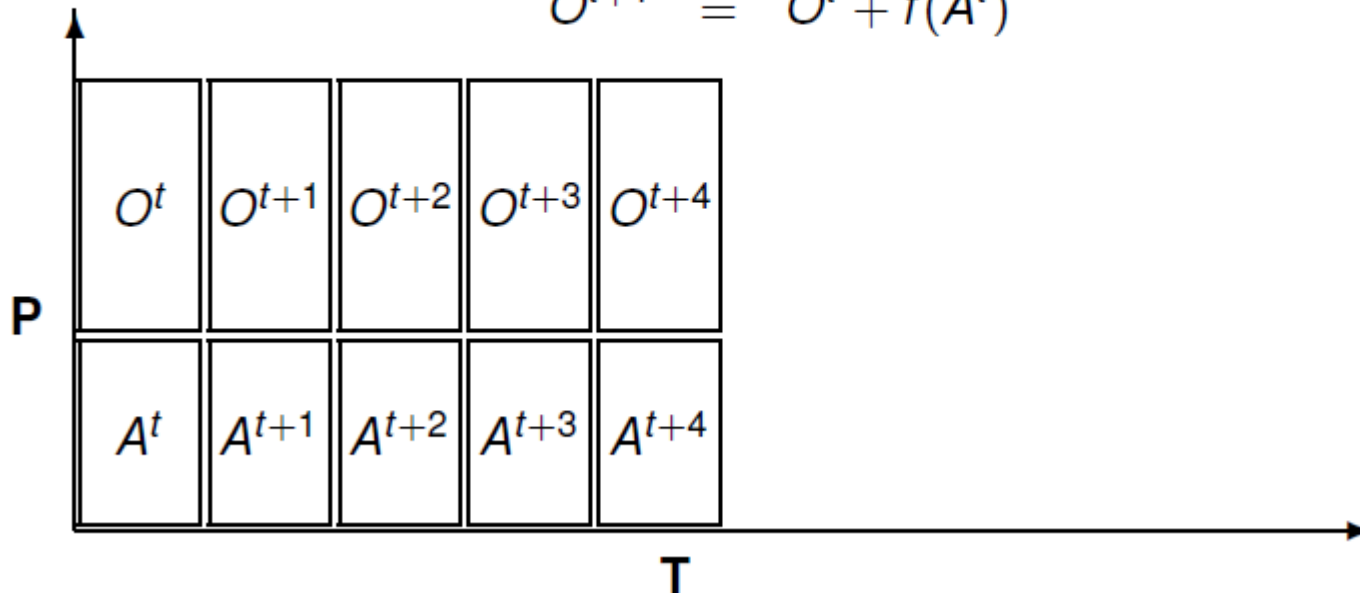


## Acoplamento concorrente

**Isso usa um timestep forward somente para o acoplamento. Embora formalmente isso seja incondicionalmente instável, o sistema é fortemente amortecido. As respostas variam em relação ao acoplamento serial, já que o oceano agora é forçado pelo estado atmosférico do timestep anterior.**

$$A^{t+1} = A^t + f(O^t) \quad (3)$$

$$O^{t+1} = O^t + f(A^t) \quad (4)$$





# Software de Acoplamento

## Acoplamento implícito e a grade de troca

**Fluxos na superfície geralmente precisam ser tratados usando um timestep implícito.**

**(por exemplo, fluxo de temperatura em camadas próximas da superfície que podem ter uma capacidade de calor extremamente pequena).**

$$\frac{\partial T}{\partial t} = K \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (5)$$

$$\frac{T_k^{n+1} - T_k^n}{\Delta t} = K \frac{T_{k+1}^{n+1} + T_{k-1}^{n+1} - 2T_k^{n+1}}{\Delta z^2} \quad (6)$$

$$\mathbf{AT}^{n+1} = \mathbf{T}^n \quad (7)$$





# Evolução da Modelagem do Sistema Terrestre

## Acoplamento implícito e a grade de troca

Resolve o sistema Tridiagonal na Eq. 7 para vários componentes e grades.

