

II CTMG – Segundo Curso de Treinamento de Modelagem Global do CPTEC/INPE

Training Brazilian Atmospheric Model (BAM)

Cachoeira Paulista-SP
CPTEC/INPE
03 Dezembro 2018
Dr. Paulo Yoshio Kubota



Sumário

Treinamento

Treinamento do CPTEC em Modelagem Global da Atmosfera em Novembro de 2018.

O CPTEC é líder em desenvolvimento da modelagem atmosférica no Brasil. Nossos pesquisadores têm mais de uma década de experiência no ensino, desenvolvimento de modelagem atmosférica e análise de previsão meteorológica de tempo e clima, para estudantes de todo o mundo. Enquanto, as aulas enfocam os aspectos teóricos e operacionais do modelo BAM suportado pelo CPTEC, elas combinam a prática de modelagem com palestras sobre as teorias subjacentes e a ciência do software de modelagem.

O CPTEC oferece aulas em conjunto com as disciplinas anuais da pós-graduação, juntamente com pelo menos uma aula adicional (geralmente em fevereiro e março). Nossas aulas são realizadas em nosso centro de treinamento em Cachoeira Paulista, SP, Brasil. Também podemos organizar aulas fora do local em outros locais. As aulas on-line estão sendo planejadas.

Você deve fazer login no site do CPTEC para se inscrever em uma aula. Se você ainda não criou uma conta do CPTEC, poderá criar uma aqui.

Aulas oferecidas pelo CPTEC

Introdução ao Pré-processamento do Modelo BAM (Atmosfera)

Introdução ao Modelo do Modelo BAM (Atmosfera)

Introdução ao Pré-processamento do Modelo BAM (Atmosfera)

Ferramentas de análise estatística e gráfica (GRaDs, NCL)

Cursos Especiais (Fortran, OpenMp, MPI) CPTEC



Sumário

1-Pré-processamento do BAM

- Como gerar a condição de contorno do BAM
- Como fazer o processamento de SST, O3, umidade do solo, vegetação etc.
- Como criar a condição inicial.

2-Processamento do BAM

- Estrutura do modelo
- Inicialização do modelo.
- Dinâmica do modelo.
- Parametrizações físicas do modelo.
- Input e Output do modelo.

3-Pós-Processamento.

- Tipo de pós-processamento.
- Inclusão de novas variáveis
- Formato dos arquivos



Introdução ao Pré-processamento do Modelo BAM (Atmosfera)

Pré-Processing Brazilian Atmospheric Model

- **Como gerar a condição de contorno do BAM**
- **Como fazer o processamento de SST, O3, umidade do solo, vegetação etc.**
- **Como criar a condição inicial.**

Training_BAM/Doc_Pre_BAM/Estrutura_do_Pre_Processamento_BAM.pptx



Introdução ao Pré-processamento do Modelo BAM (Atmosfera)



Introdução ao Processamento do Modelo BAM (Atmosfera)

Brazilian Atmospheric Model

2-Processamento do BAM

- Estrutura do modelo
- Inicialização do modelo.
- Dinâmica do modelo.
- Parametrizações físicas do modelo.
- Input e Output do modelo.

Training_BAM/Doc_BAM/Estrutura_do_modelo_BAM.pptx



Introdução ao Processamento do Modelo BAM (Atmosfera)

Sumário

Método Numérico Avançado para modelagem do Sistema Terrestre.

Equações Governantes.

Dinâmica Hidrostática/Não Hidrostática.

Discretização Horizontal e Vertical.

Integração no Tempo, Advecção e Esquema de alta ordem para a discretização no espaço.

Transformada Espectral.

Técnica Numérica para resolver as equações prognósticas no modelo BAM do CPTEC (BAM).

Parametrização dos processos físicos de subgrade:

Processos Considerados

Parametrização dos Efeitos orográfico de escala de subgrade.

Parametrização de Radiação em previsão numérica de tempo.

