



# **Acoplamento dos Módulos do Sistema Terrestre**

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



# Sumário

- 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**

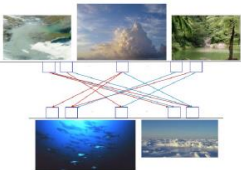


- 1. Software de Acoplamento**
  - a. Paralelismo de Memória Distribuída usado no MCGA-INPE (MPI)**
  - b. Eficiência Computacional.**

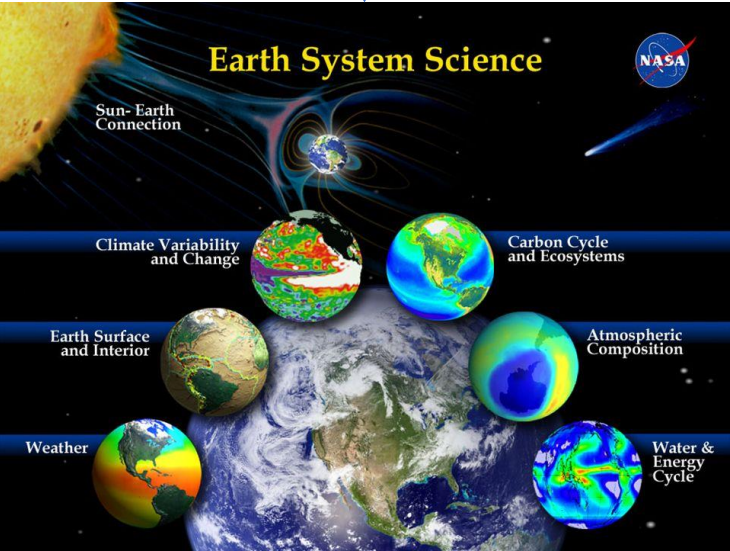
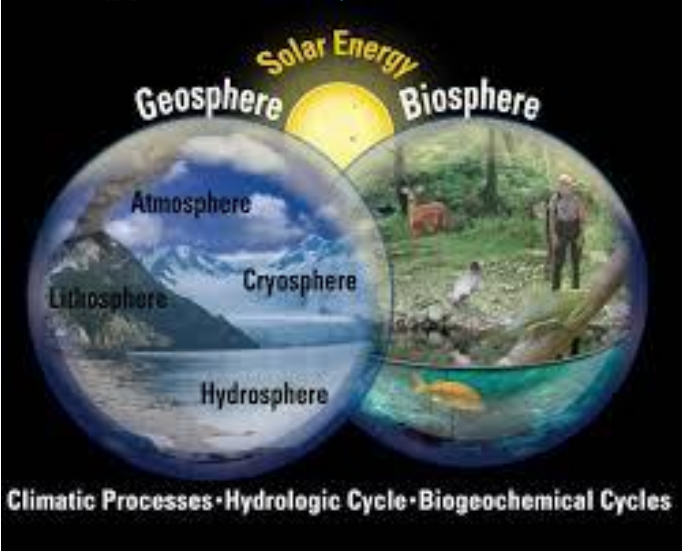
- 1. O Que é Melhor para o INPE.**
  - a. Desafios do INPE na Modelagem do Sistema Terrestre.**



# O que é um Sistema Terrestre?



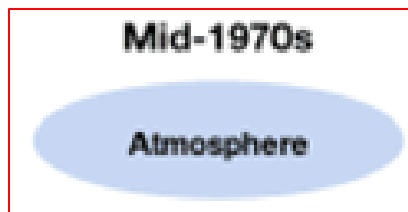
**Por que acoplar oceano e atmosfera + ...?**  
**R: Tratar o Sistema Terrestre globalmente**





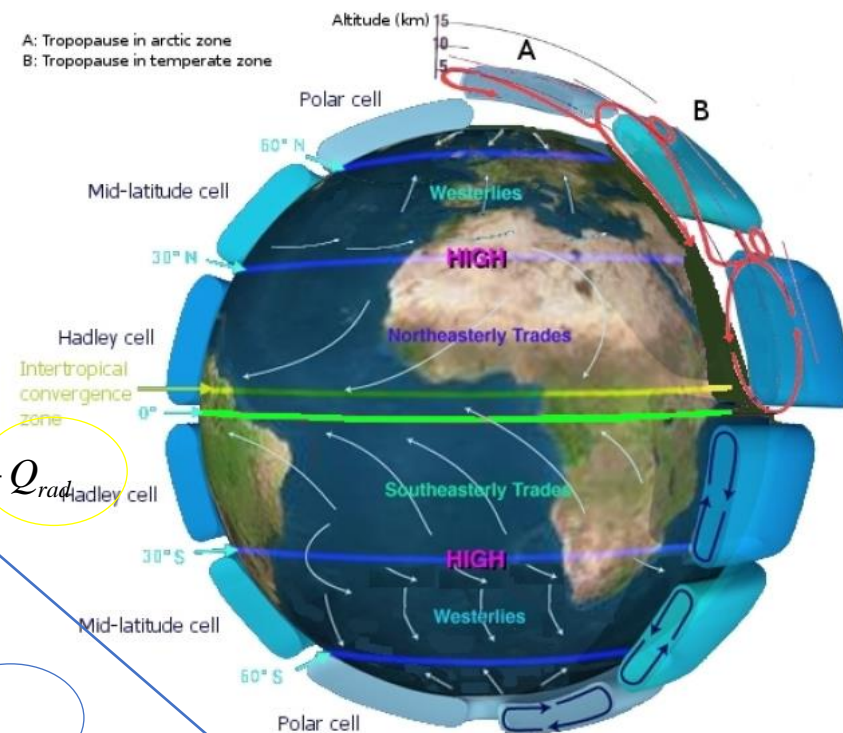
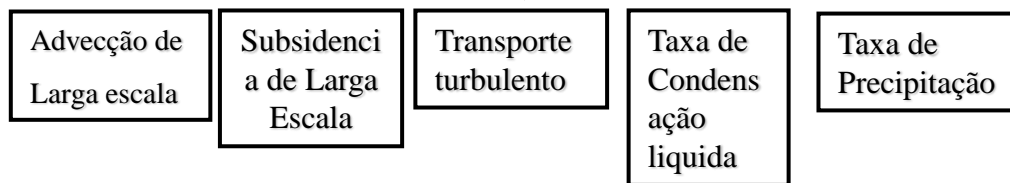
# Evolução da Modelagem do Sistema Terrestre

## Modelos de Circulação Geral da Atmosfera



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

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} &= -\bar{\mathbf{v}} \cdot \nabla \bar{\theta} - \bar{w} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{u}'_i \bar{\theta}') + \frac{L}{\pi c_p} (c - e) + Q_{rad} \\ \frac{\partial \bar{q}_v}{\partial t} &= -\bar{\mathbf{v}} \cdot \nabla \bar{q}_v - \bar{w} \frac{\partial \bar{q}_v}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{u}'_i \bar{q}'_v) - (c - e) \\ \frac{\partial \bar{q}_l}{\partial t} &= -\bar{\mathbf{v}} \cdot \nabla \bar{q}_l - \bar{w} \frac{\partial \bar{q}_l}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{u}'_i \bar{q}'_l) + (c - e) - P_r \end{aligned}$$



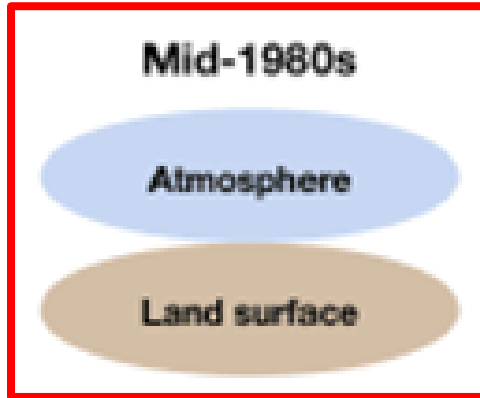
➤ Circulações impulsionadas por aquecimento desigual em uma esfera rotativa

Paulo Yoshio Kubota

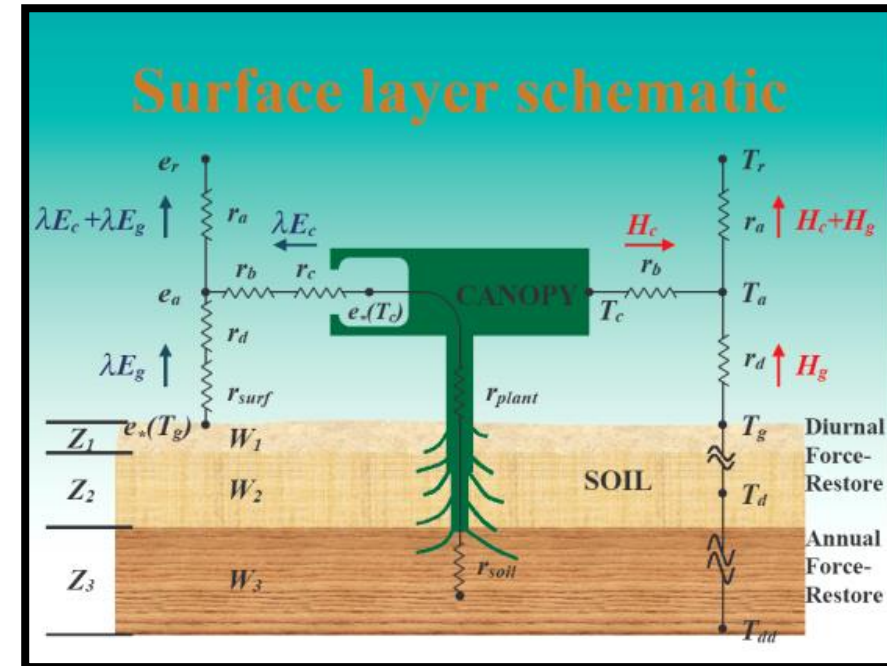


# Evolução da Modelagem do Sistema Terrestre

## Modelo de processos de superfície terrestre



SSiB



SSiB (Xue et al., 1991)

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

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

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

$$Q_s, T_s$$

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

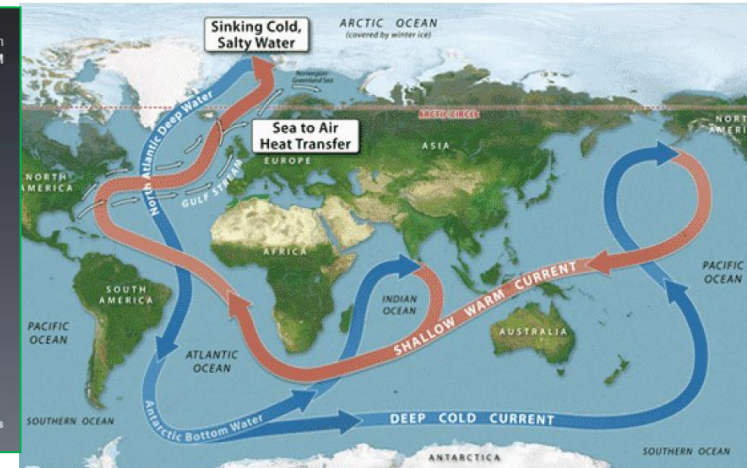
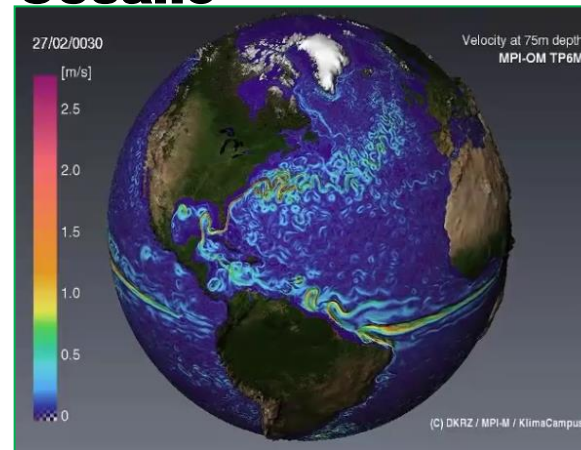
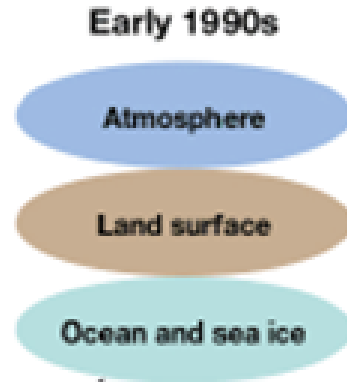
Simplified Simple Biosphere Model 2 – SSiB2 (Zhan et al., 2003) em desenvolvimento>>> future SSiB4





# Evolução da Modelagem do Sistema Terrestre

## Modelo de Circulação Geral do Oceano



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

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

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

$$Q_s, T_s$$

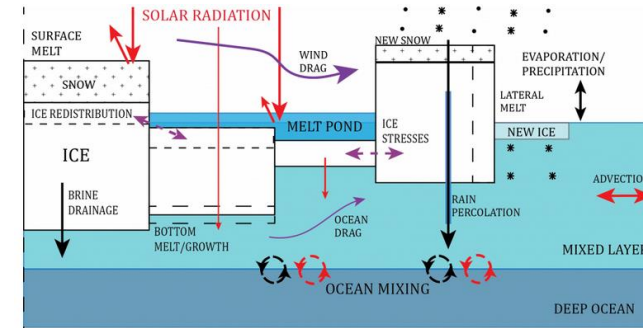


Figure 2: Some of the various physics now included in state-of-the-art sea ice models (e.g. CICE). Red arrows indicate heat fluxes, black arrows indicate salt/freshwater fluxes, and purple arrows indicate dynamic forces

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

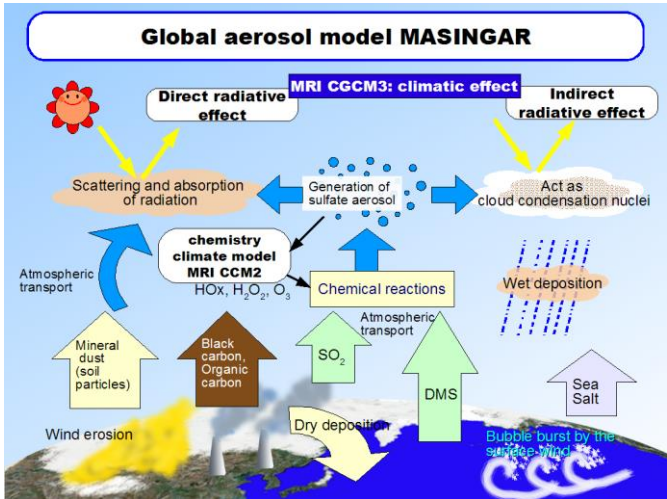
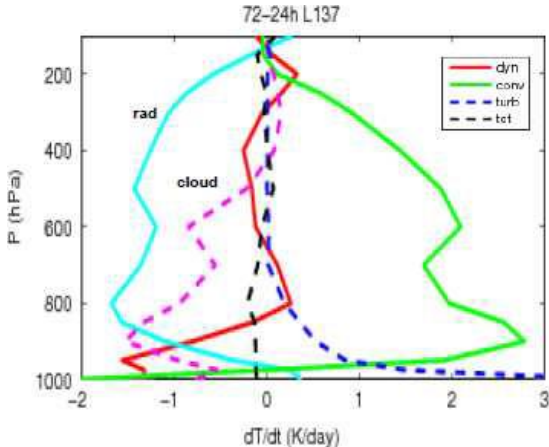
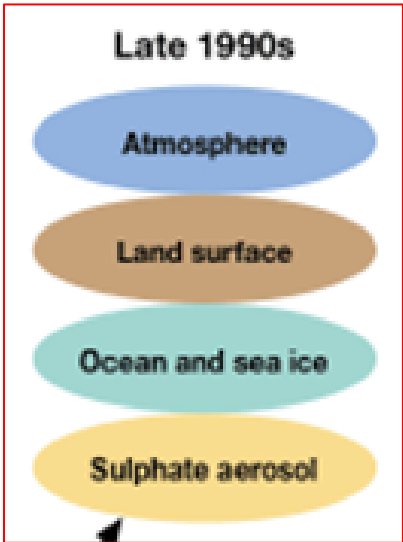
Circulações impulsionadas por aquecimento desigual em um esfera rotativa



# Evolução da Modelagem do Sistema Terrestre



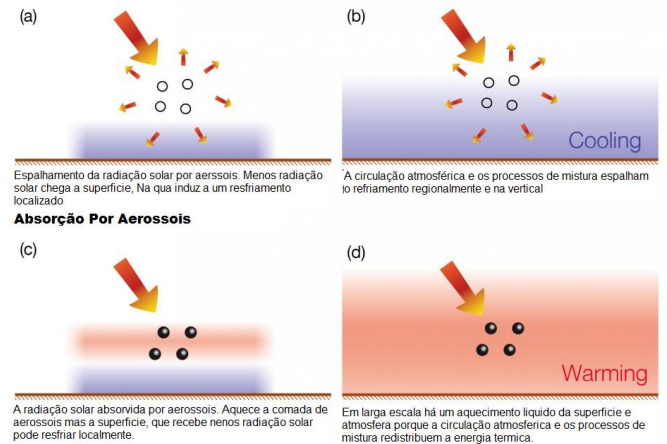
## Química e Aerossol



### Interações Aerossóis-Radiação

espalhamento por aerossóis

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



Reações químicas

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

Transporte-Advecção

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

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

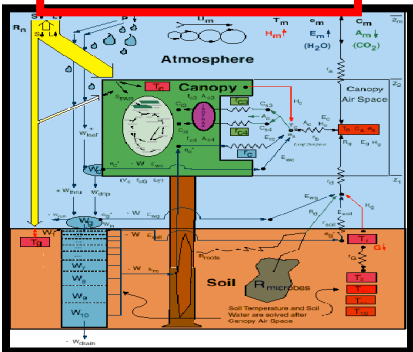


# Evolução da Modelagem do Sistema Terrestre

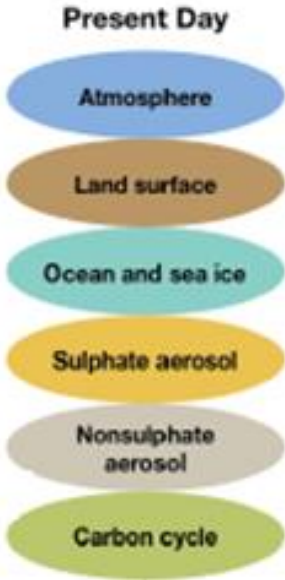
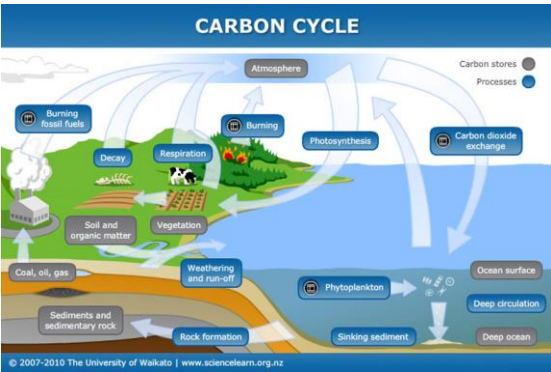