$$\mathbf{AT}^{n+1} = \mathbf{T}^n \quad (7)$$

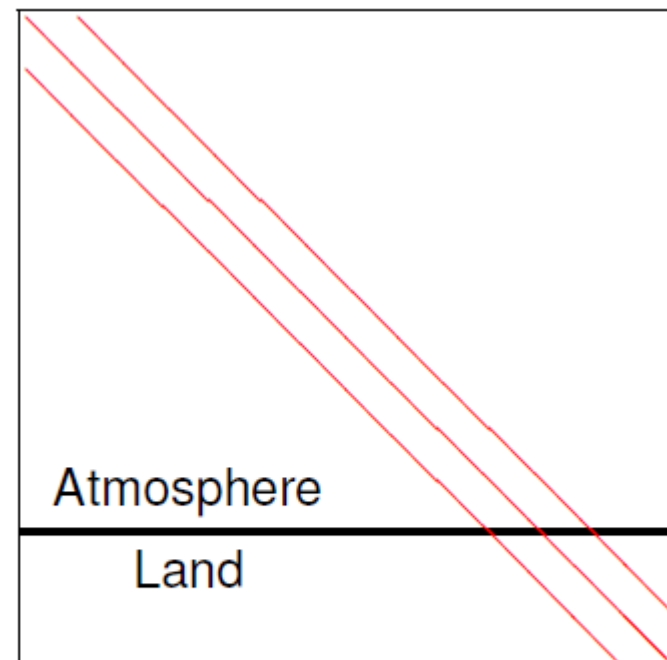
Atmosphere



Exchange



Land





# Software de Acoplamento

## Acoplamento implícito e a grade de troca

Arquitetura acoplada com **SBL** na troca de grade





# Software de Acoplamento

---

## Acoplamento implícito e a grade de troca

### Troca de Fluxo

Três tipos de troca de fluxo são permitidos: **REGRID**, **REDIST** e **DIRECT**.