Processos Físicos de superfície continental.

Processo da camada limite planetária.

Parametrização dos processos úmidos (convecção e nuvens).

Equações Governantes.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{1}{a \cos^2 \varphi} \left(U \frac{\partial U}{\partial \lambda} + V \cos \varphi \frac{\partial U}{\partial \varphi} \right) + \dot{\sigma} \frac{\partial U}{\partial \sigma} - fV + \frac{1}{a} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \lambda} + RT \frac{\partial \ln(ps)}{\partial \lambda} \right) = F_u$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{a \cos^2 \varphi} \left(U \frac{\partial V}{\partial \lambda} + V \cos \varphi \frac{\partial V}{\partial \varphi} \right) + \dot{\sigma} \frac{\partial V}{\partial \sigma} + fU + \frac{\cos \varphi}{a} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \varphi} + RT \frac{\partial \ln(ps)}{\partial \varphi} \right) + \frac{\sin \varphi}{a \cos^2 \varphi} (U^2 + V^2) = F_v$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{a \cos^2 \varphi} \left(U \frac{\partial T}{\partial \lambda} + V \cos \varphi \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) + \dot{\sigma} \frac{\partial T}{\partial \sigma} - \theta \dot{\sigma} \frac{\partial \pi}{\partial \sigma} = kT \left(\frac{\partial}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \right) \ln(ps) + F_T$$

$$\frac{\partial q_n}{\partial t} + \frac{1}{a \cos^2 \varphi} \left(U \frac{\partial q_n}{\partial \lambda} + V \cos \varphi \frac{\partial q_n}{\partial \varphi} \right) + \dot{\sigma} \frac{\partial q_n}{\partial \sigma} = F_{q_n}$$

$$\frac{\partial \ln(ps)}{\partial t} + \int_0^1 \vec{V} \cdot \nabla \ln(ps) d\sigma + \int_0^1 D d\sigma = 0$$

$$U = u \cos(\varphi), \quad V = v \cos(\varphi) \text{ and } \vec{V} = (U, V)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} + \frac{RT}{\sigma} = 0$$

$$\sigma \frac{\partial ps}{\partial t} + \int_0^\sigma \nabla \cdot ps \vec{V} d\sigma = -ps \dot{\sigma}$$

Equações Governantes.

$$U = u \cos(\varphi), \quad V = v \cos(\varphi) \text{ and } \vec{V} = (U, V), \quad T = \pi \theta$$

T **Temperatura Virtual**

θ **Temperatura Potencial**

p_s **Pressão de superfície**

$\sigma = \frac{p}{p_s}$ **Coordenada vertical**

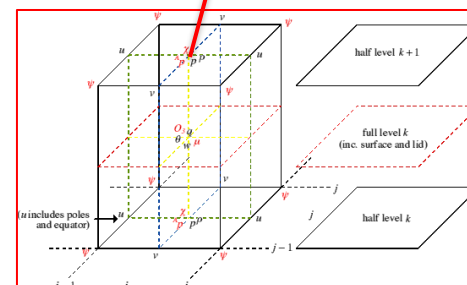
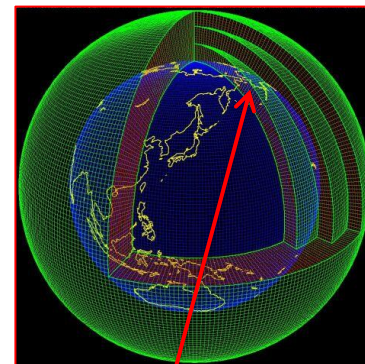
$\dot{\sigma}$ **Velocidade vertical**