## Interações entre ecossistemas e o ciclo do carbono

SiB 2.5



SiB 2.5 (Baker et al., 2003)



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

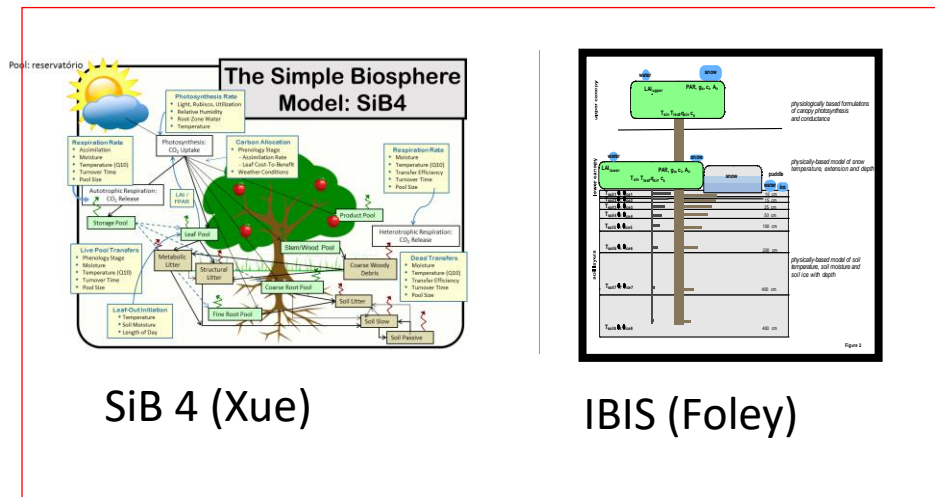
$$\frac{\partial \bar{X}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{X})}{\partial x_i} = \dots - \left. \frac{\partial \overline{u'_i X'}}{\partial x_i} \right|_{superficie} - \left. \frac{\partial \overline{u'_i X'}}{\partial x_i} \right|_{conv} + \overline{S_x} \Big|_{conv} + \overline{S_x} \Big|_{outros}$$





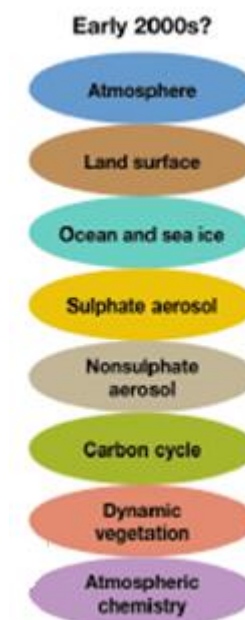
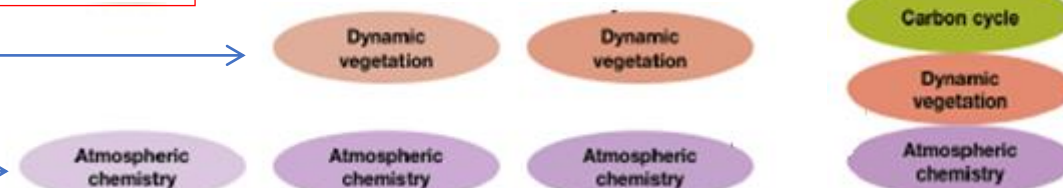
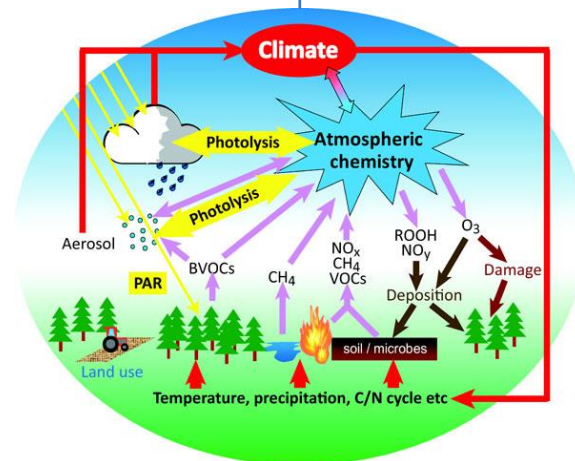
# Evolução da Modelagem do Sistema Terrestre

## Interações entre ecossistemas e o ciclo do carbono



SiB 4 (Xue)

IBIS (Foley)



O Que Fazer com todas as componentes?

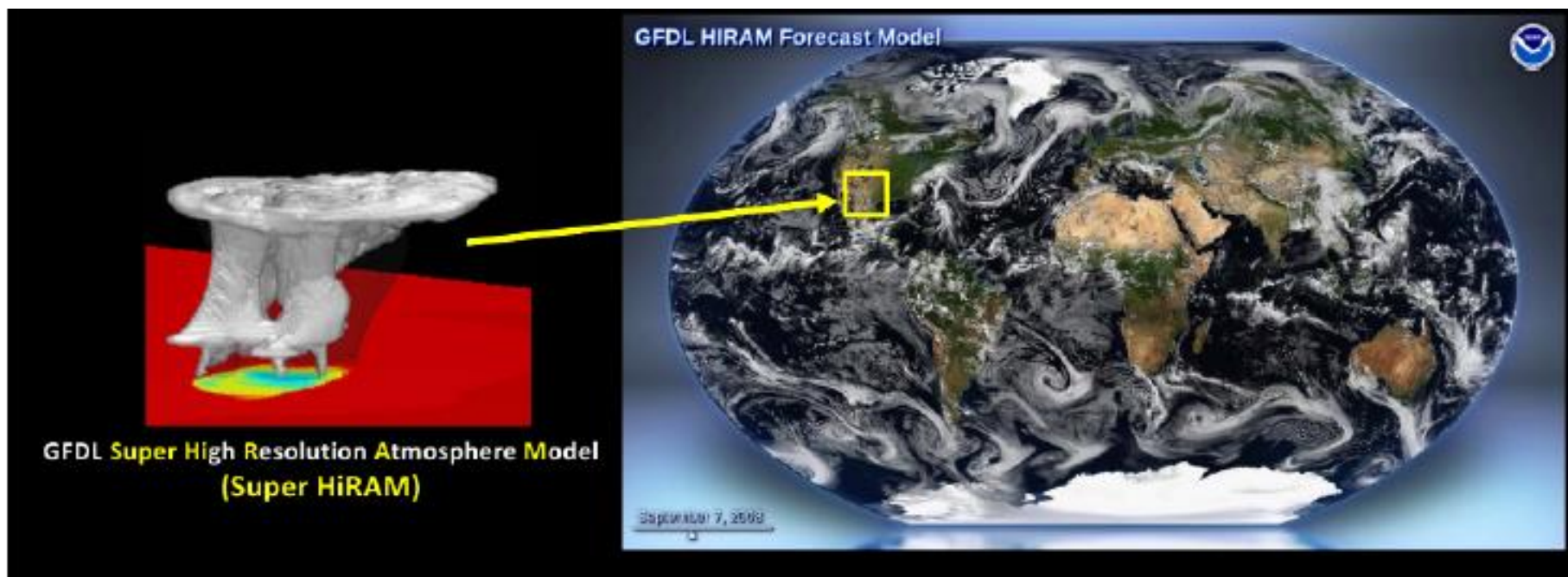


# Evolução da Modelagem do Sistema Terrestre



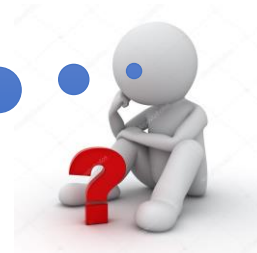
## Modelagem de Alta Resolução (CRM-AGCM)

O campo global da nuvem: um sistema multiescala



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

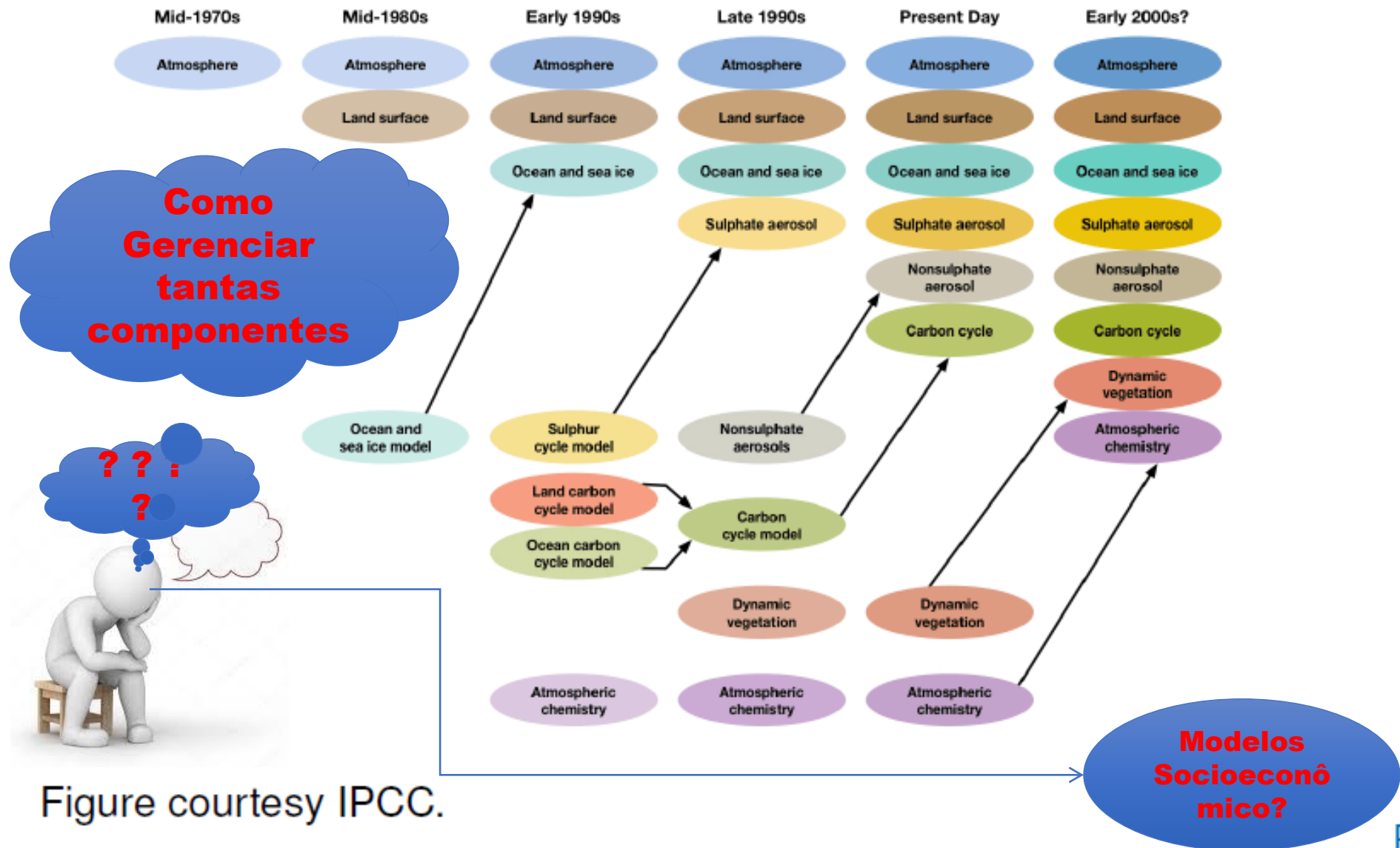
**Mais essa?**





# Evolução da Modelagem do Sistema Terrestre

## Evolução do modelo do sistema terrestre



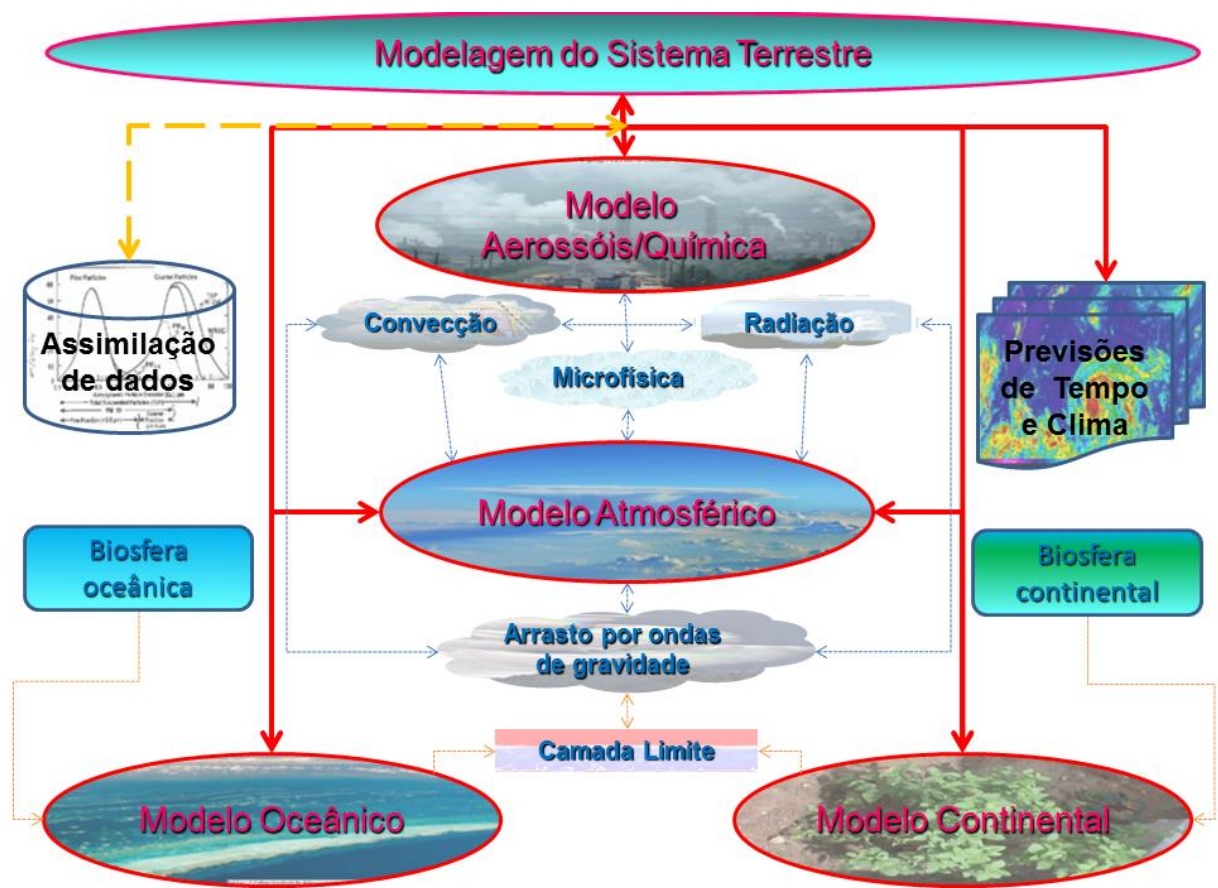




# Evolução da Modelagem do Sistema Terrestre



**Solução utilizar acopladores**







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**.

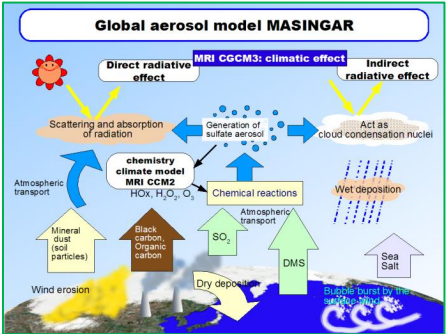
O **desempenho** global e os problemas de **balanceamento de carga** são cruciais



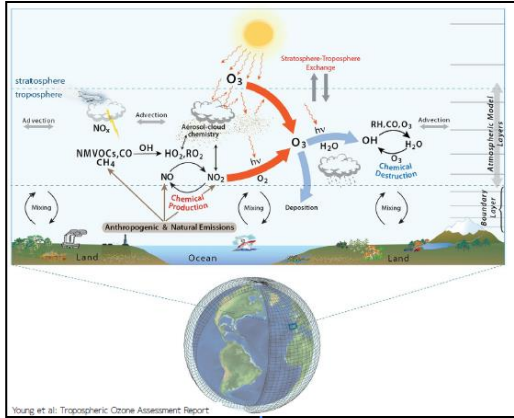
# Os Grandes Módulos do Sistema Terrestre.