**REGRID** grades distintas fisicamente, requer troca de grade.

**REDIST** grade global idêntica, decomposição de domínios diferentes.

**DIRECT** Grade e decomposição idêntica.

**REGRID**

atmos $\longleftrightarrow$ ice

atmos $\longleftrightarrow$ land

land $\longleftrightarrow$ ice

**REDIST**

ocean $\longleftrightarrow$ ice



# Software de Acoplamento

## Acoplamento implícito e a grade de troca

### Paralelismo no acoplador FMS



REGRID



REGRID with mask



REDIST

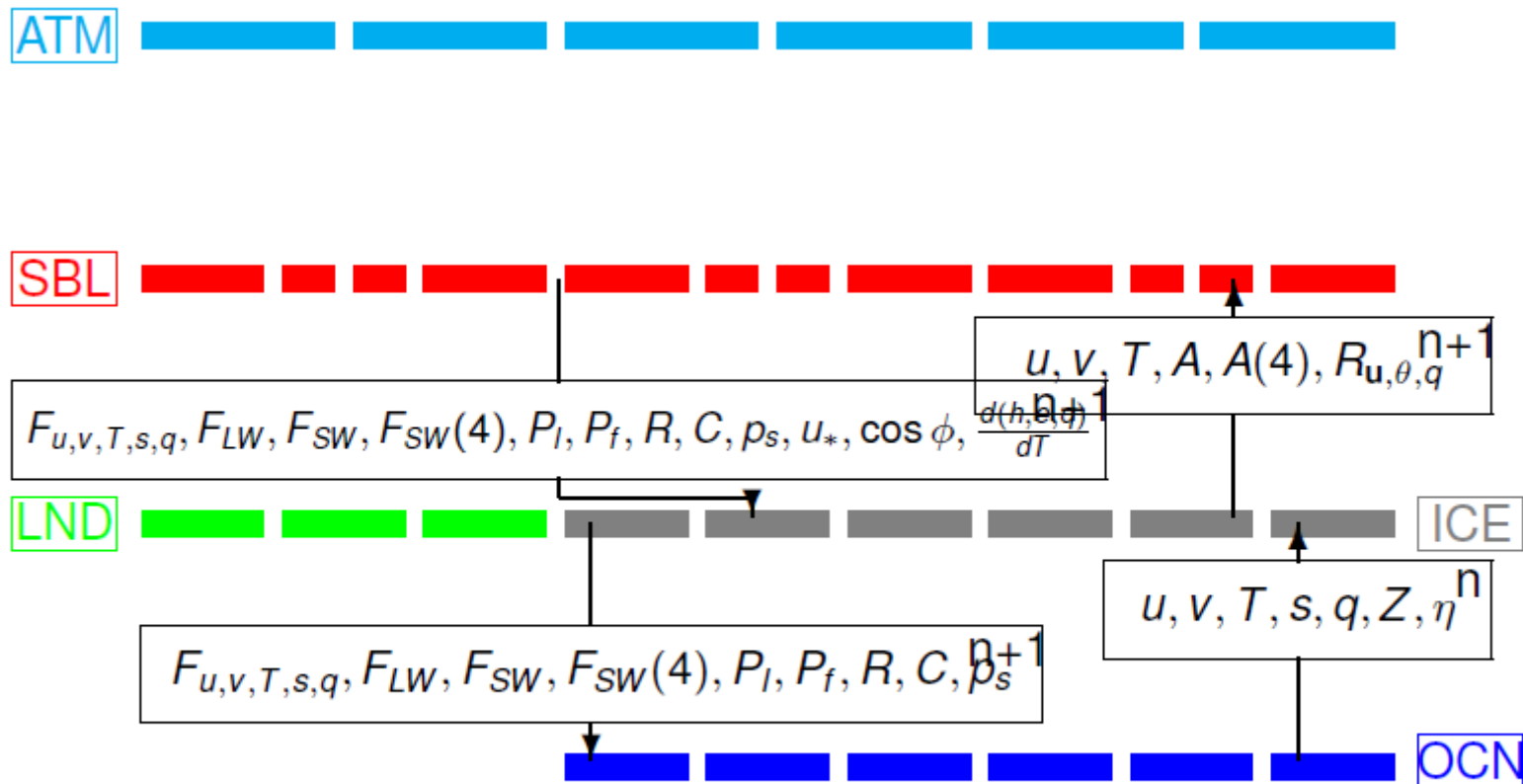




# Software de Acoplamento

## Paralelismo no acoplador FMS

### Arquitetura de Acoplamento FMS : ice-ocean coupling





# Software de Acoplamento

---

## Grade de troca: recursos

**Cada célula na troca de grade “**pertence**” a uma célula em cada grade pai;**

**Interpolação conservativa** até segunda ordem; a **monotonicidade** pode ser imposta (necessária para quantidades positivas definidas).

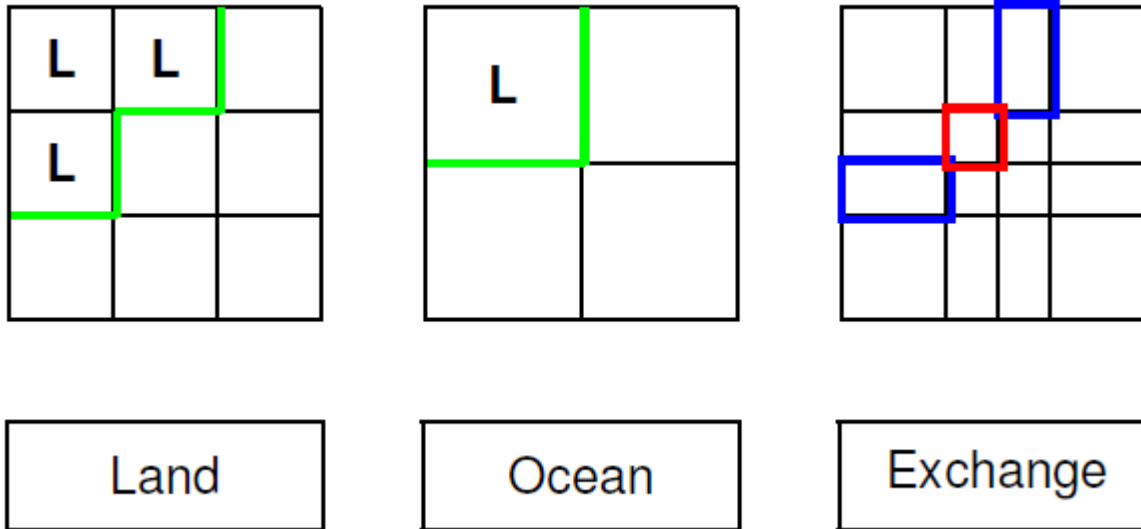
**Todas as chamadas de troca de dado local; o compartilhamento de dados entre processadores é interno ao software.**

**Grades fisicamente idênticas** (por exemplo, gelo oceânico e oceano) trocam dados **sem interpolação**.

**A Troca de grade é computada e armazenada offline seguindo um gridspec netCDF “padrão”.**



## O problema da Mascara



**Um problema surge quando as grades de dois componentes independentes (por exemplo, land e sea) compartilham um contorno. O contorno é definido por uma máscara (por exemplo, máscara land-sea), mas a máscara é discretizada de forma independente as duas grades. No entanto, a troca das células de grade precisam ser atribuídas exclusivamente a um único componente. Isso significa que algumas células são cortadas em uma ou outra grade. No FMS, por convenção, escolhemos cortar a grade terrestre.**



# **Benchmark da Tecnologia de Acoplamento**



# O objetivo do benchmark da tecnologia de acoplamento

---

*Definir uma suite de banchmarks de acopladores baseado nas componentes simplificadas, que capturam a essência de acoplamento no modelos do Sistema Terrestre sem a complexidade da ciência*

1. Captura funcional e performance **características** dos acoplamento do sistema Terrestre.
2. Codigo um conjunto de **componentes simplificadas** reproduzindo estas características de acoplamento.
3. Implementação do **acoplamento** com **diferentes** tecnologias de **acopladores**
4. **Rodar** o suite de **benchmark** sobre plataformas especifica
5. Analisar o resultado e apresentar para a comunidade



# **O objetivo do benchmark da tecnologia de acoplamento**

---

## **Características de acoplamento prioritário ao benchmark**

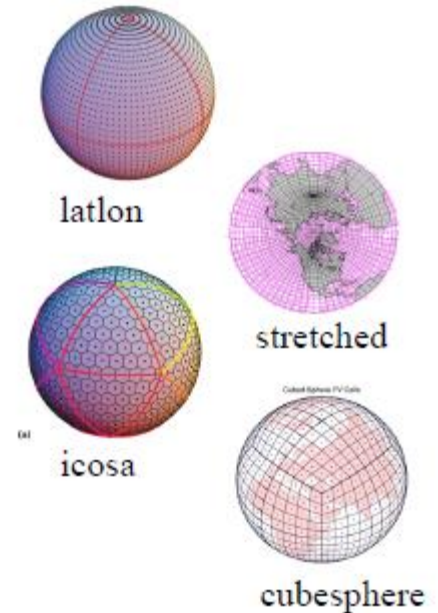
- o Tipo da grade do componente**
- o Número de núcleos por componente**
- o Números de campos trocados**
- o Frequência de troca**
- o Tamanho dos campos de acoplamento**
- o (Facilidade de uso: intrusão de código, tempo de desenvolvimento, técnicas para superar problemas específicos)**



# Componente Stand alone do **benchmark**

## 4 componentes autônomos (modelos) em 4 grades diferentes

- Sub-rotinas MPI Fortran não é usada para modelagem , física ou dinâmica mas para implementar características reais de acoplamento .
- Potenciais campos de acoplamento como argumentos IN / OUT compartilhados, dados locais .
- Uso de grades numéricas específicas
  - latlon*: latitude-longitude, resolução arbitrária
  - o *stretched*: esticado, rotacionado, logicamente retangular, e.g. NEMO ocean ORCA grid
  - o *icosa*: quasi-uniform icosaédrica, e.g. DYNAMICO (LMD, Fr) or ICON (DWD, DKRZ, De)
  - o *cubesphere*: quasi-uniform





# Software de Acoplamento para o benchmark

## Coupled test case implementation

Set-up of coupled test-cases implementing ping-pong exchanges between two components running on regular lat-lon grids with:

- **OASIS3-MCT** (<https://portal.enes.org/oasis>)  
Legacy coupler developed at Cerfacs (France) and used by many climate modelling groups in Europe
- **ESMF**: (<https://www.earthsystemcog.org/projects/esmf/>)  
High-performance, flexible software for building climate and weather applications; US multi-agency governance (NSF, NASA, DoD, NOAA) with many partners
- **OpenPALM** ([http://www.cerfacs.fr/globc/PALM\\_WEB/](http://www.cerfacs.fr/globc/PALM_WEB/))  
Dynamic coupler developed by Cerfacs and ONERA (France) originally for data assimilation suites
- **MCT** (<https://www.earthsystemcog.org/projects/mct/>)  
Set of open-source software tools for creating coupled models
- **YAC** ( <https://doc.redmine.dkrz.de/YAC/html/> )  
Light weight coupling software infrastructure developed at DKRZ (Germany)