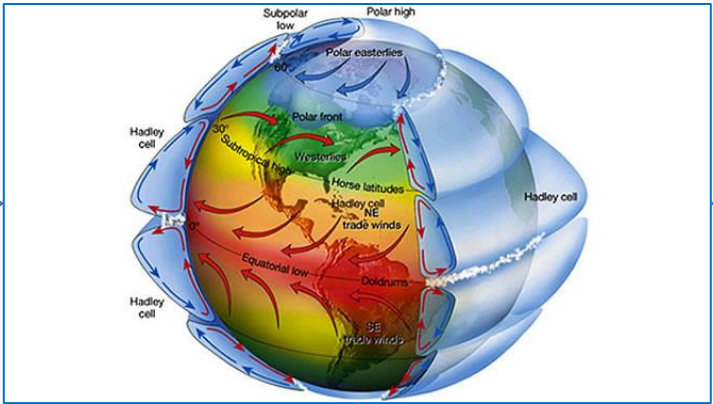
## Aerossol Atm



## Química Atm

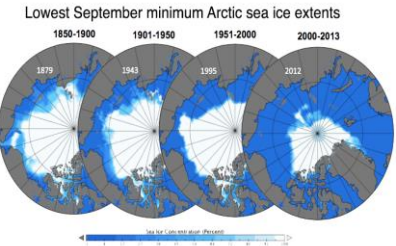


## Dinâmica Atm



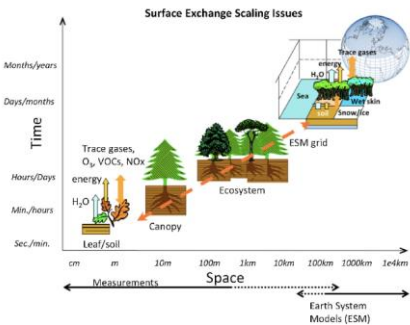
<https://wattsupwiththat.com/>

## Dinâmica Sealce

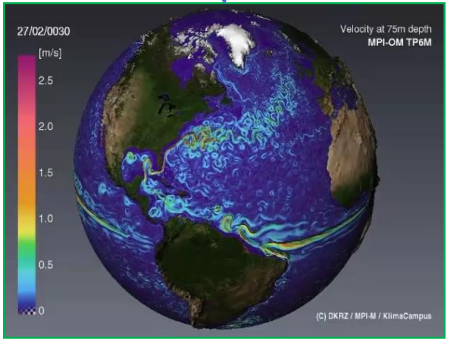


F. Fetterer/National Snow and Ice Data Center, NOAA

## Dinâmica Land



## Dinâmica Ocea



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

Paulo Yoshio Kubota



# 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.**

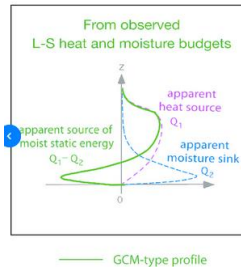
## Considerações Computacionais.

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



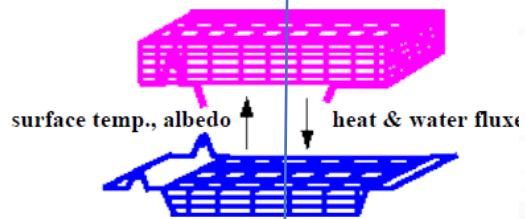


# Considerações sobre Acoplamentos.



?

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



**Escalas de acoplamento (s)**

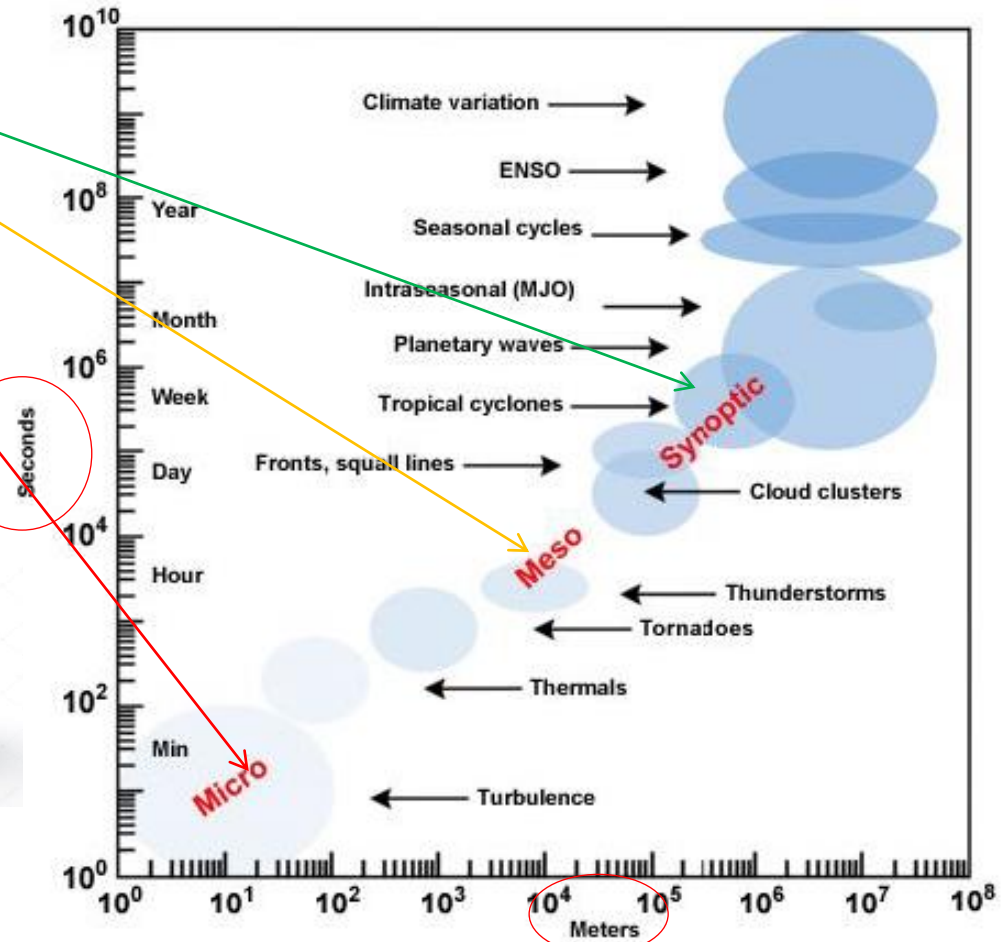


Figure courtesy UCAR.



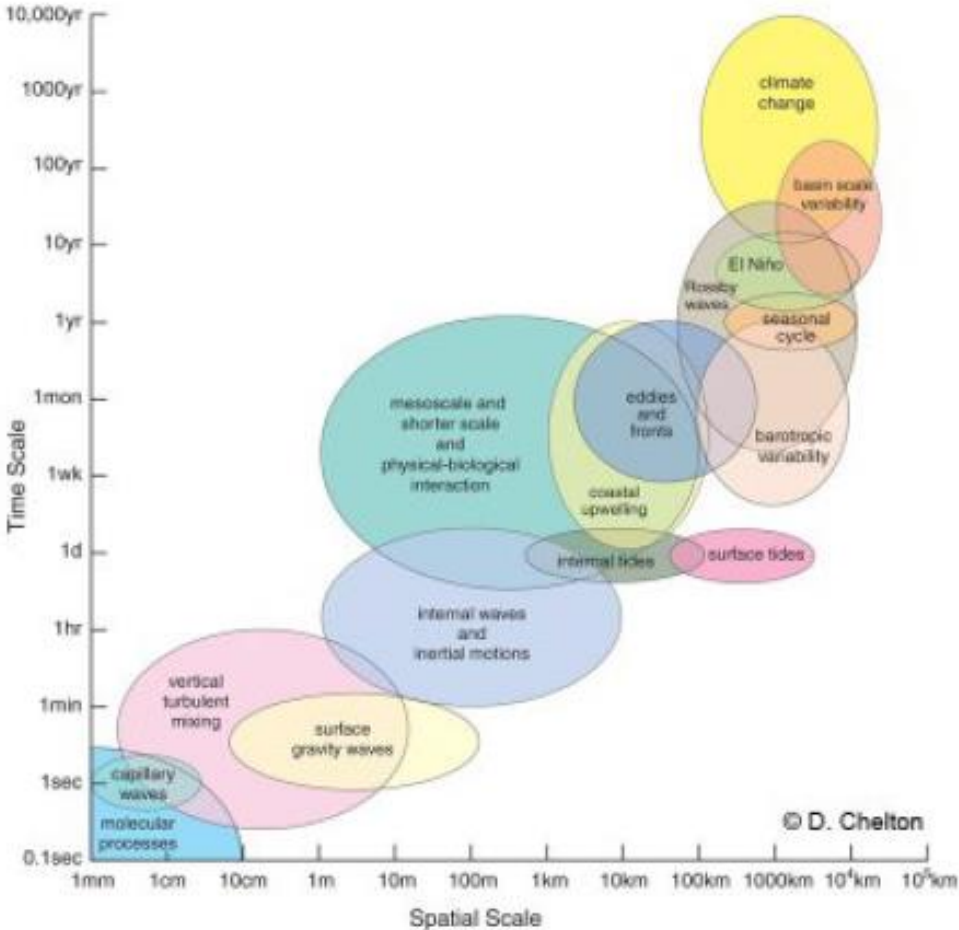


# Considerações sobre Acoplamentos.

## Escalas de processo oceanicos



Passo de tempo de integração



Grade do modelo

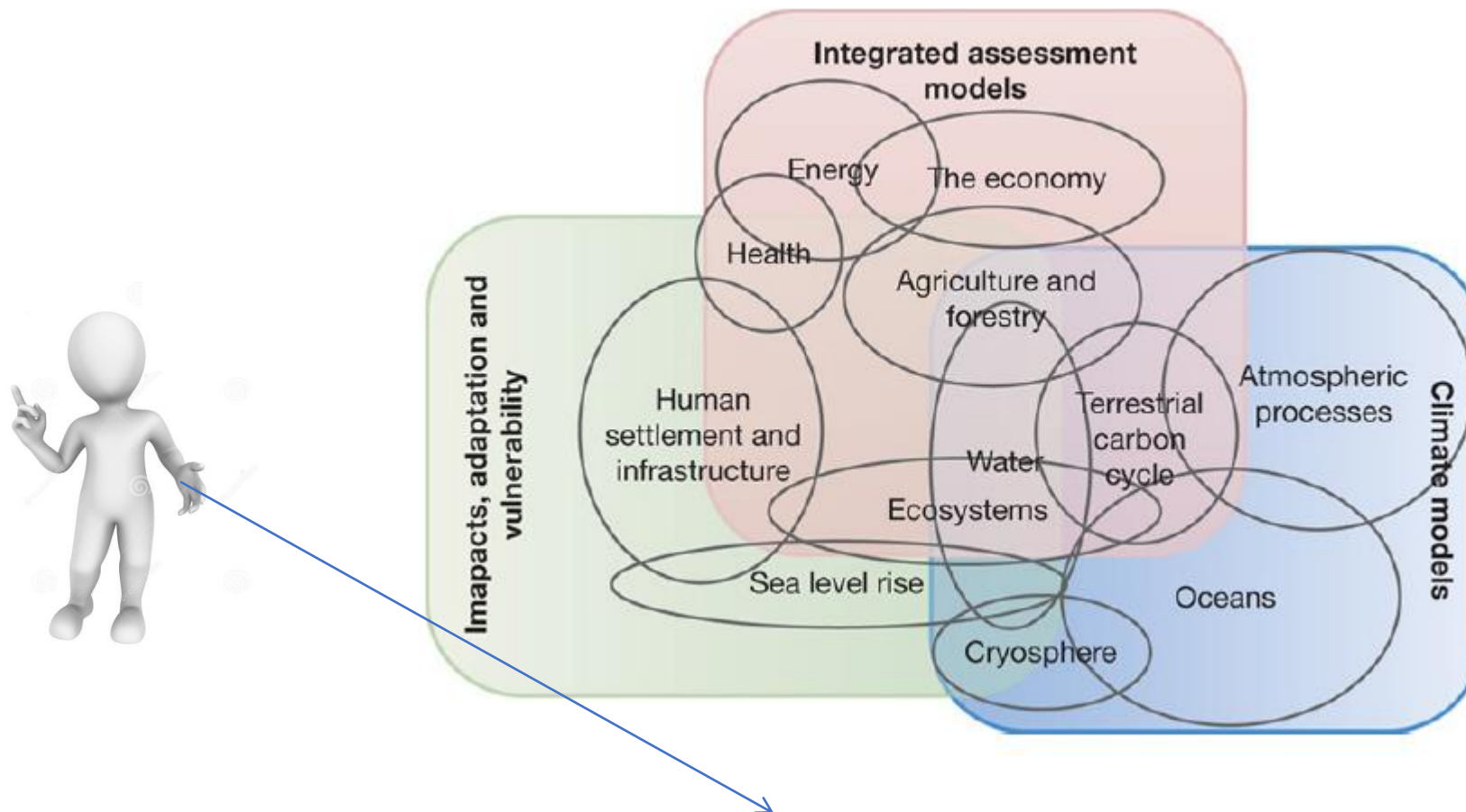




# Considerações sobre Acoplamentos.



## A fragilidade dos sistemas acoplados



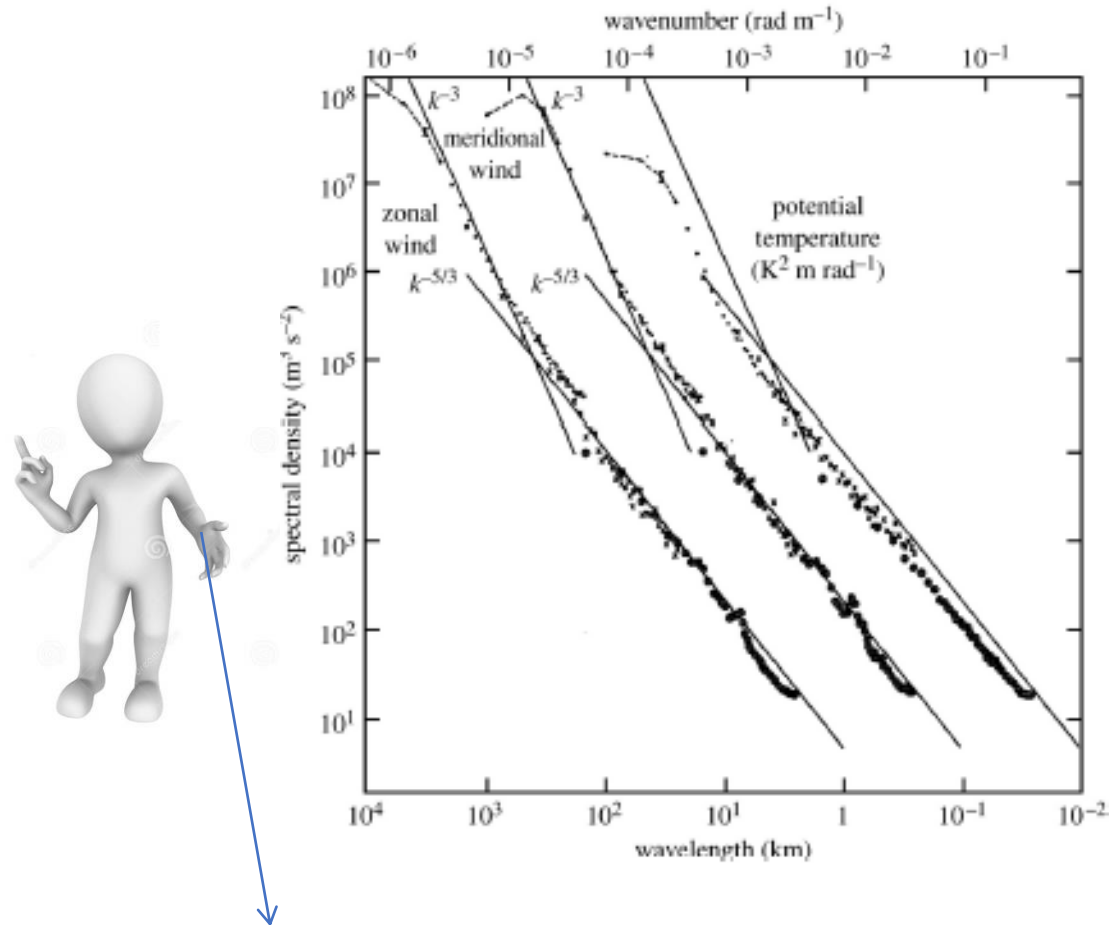
Moss et al 2010. O acoplamento em toda esta cadeia de modelos é um **Desafio científico, semântico e de software.**