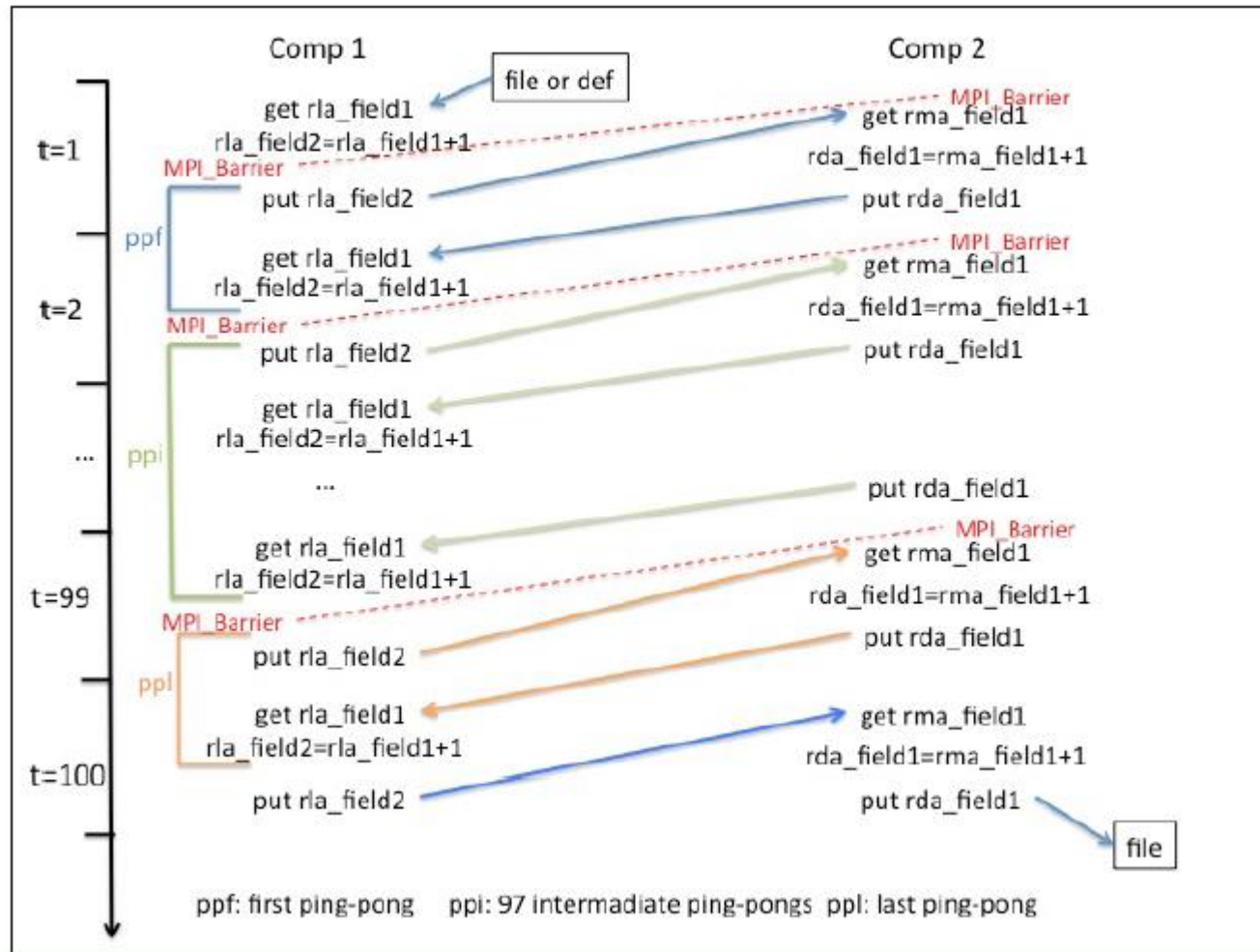




# Teste Case do benchmark

## Coupled test case implementation

Measure of the time for a ping-pong exchange (back-and-forth) between two components





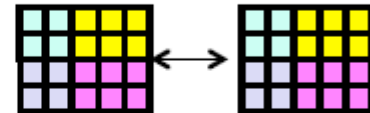


# Configuração do benchmark

First results of specific coupled cases on specific platforms

We tested the impact of

- The coupling technology: OASIS, ESMF, Open-PALM, MCT, YAC
- The platform: Bullx Occigen (Fr), MetOffice Cray (UK), Marconi Broadwell (It)
- The grid size : HR-HR, VHR-VHR, LR-HR  
with LR:100x100, HR:1000x1000, VHR: 3000x3000  
regular lat-lon grids with same decomposition on both sides
- The number of cores/component: from  $O(1)$  to  $O(10000)$



- Each run is repeated 3 times to analyse the spread of the results
- Allocation of 480 000 core-hours on Bullx Occigen at CINES
- Allocation of 19 000 core-hours on Marconi Broadwell at CINECA

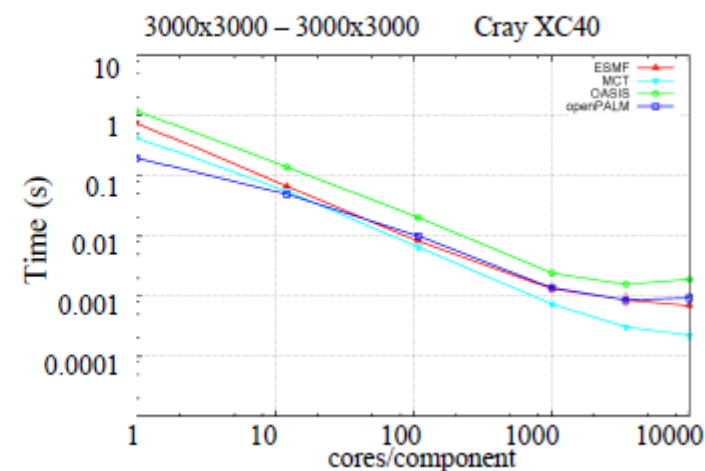
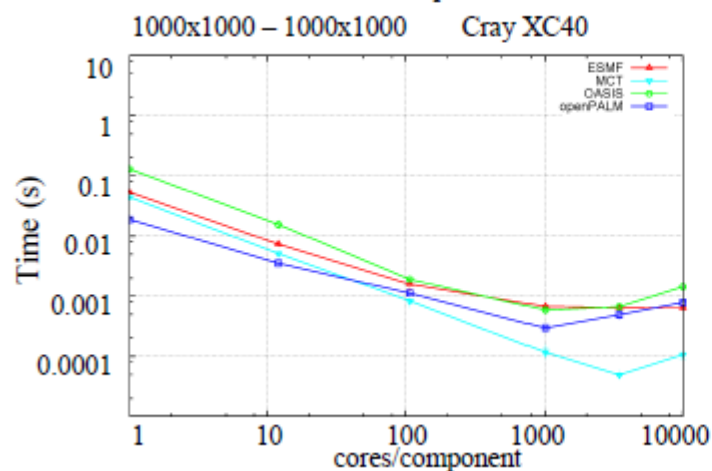
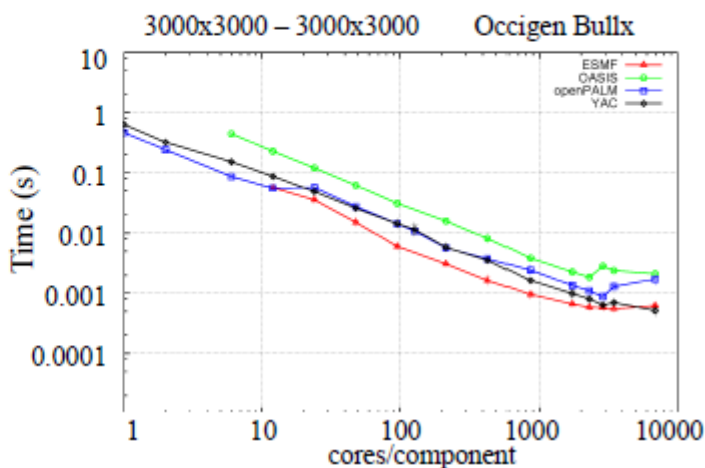
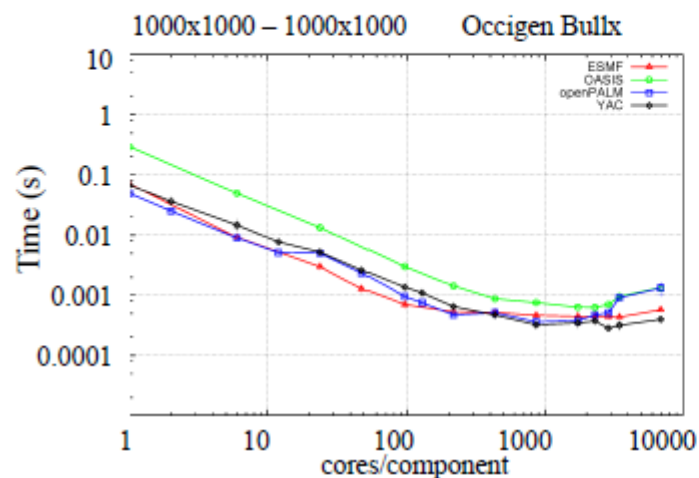