# 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**".





## O que significa “acoplamento de códigos”?

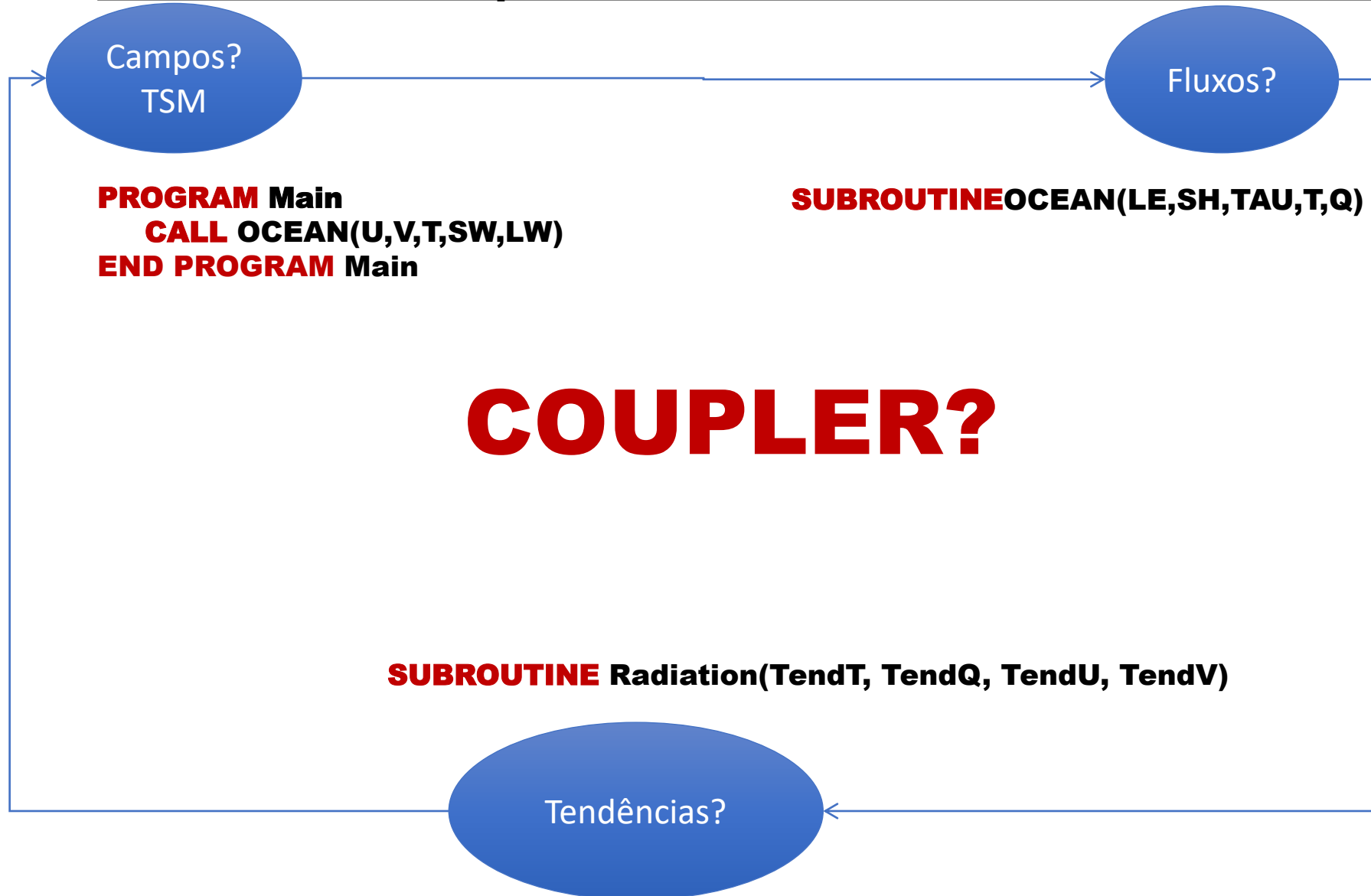
- **Troca e transformação de informações na interface de código.**
- **Gerenciar a execução e sincronização dos códigos.**





# Considerações sobre Acoplamentos.

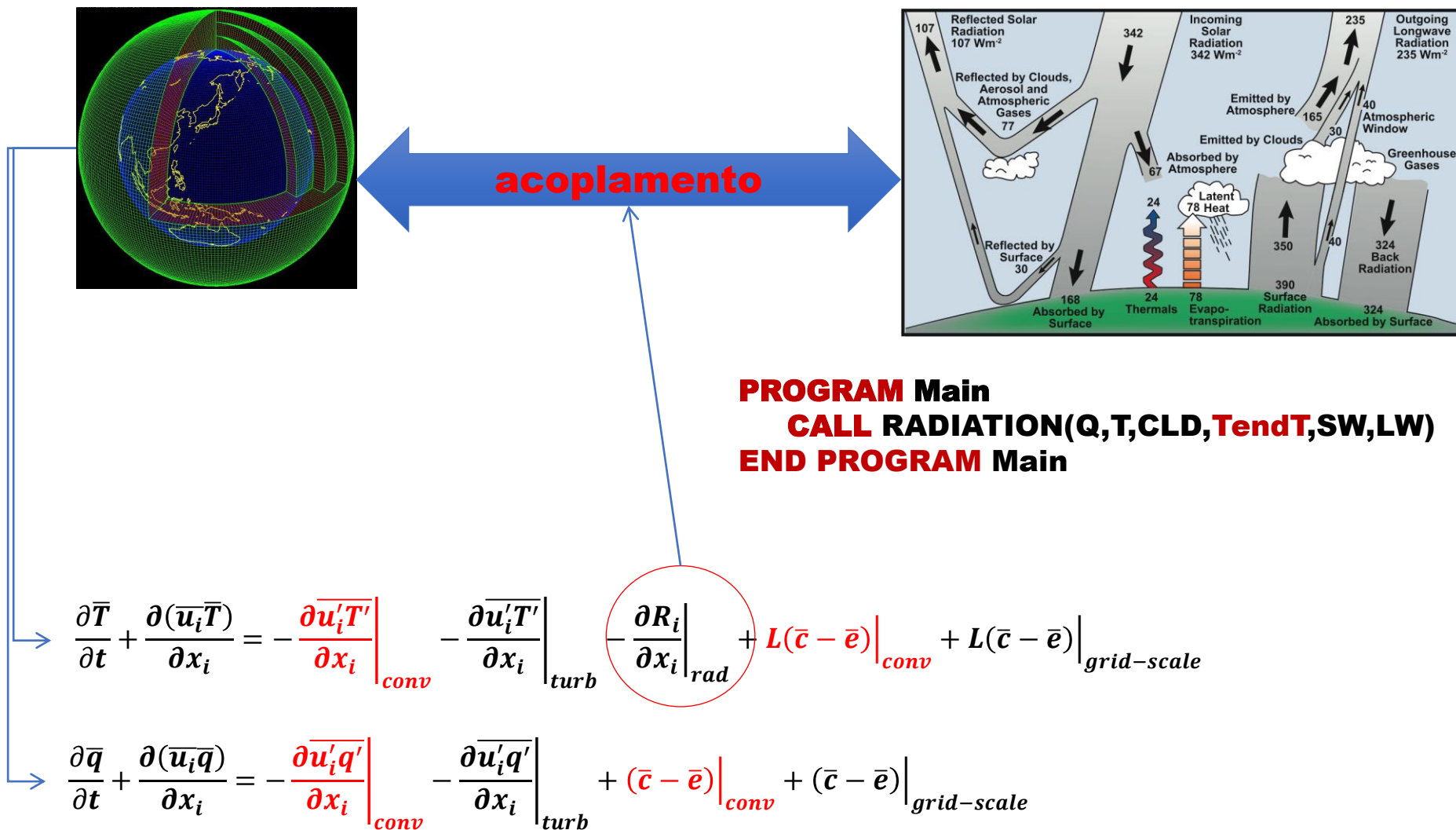
## Quais Variáveis acoplar entre os módulos do Sistema Terrestre?





# Considerações sobre Acoplamentos.

## Acoplamento da Radiação Global

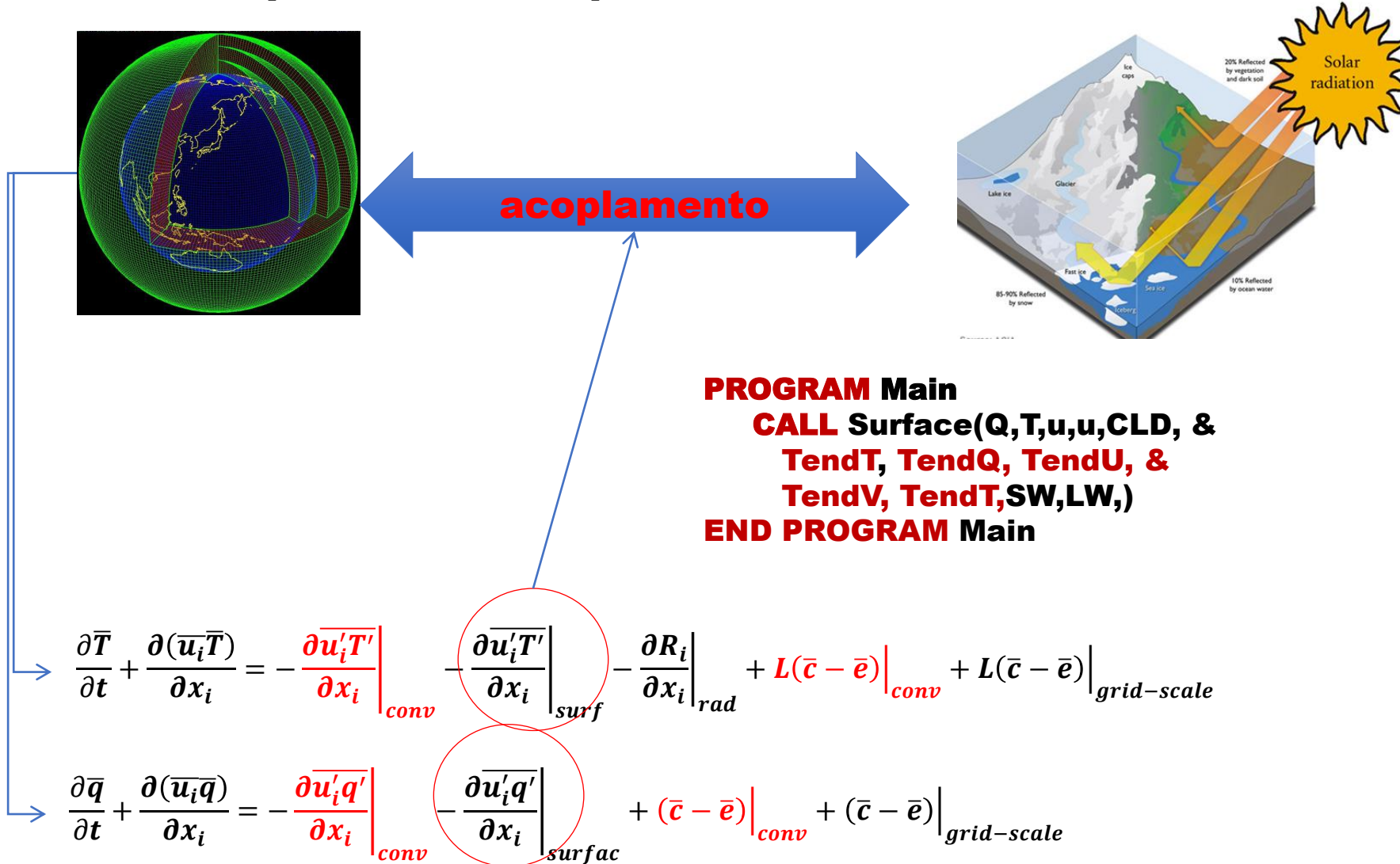


O aquecimento resulta de um pequeno desequilíbrio na soma de muitos componentes e feedbacks.



# Considerações sobre Acoplamentos.

## Acoplamento da Superfície



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



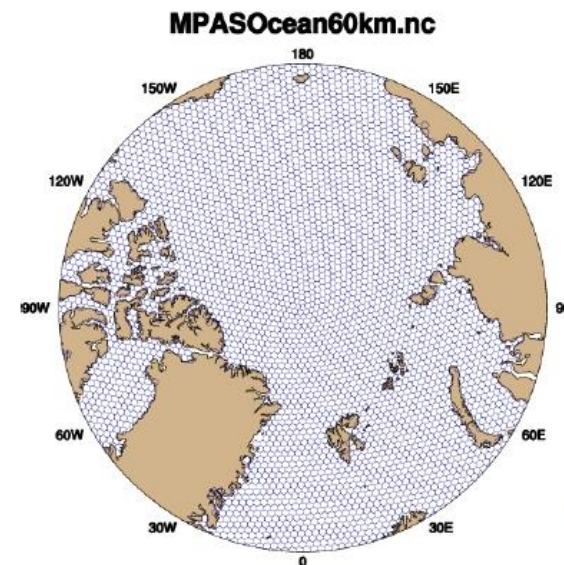
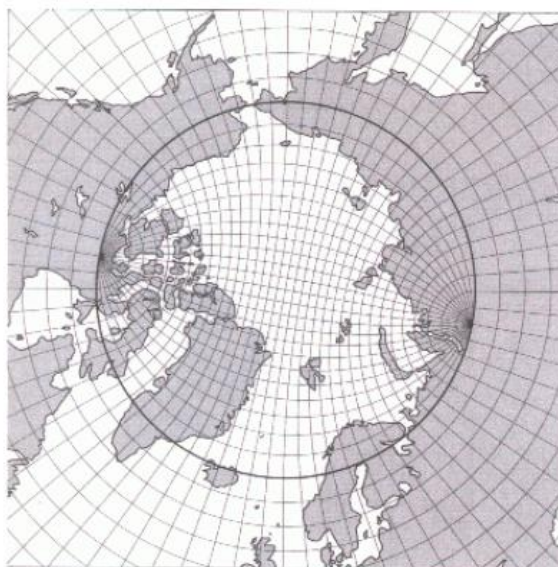


# Software de Acoplamento



## 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 ativamente.
- **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**





# Software de Acoplamento

## Evolução do modelo do sistema terrestre

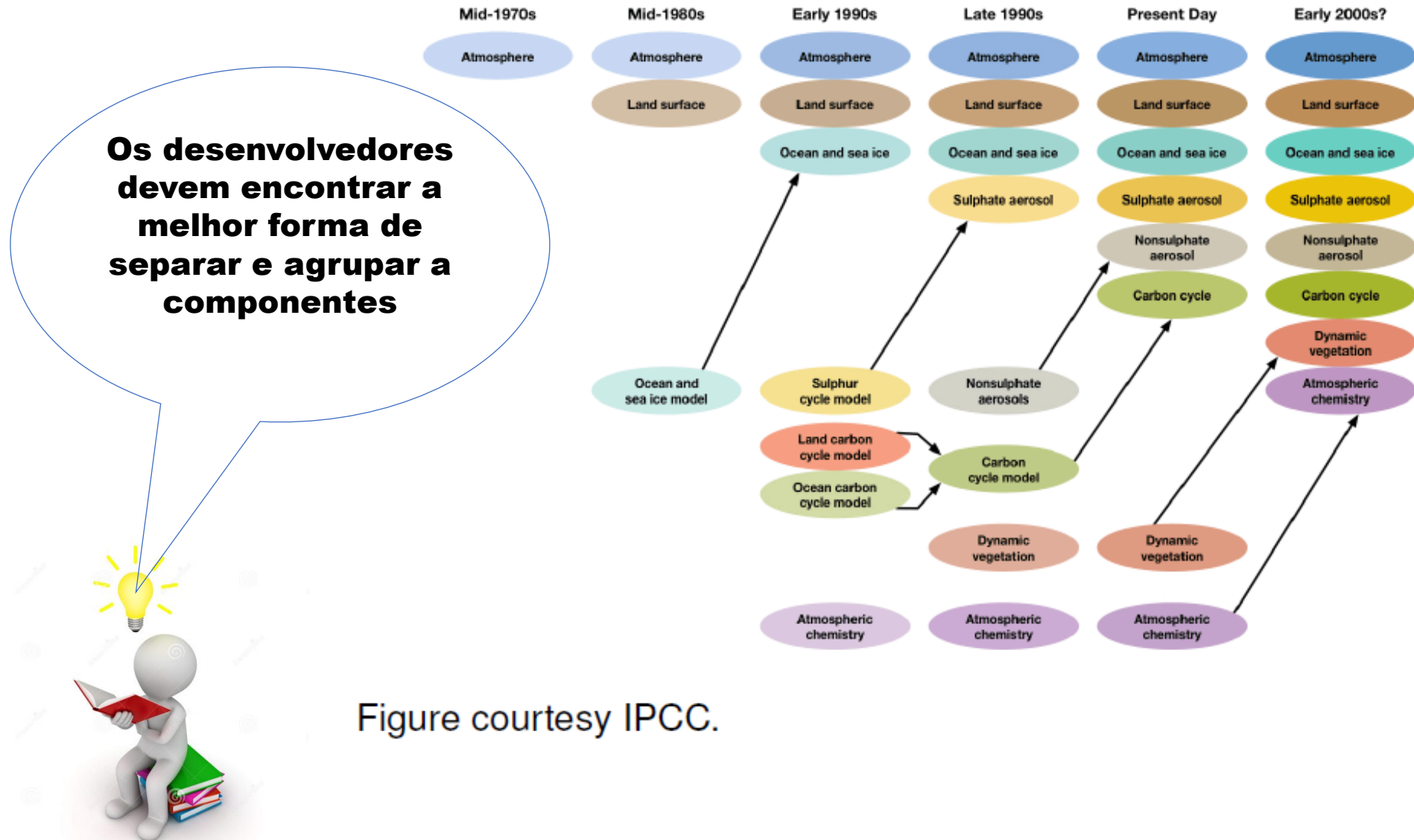


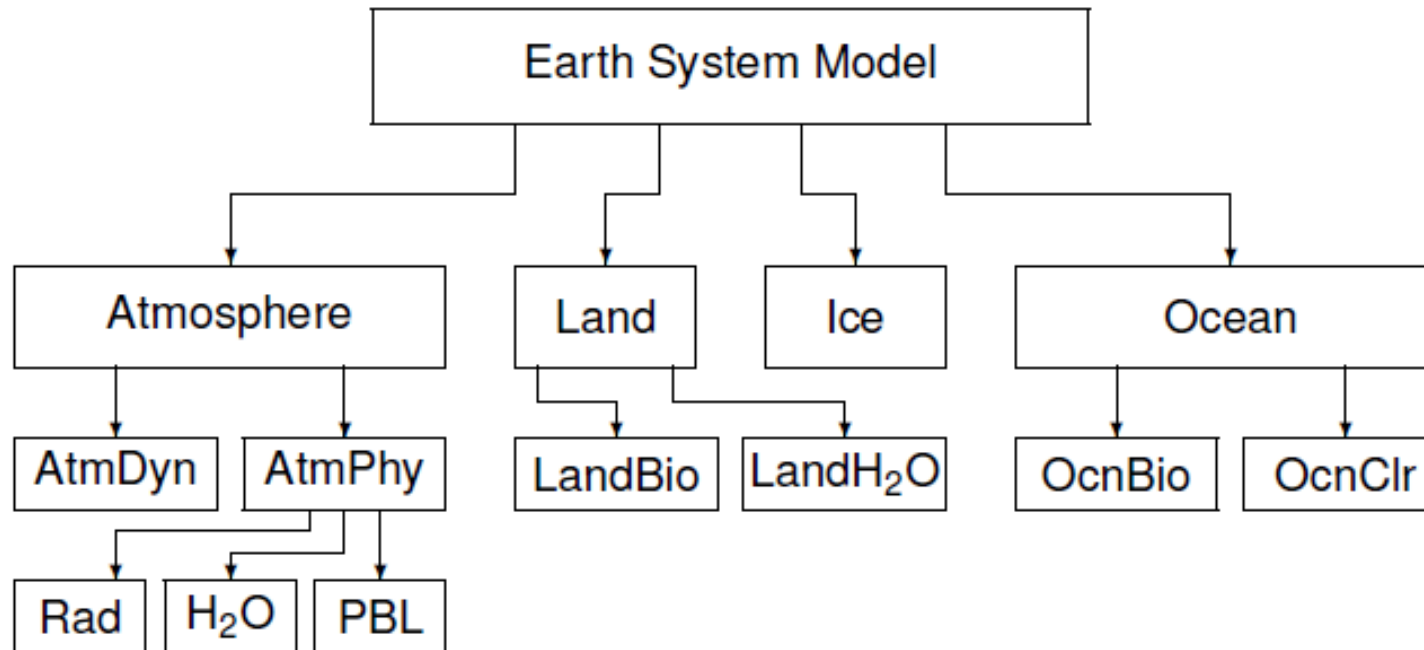
Figure courtesy IPCC.





# Software de Acoplamento

## Arquitetura do modelo de sistema terrestre idealizado

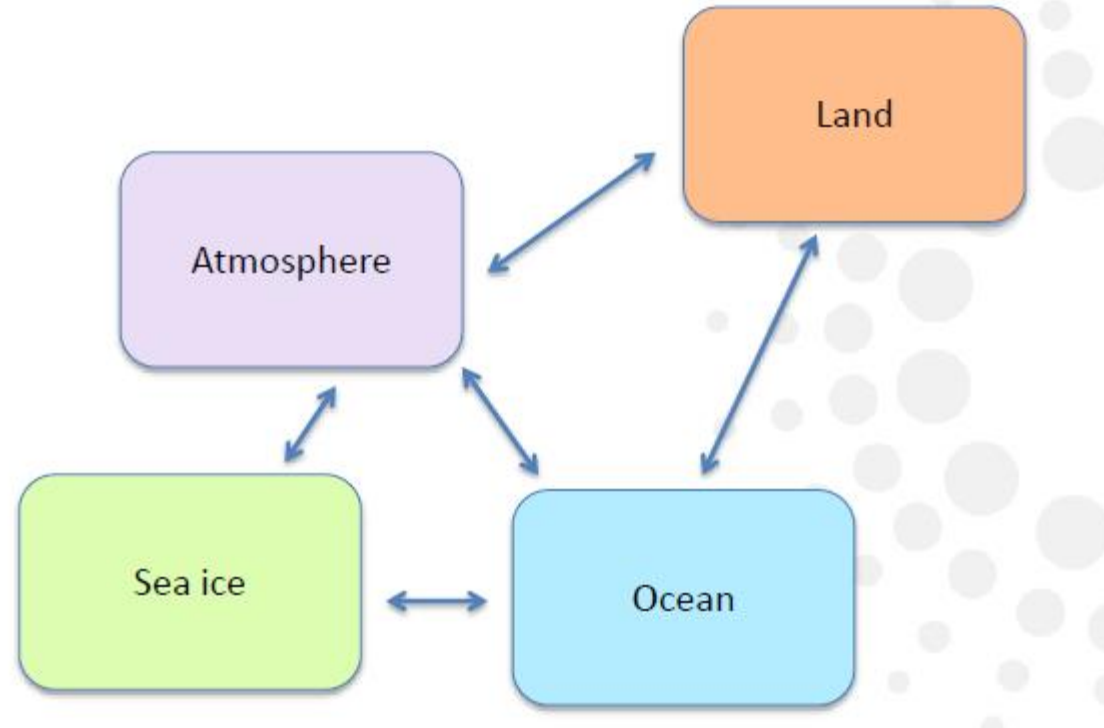


Os especialistas nas componentes devem ter a liberdade de escolher algoritmos, **grades**, **discretizações**, **escalonamento de tempo**, ...



# Software de Acoplamento

**Construído a partir de componentes**



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



## 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
```

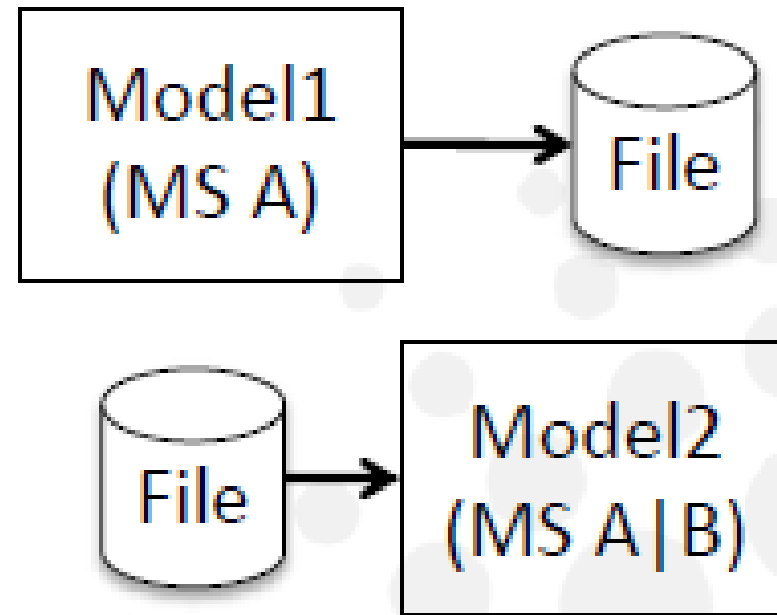
```
program subroutine prog2  
...  
end prog2
```

😊 efficient  
😊 sequential components

😞 hard coded coupling  
😞 no flexibility in the component layout



## Escrita e Leitura de dados de Arquivos



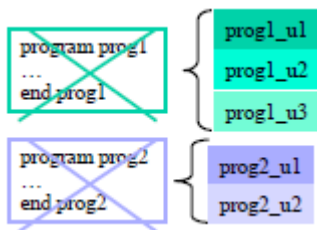


# Duas principais abordagens técnicas para o acoplamento

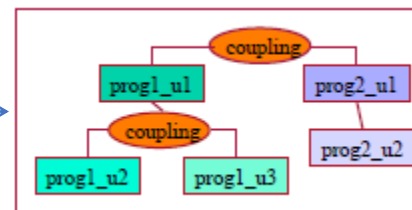


## Abordagem **integrada** do framework de acoplamento

- 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**

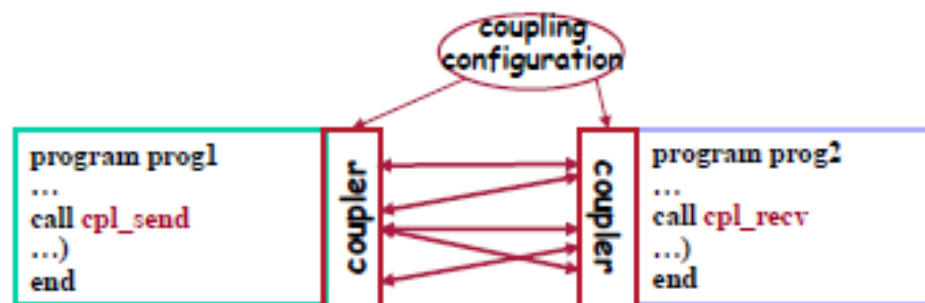




# Duas principais abordagens técnicas para o acoplamento



## 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



## 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



## 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
```

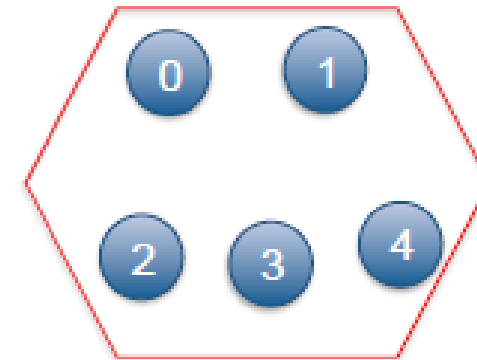
Hello world, je suis le processus 3 parmi 5.

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.

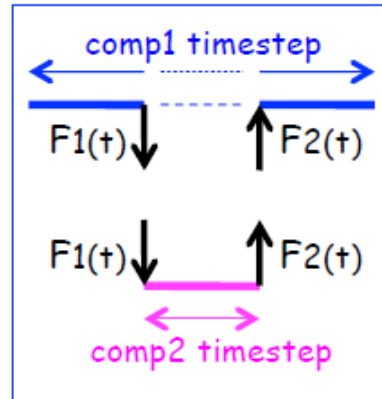


MPI\_COMM\_WORLD



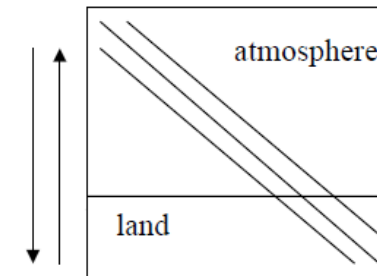
## Forma de Paralelismo

### Acoplamento Sequencial

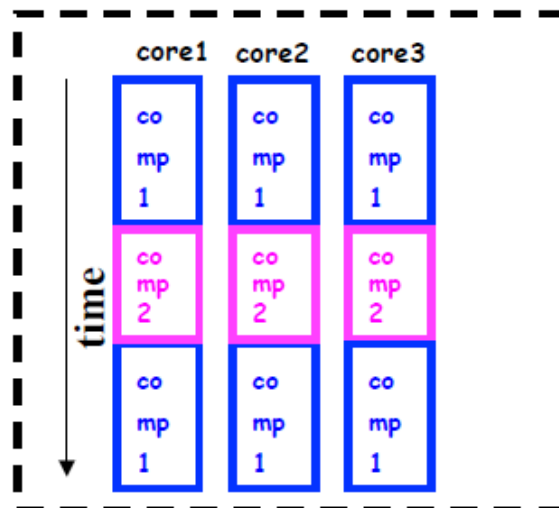


Resolução implícita equação de difusão de calor do topo da atmosfera à superfície do continente

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



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

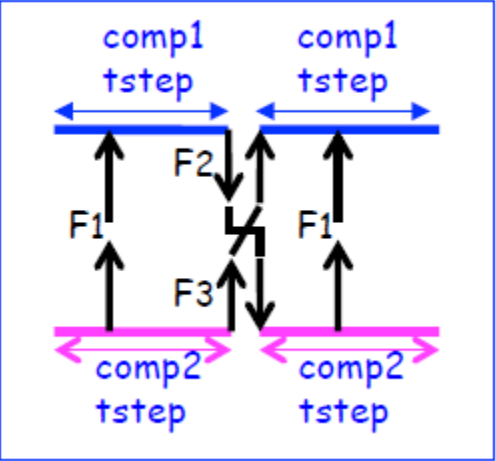


- 😊 • Eficiente acoplamento de trocas através da memória
- 😊 • Ótimo para balanceamento de carga se as componentes podem rodar eficientemente em um mesmo numero de cores.
- 😞 • Possível conflito quando as componentes são sobrepostas em um mesmo executável (I/O, units, comm internos, etc).
- 😞 • Não é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

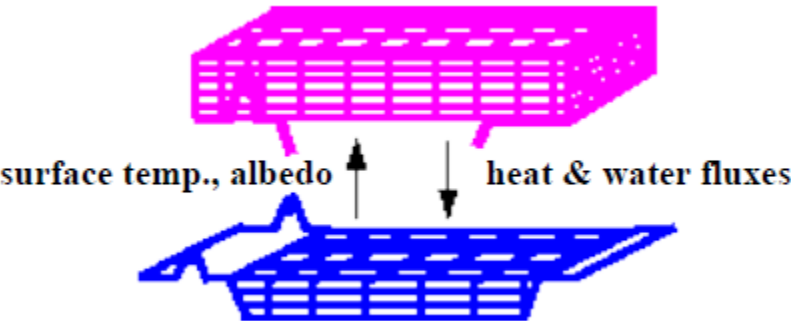


## Forma de Paralelismo

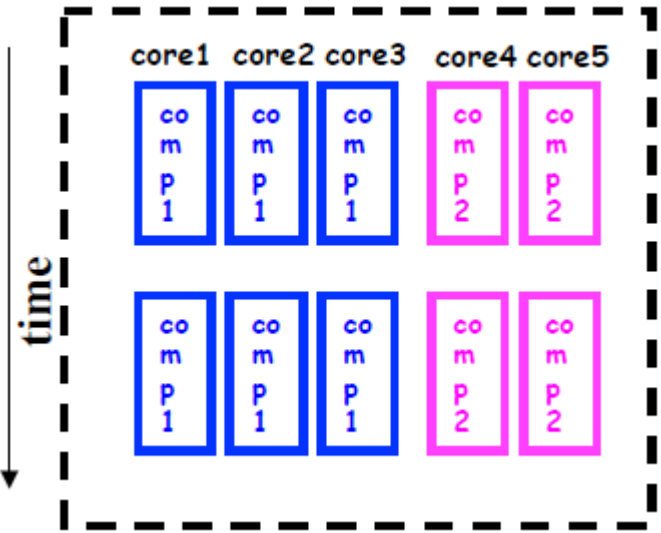
### Acoplamento Concorrente



### Acoplamento assíncrono tradicional oceano-atmosfera



➤ **Execução concorrente sobre o diferentes conjunto de cores e um executáveis**



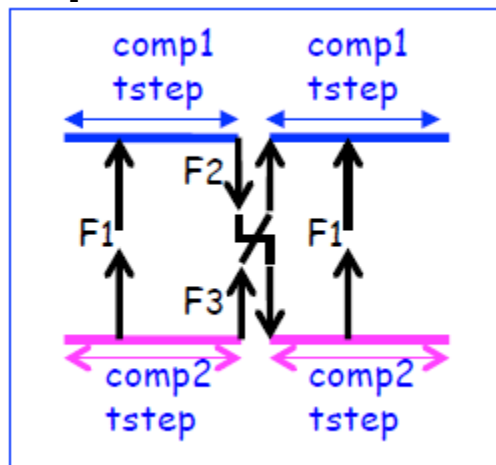
- 😊 • **Algoritmo de acoplamento flexível (trocas em timestep)**
- 😞 • **Possíveis conflitos. Pois as componentes são mesclados em um executável (E / S, unidades, comunicação interna etc.)..**
- 😞 • **Balanceamento de carga mais difícil.**
- 😞 • **Trocas de acoplamento menos eficientes , pois os componentes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