# Resultado do benchmark

First results of specific coupled cases on specific platforms

## Diferentes Plataformas

Average time for one ping-pong exchange between components on regular latlon grids with same decomposition on both sides, wrt number of cores/component:

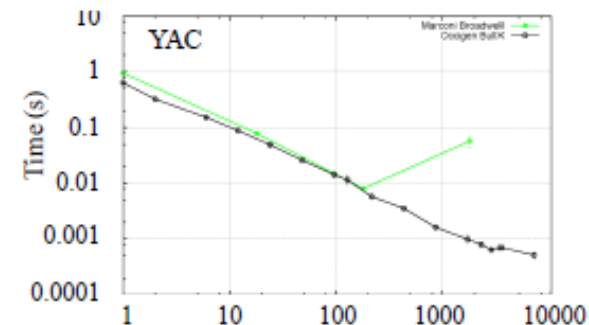
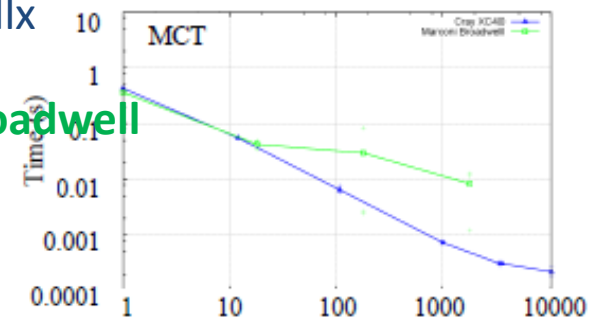
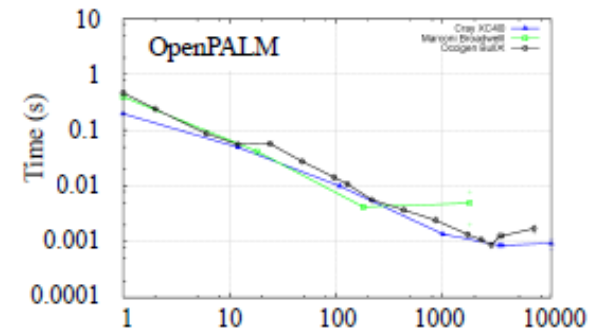
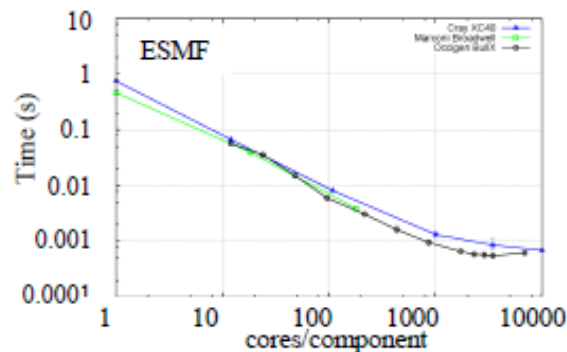
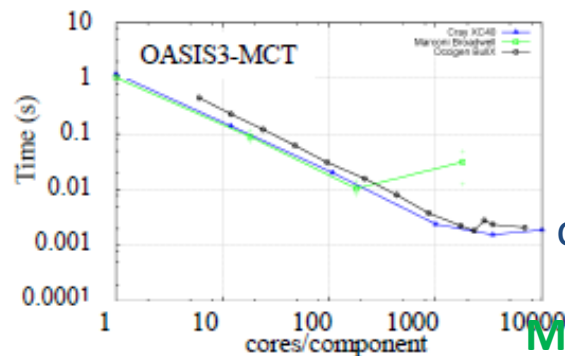