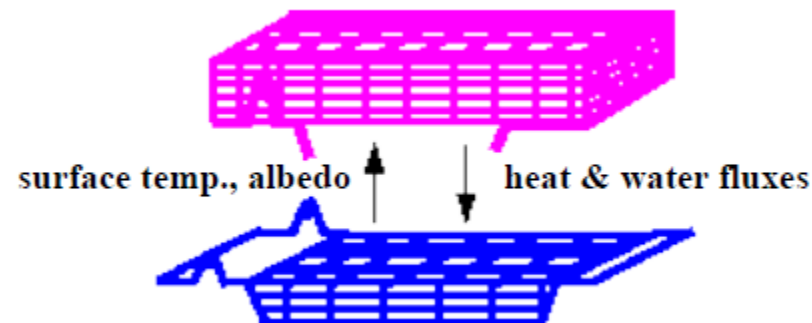


## Forma de Paralelismo

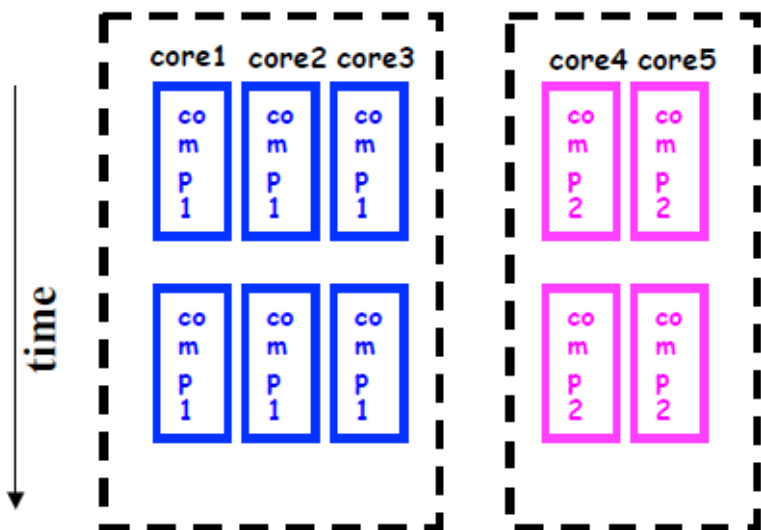
### Acoplamento Concorrente



### 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.

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

2. Encapsule estruturas de dados nativas na estrutura de dados do ESMF.

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

3. Escreve os componentes do acoplador.

4. Registra os métodos init, run e finalize no comp. do ESMF (no aplicativo do driver).

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

5. Programa componentes e troca dados.

6. Executa o aplicativo.



## Coupling framework integrated approach – CPL7

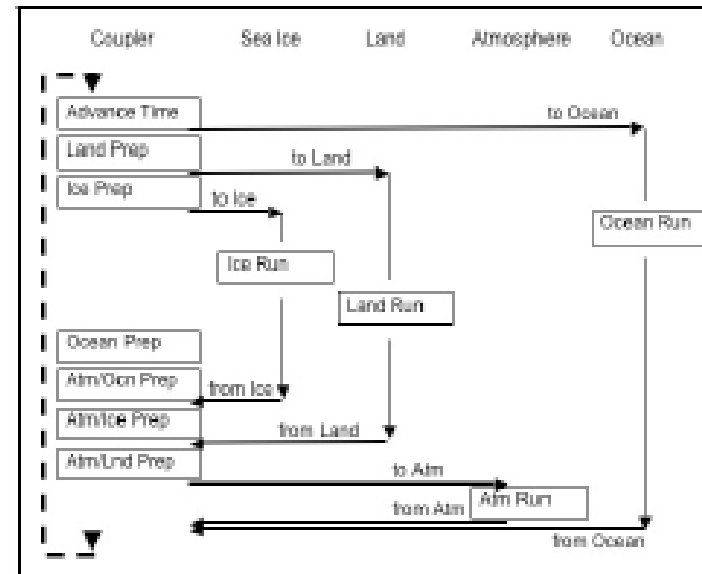
### Cpl7 para CCSM4 e CESM1



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

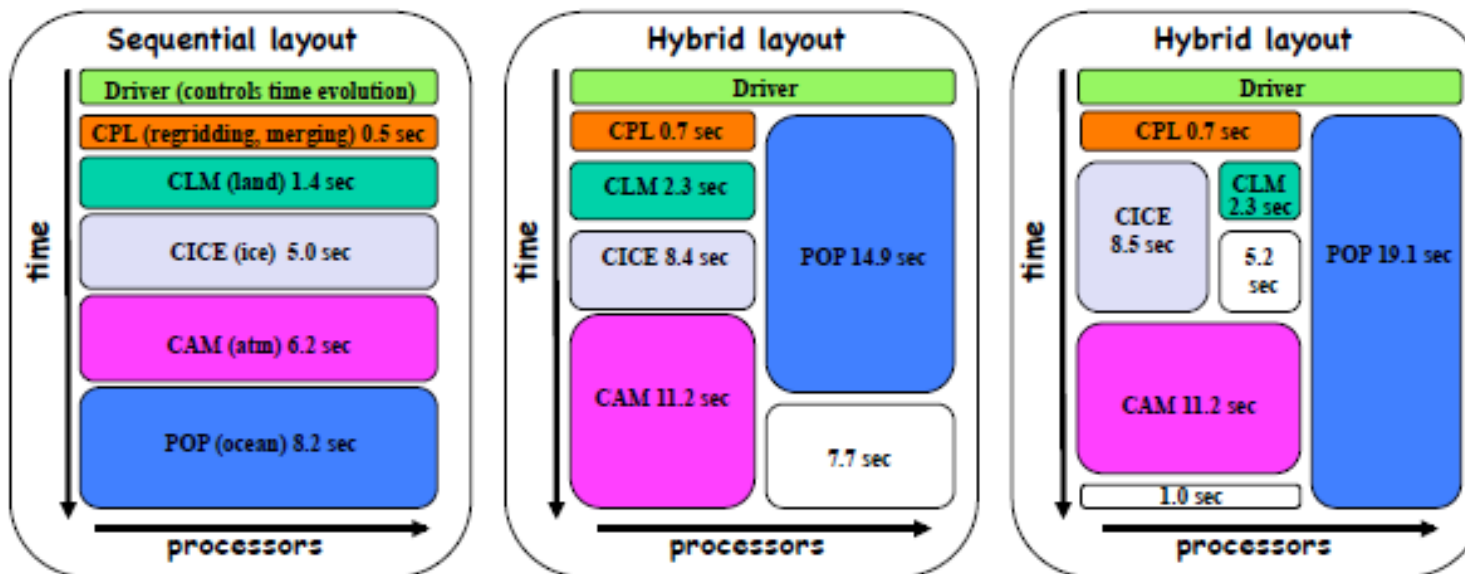




### Coupling framework integrated approach – CPL7



- 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.



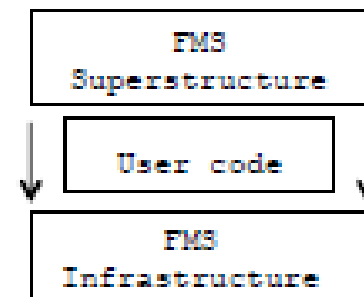


### The Flexible Modeling System (FMS)

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



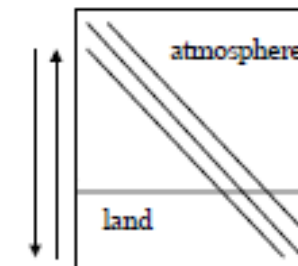
- Exchanges consistent with physical processes occurring near the surface

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

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

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

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





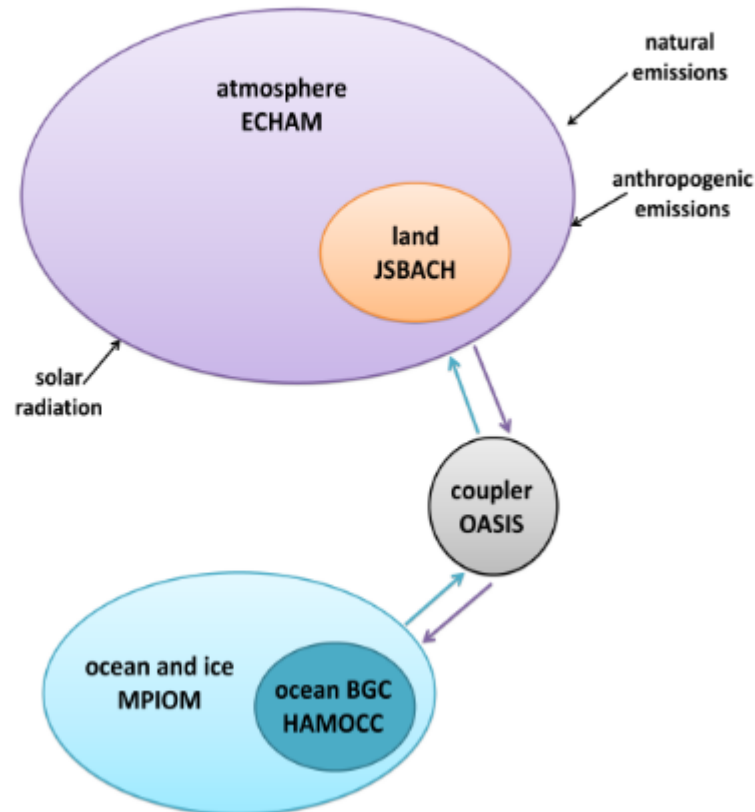
- **ESMF:** (<https://www.earthsystemcog.org/projects/esmf/>) High-performance, flexible software for building climate and weather applications; US multi-agency governance (NSF, NASA, DoD, NOAA).
- **OpenPALM** ([http://www.cerfacs.fr/globc/PALM\\_WEB/](http://www.cerfacs.fr/globc/PALM_WEB/)) Dynamic 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)



## Diversidade de arquiteturas de acoplamento

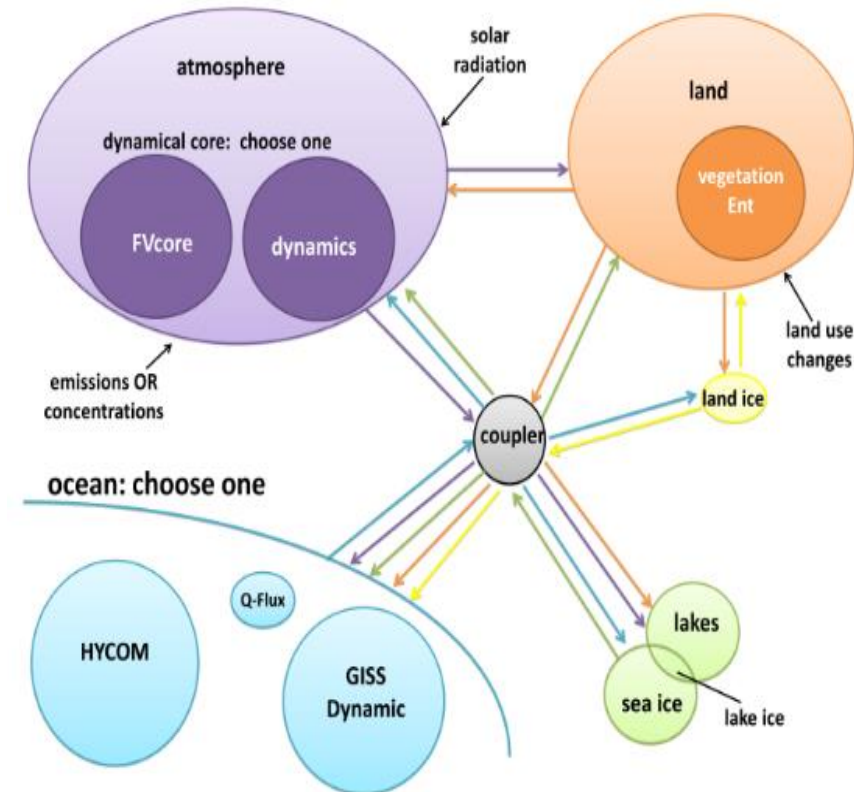
### COSMOS 1.2.1

Max-Planck-Institut für Meteorologie, Germany



### Model E October 11, 2011 revision

NASA Goddard Institute for Space Studies, USA





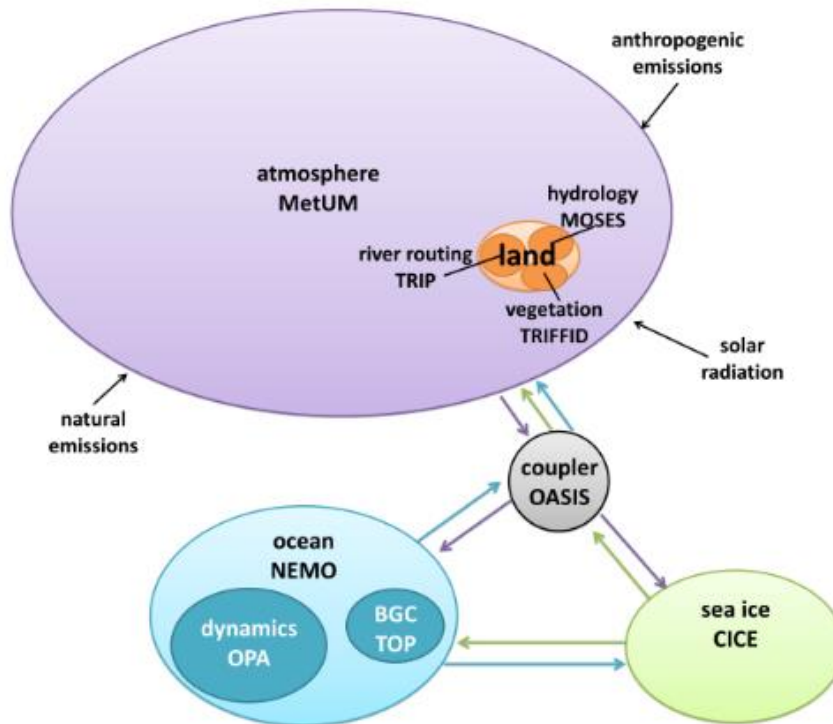
# Software de Acoplamento



## Diversidade de arquiteturas de acoplamento

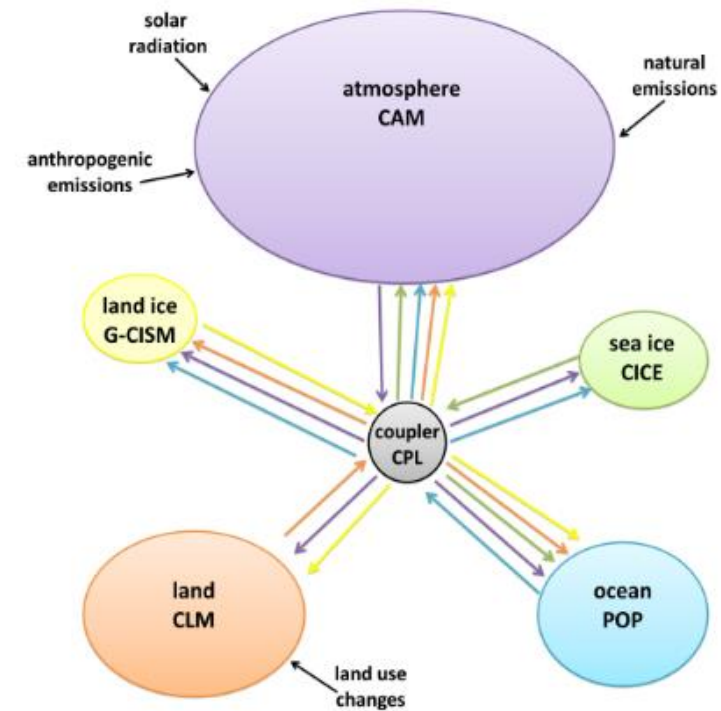
### HadGEM3

Met Office, UK



### CESM 1.0.3

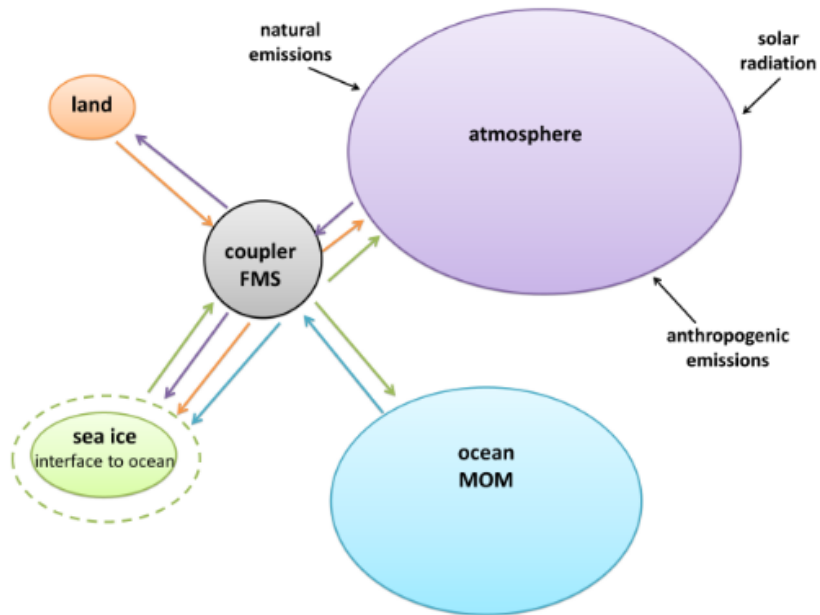
National Center for Atmospheric Research, USA



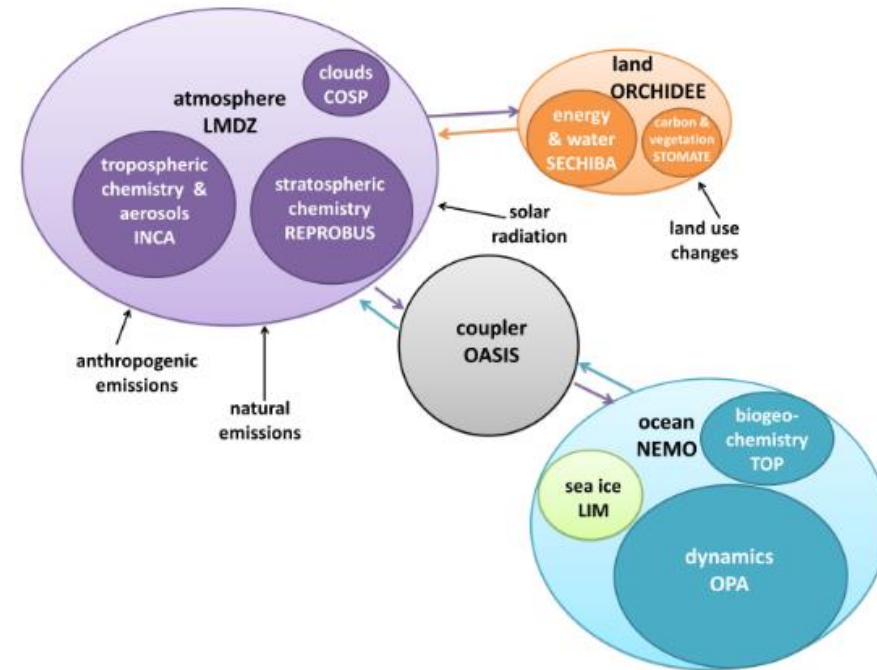


## Diversidade de arquiteturas de acoplamento

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



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

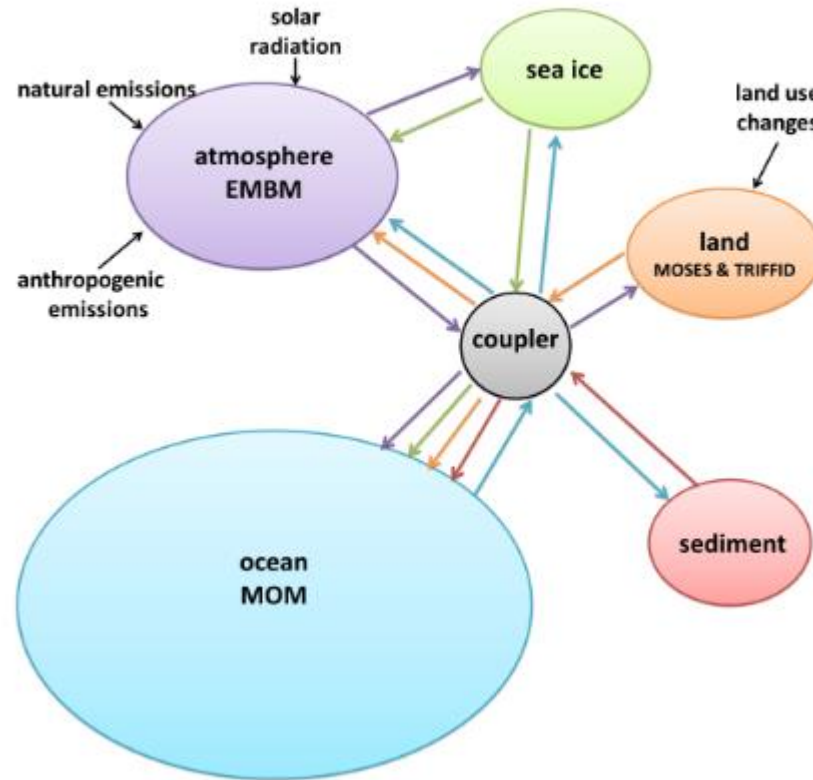






## Diversidade de arquiteturas de acoplamento

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





## **Diversidade de arquiteturas de acoplamento**

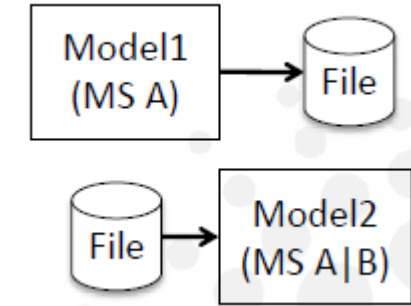


# Software de Acoplamento

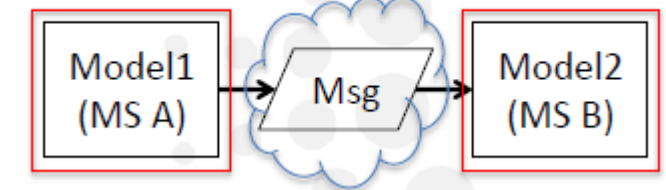


## Diversidade de arquiteturas de acoplamento

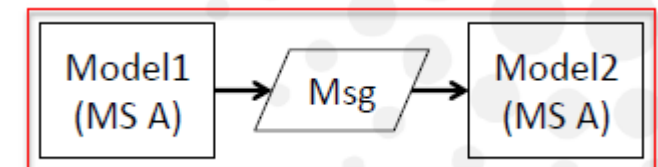
**Solta (por meio de arquivos, ordem sequencial para componentes)**



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



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



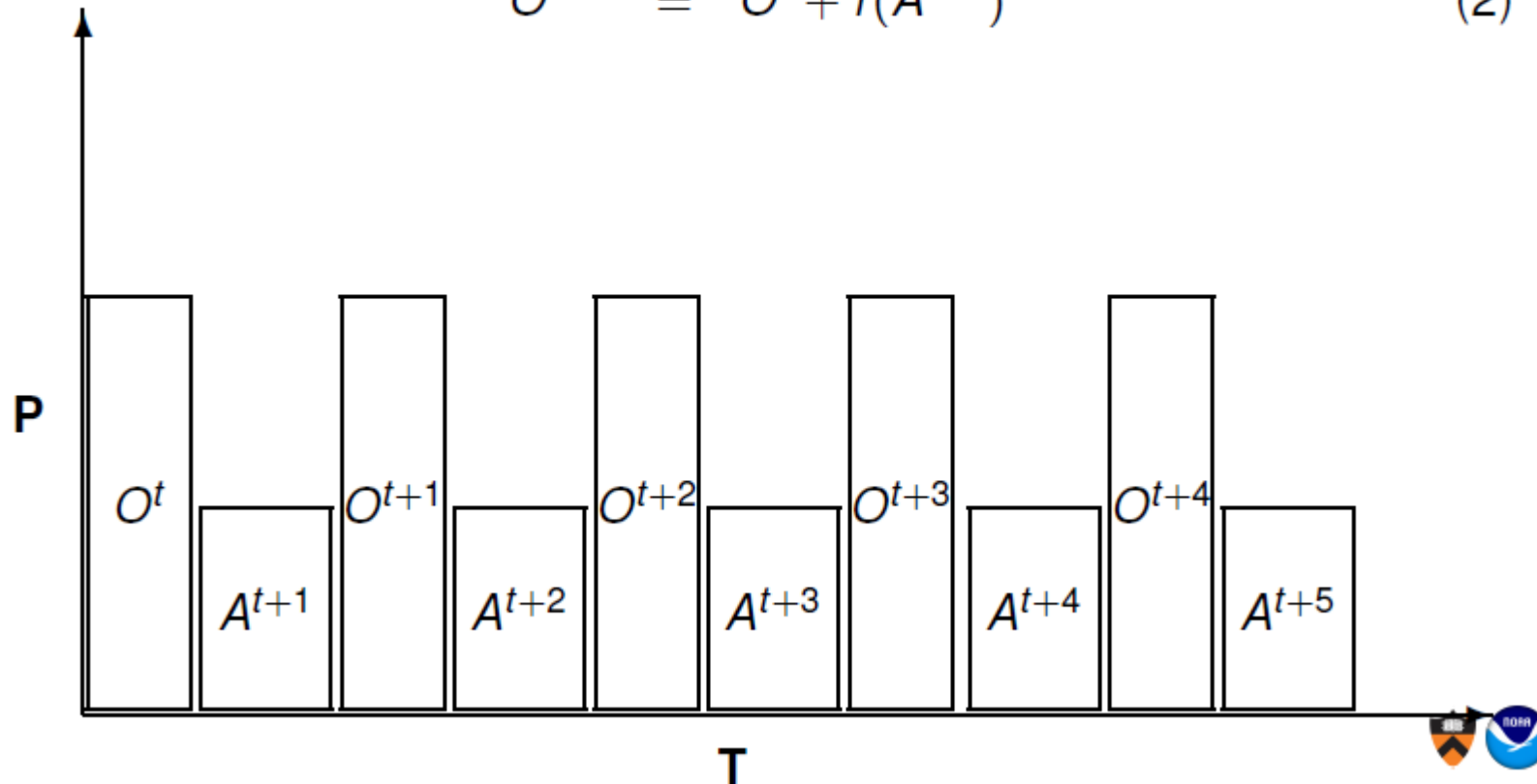


## Acoplamento serial

Usa um timestep de forward-backward para o acoplamento.

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

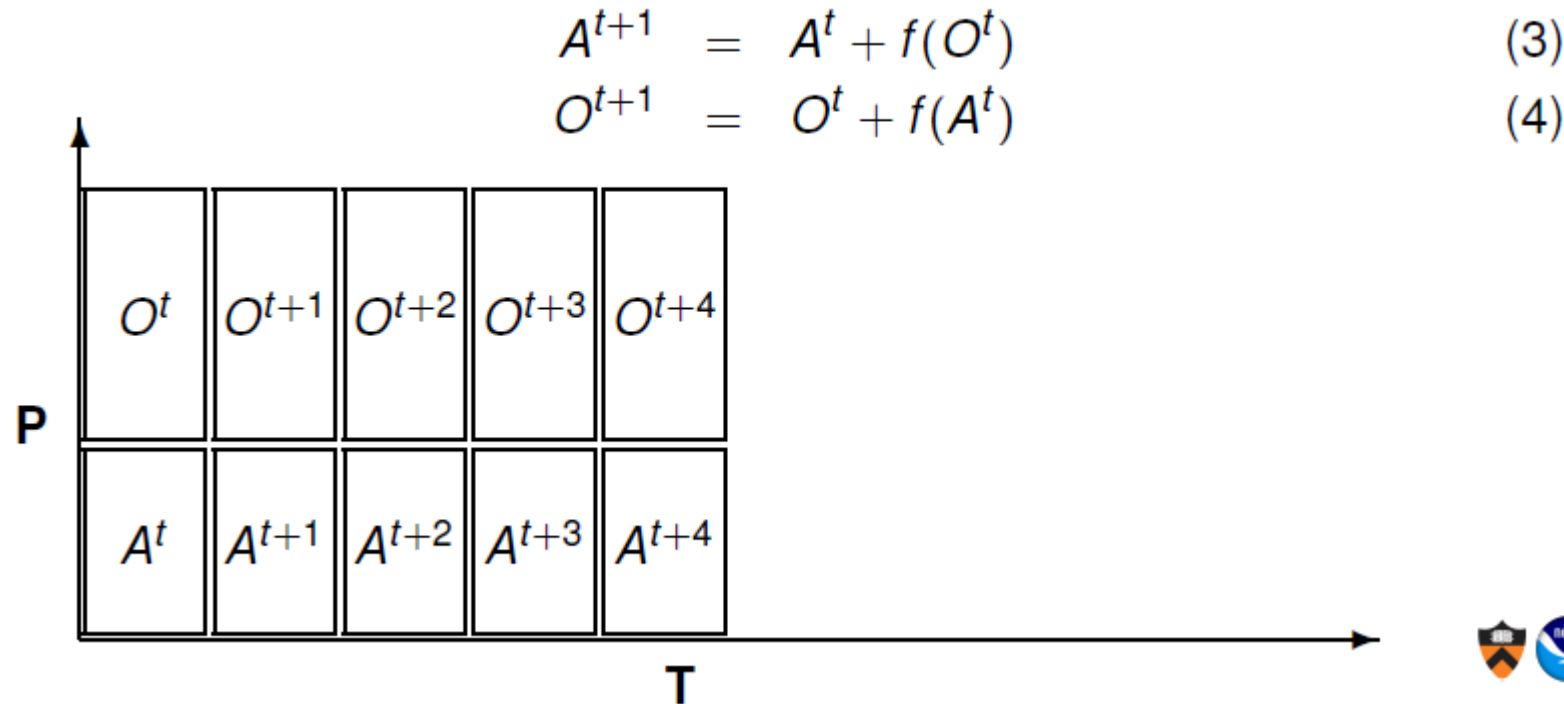
$$O^{t+1} = O^t + f(A^{t+1}) \quad (2)$$