# Resultado do benchmark

First results of specific coupled cases on specific platforms

Average time for one ping-pong exchange between components on regular lat-lon VHR grids, with same decomposition on both sides, wrt number of cores/component, for each coupling technology for all 3 platforms



crayx40

ocigenBullx

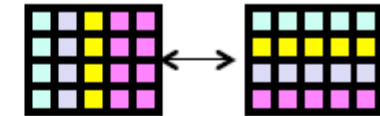
Marconi Broadwell

# Resultado do benchmark

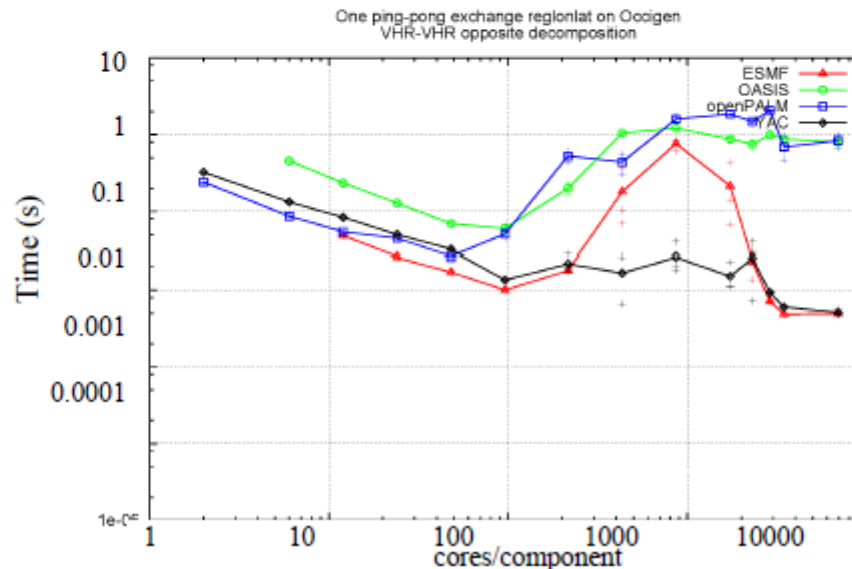
First results of specific coupled cases on specific platforms

Impact of opposite decompositions :

- The coupling technology: OASIS, ESMF, Open-PALM, YAC
- The platform: Bullx Occigen (Fr)
- The grid size : VHR-VHR (3000x3000 - 3000x3000)
- The number of cores/component: from O(1) to O(10000)



- Each run is repeated 3 times to analyse the spread of the results
- Minimal number of runs for this test case on Bullx:  $4 \times 1 \times 1 \times 5 \times 3 = 60$





# CONCLUSÕES

---

**As escolhas técnicas afetam o balanceamento de carga e o desempenho do sistema:**

- **Um** executável versus **muitos** executáveis.
- Execução **seqüencial** versus **concorrente** dos componentes.
- **Mesmo** ou **diferente** conjunto de núcleos (número de núcleos por componente?).

**Diferentes abordagens de acoplamento são usadas na modelagem climática:**

**Abordagem integrada: divide o código original em init /run/finalize.**

- use um método "padrão" para construir um sistema acoplado (por exemplo, **ESMF**).
- integrar em uma camada de (**drivers**) predefinida (por exemplo, **FMS**, **Cpl7**)  
(**mais eficiente em muitos casos, mas coloca mais restrições nas componentes**)

**Acoplador externo e / ou biblioteca de comunicação (por exemplo, OASIS):**

- solução mais fácil para acoplar códigos independentes, mas algumas desvantagens de desempenho



**FIM**  
**OBIGADO PELA ATENÇÃO**

## Climate Prediction Framework