## 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.**





## 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.

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

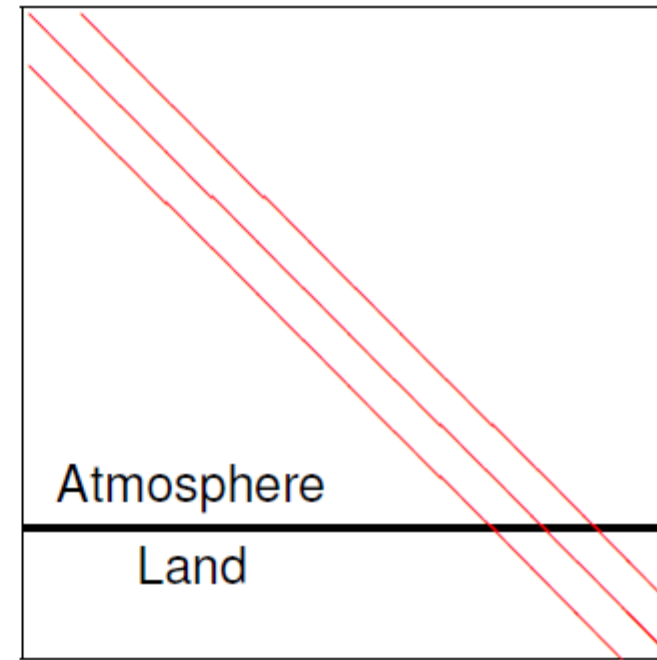
Atmosphere



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**

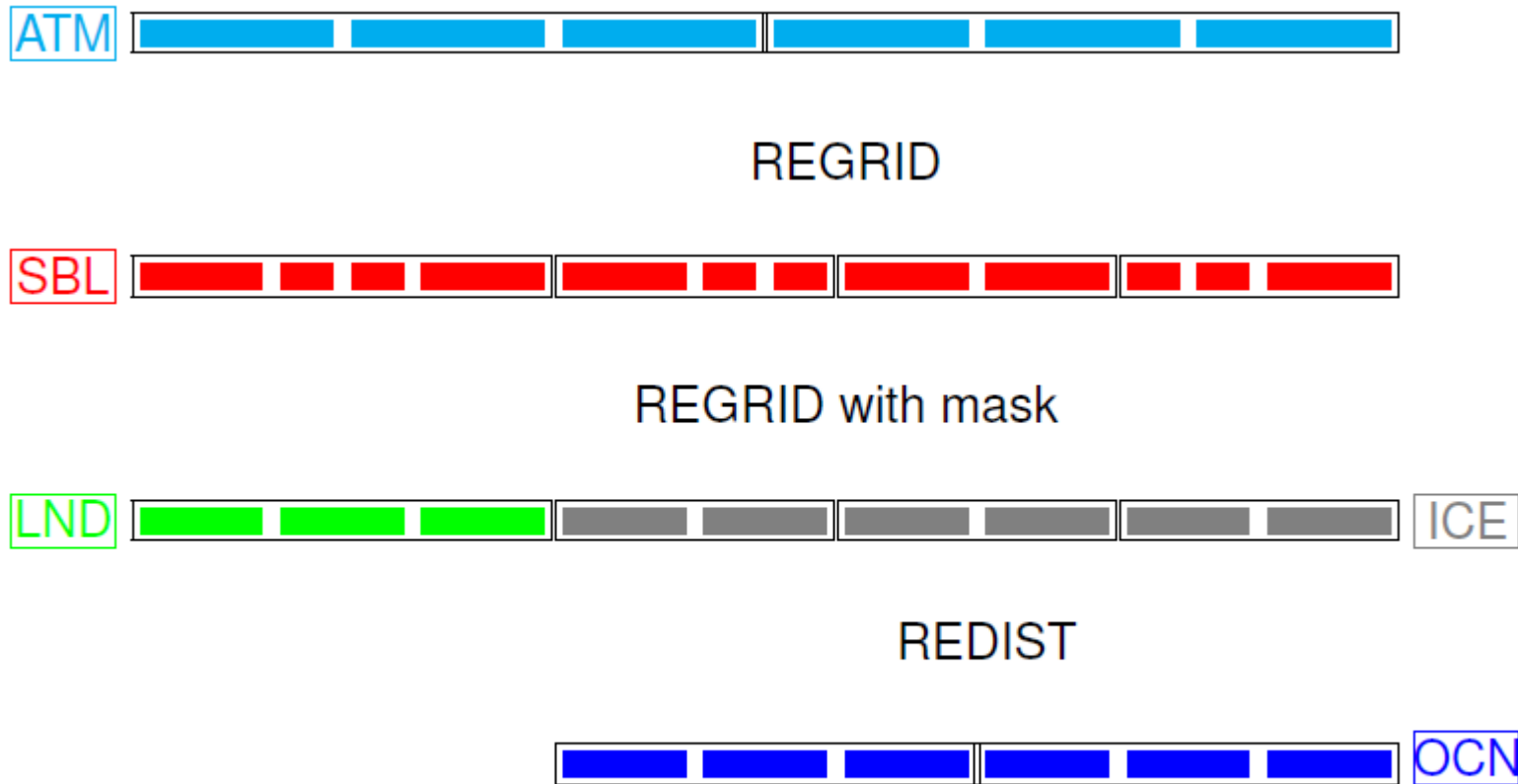
ocean $\longleftrightarrow$ ice



# Software de Acoplamento

## Acoplamento implícito e a grade de troca

### Paralelismo no acoplador FMS

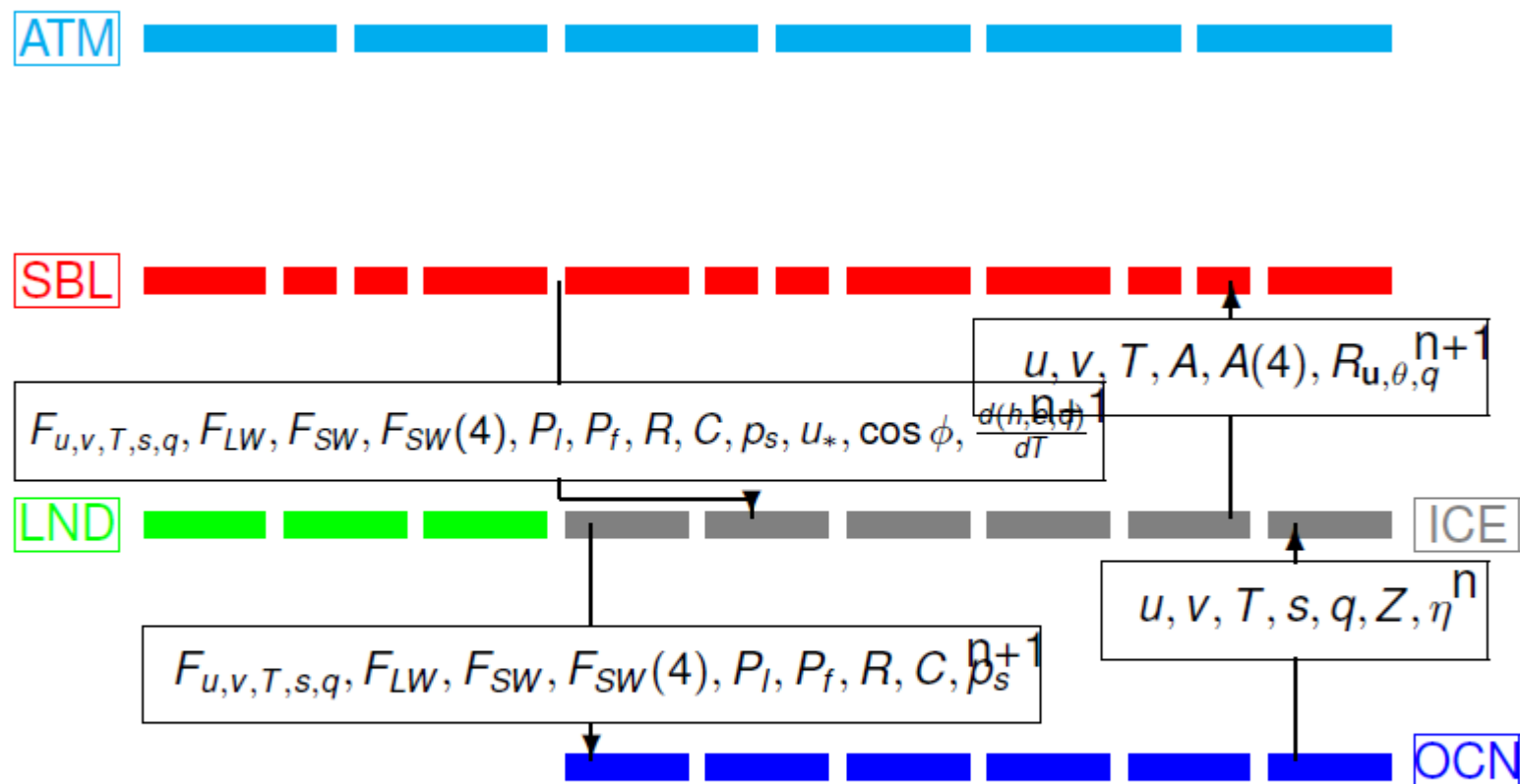




# Software de Acoplamento

## Paralelismo no acoplador FMS

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





## 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.

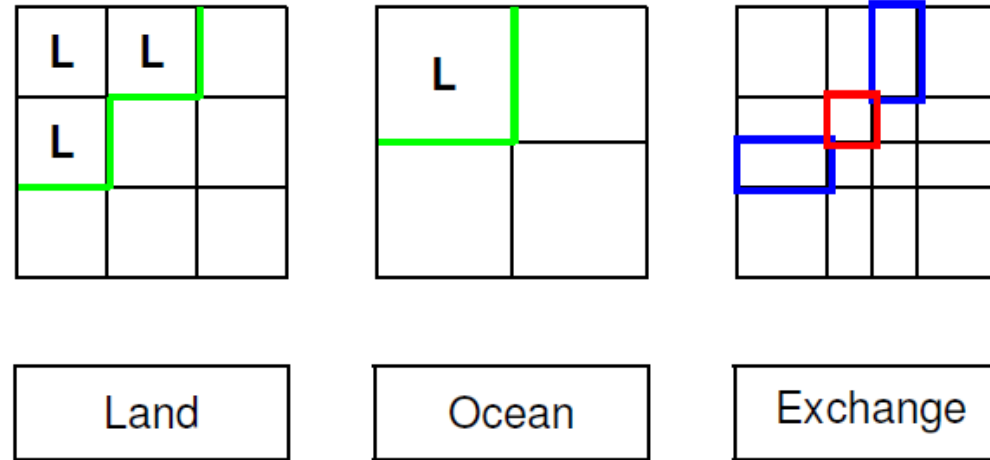
**Grades fisicamente idênticas** (por exemplo, gelo oceânico e oceano) trocam dados **sem interpolação**.

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 **benchmarks** 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)**

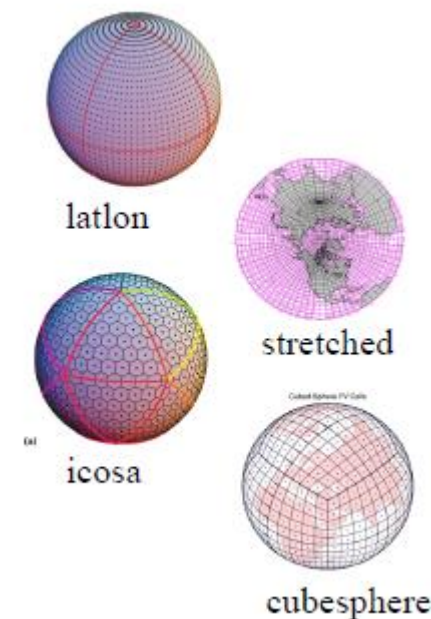


# Componente Stand alone do **benchmark**



## 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, matrizes em módulos 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)





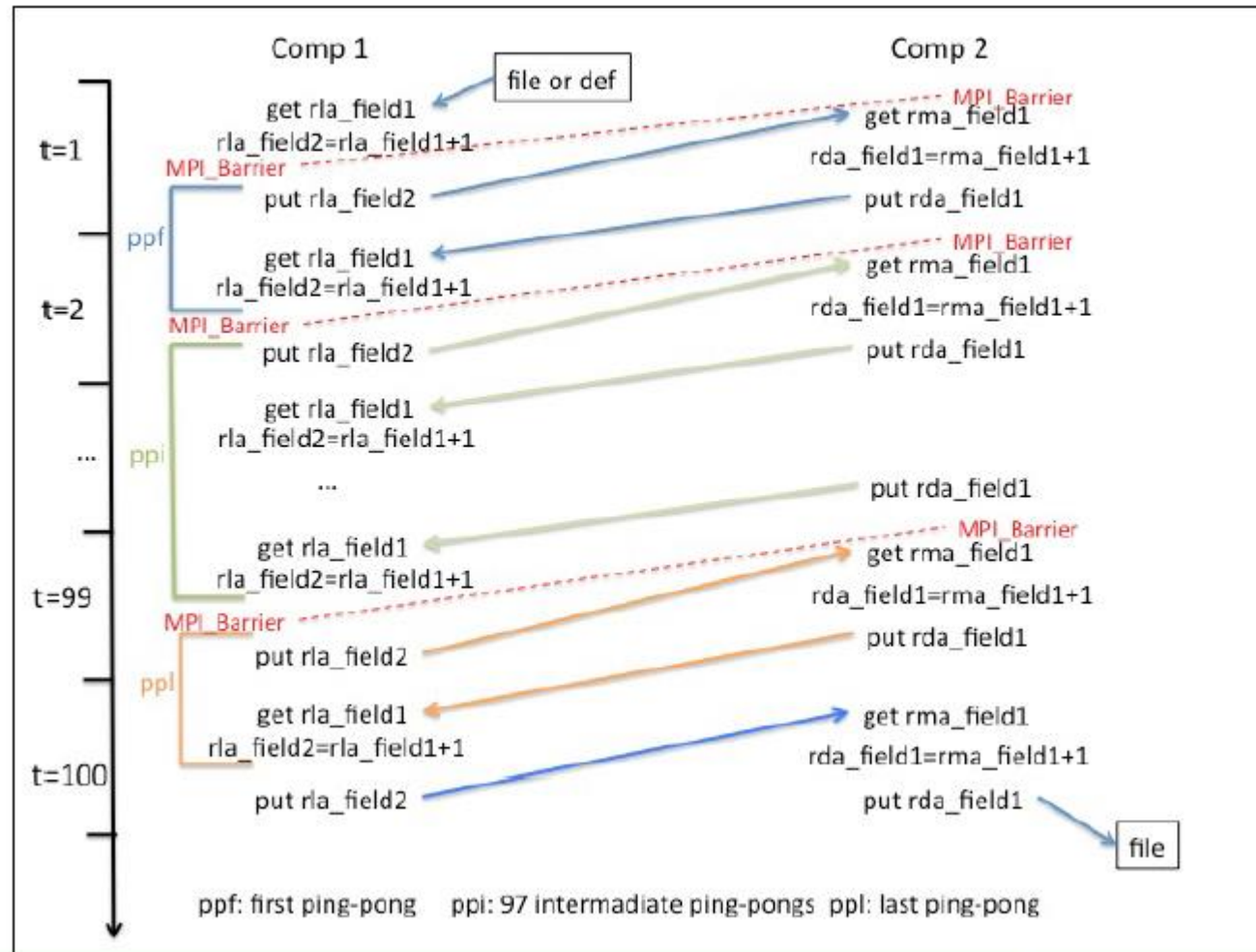


# Teste Case do benchmark



## Coupled test case implementation

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





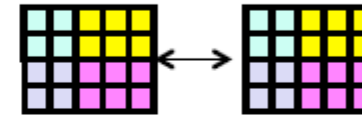
# Configuração do benchmark



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



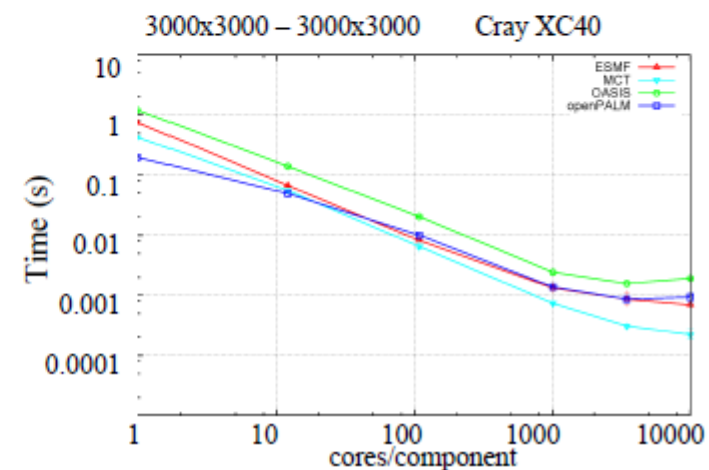
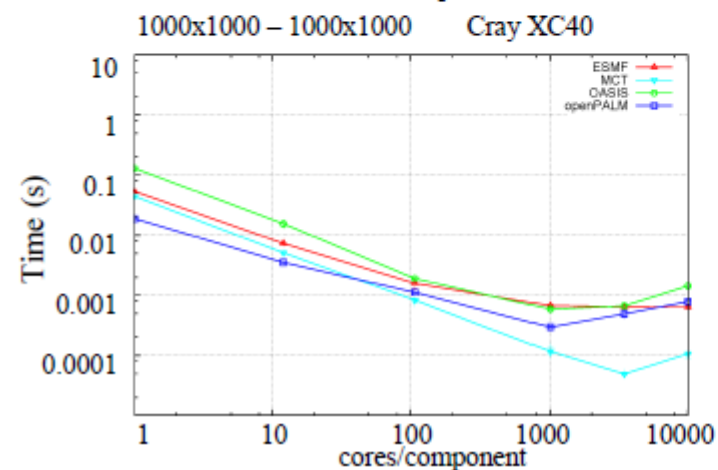
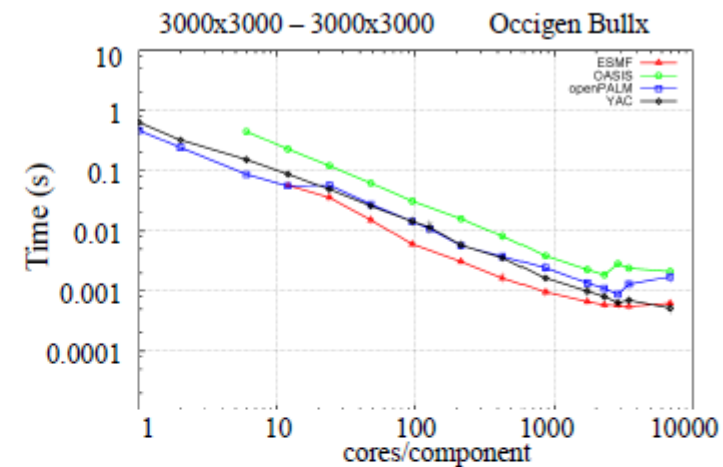
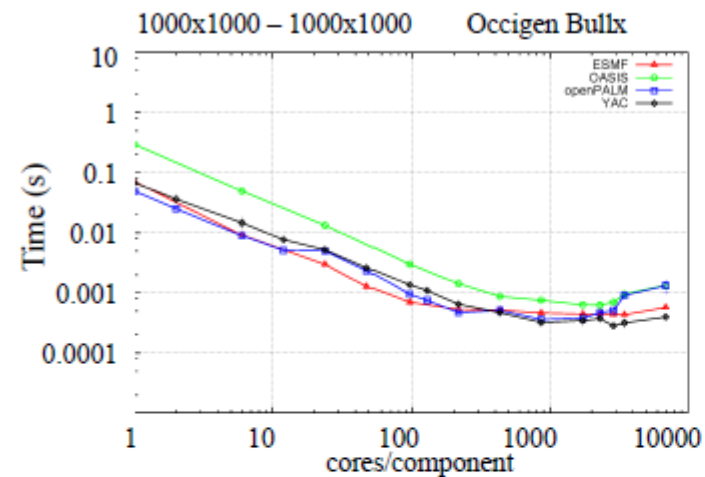
# Resultado do benchmark



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:



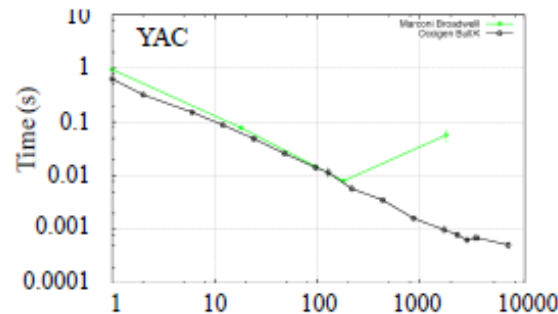
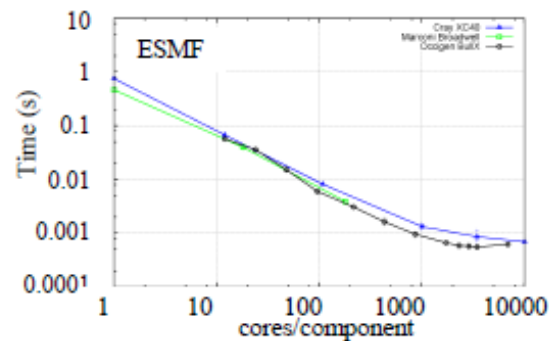
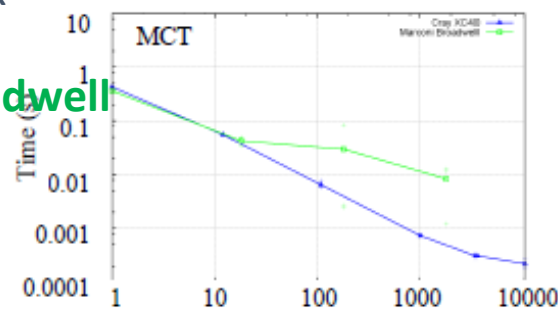
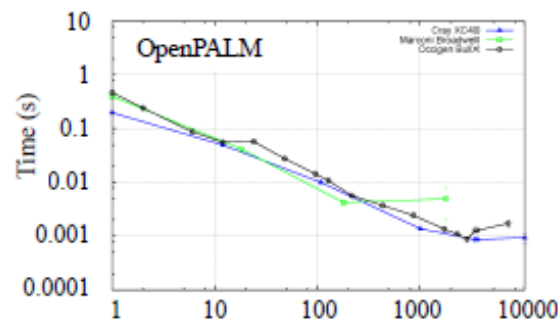
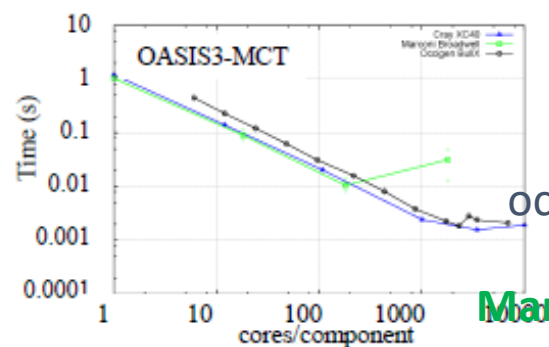


# Resultado do benchmark



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

occigenBullx

Marconi Broadwell



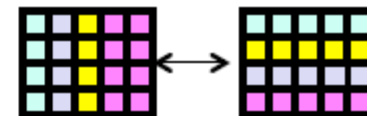
# Resultado do benchmark



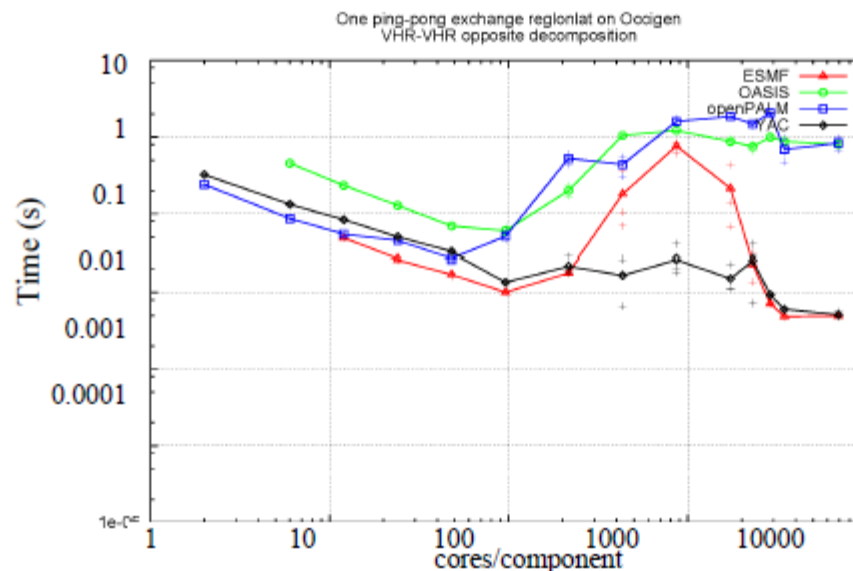
First results of specific coupled cases on specific platforms

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





# Software de Acoplamento