f **Coriolis**

q **Umidade Especifica**

D **Divergência Horizontal**

F_u, F_v, F_T, F_q **termos de forçantes devido as parametrizações física**



Variáveis Prognosticas e Discretização Espectral

D Campo de Divergência

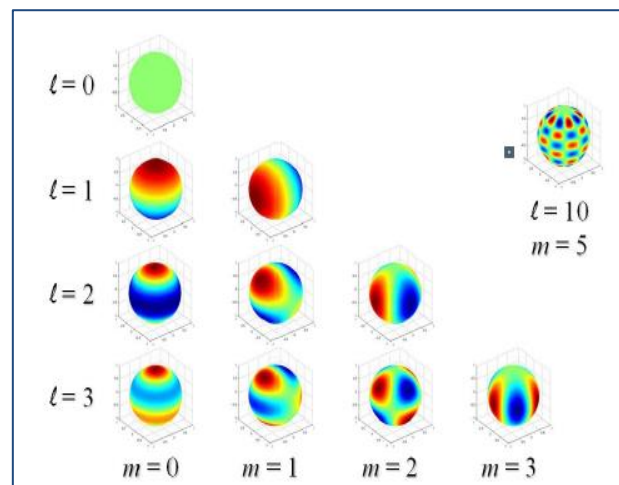
ξ Campo de Vorticidade

A velocidades U e V , são derivados de Campo de ξ e D

T Temperatura Virtual

q Umidade Especifica

$\ln(p_s)$ logaritmo da pressão de superfície (campo de 2 dimensões)



Será armazenada no espaço espectral . Em cada nível k , se armazena os coeficientes F_l^m de uma expansão. Dado que ,

$$F(\lambda, \varphi) = \sum_{m=-M}^M \sum_{n=|M|}^M F_n^m P_n^m(\sin(\varphi)) e^{im\lambda}$$

,onde tem-se empregado um truncamento triangular, para cada campo prognóstico F .



Introdução ao Processamento do Modelo BAM (Atmosfera)

O principal aspecto da reformulação

Modelo BAM usa um Formalismo Euleriano para tratar a advecção



Necessidade de adaptar o modelo para tratar a advecção usando um formalismo Semi-Lagrangiano



Esta mudança implica em um novo Formalismo Euleriano para tratar a advecção



Introdução ao Processamento do Modelo BAM (Atmosfera)

O principal aspecto da reformulação

Podemos escrever o Sistema de Equação

$$\frac{\partial W}{\partial t} + L(W) + N(W) = 0$$

W será o vetor das variáveis prognósticas para as equações primitivas

O operador diferencial é separado no operador N e L .

N = inclui a não linearidade do sistema.

L = inclui a parte linear do sistema



Introdução ao Processamento do Modelo BAM (Atmosfera)

O principal aspecto da reformulação

No modelo **Euleriano** atual o sistema pede discretizado no tempo como:

$$(I + \Delta t L)(W(t + \Delta t)) = (I - \Delta t L)(W(t - \Delta t)) - 2\Delta t N(W(t))$$

O operador Não linear $N(W)$ é resolvido com a ajuda da transformação espectral

Onde inclui os termos de advecção horizontal $\vec{V} \cdot \nabla F$ (onde F é U, V, T, q, \dots)

$$\vec{V} \cdot \nabla F = \nabla \cdot (\vec{V} F) - F(\nabla \cdot \vec{V}) = \nabla \cdot (\vec{V} F) - F D$$

$$D = \nabla \cdot \vec{V} \text{ divergência horizontal}$$

O produto é resolvido no espaço físico (grid-point) e as derivadas são obtidas através da transformação espectral.

A solução do sistema é feita totalmente no espaço espectral

O principal aspecto da reformulação

A **nova formulação** das equações primitivas

$$\frac{dW}{dx} = \frac{\partial W}{\partial t} + A(W) = -\tilde{L}(W) - \tilde{N}(W)$$

Nesta formulação isola-se o termo de advecção em $A(W)$.

\tilde{L} contém a parte linear tratada implicitamente

\tilde{N} contém a contribuição não linear

$$(I + \Delta t \tilde{L})(W(t + \Delta t)) = (I - \Delta t \tilde{L})(W(t - \Delta t))_* - 2\Delta t \tilde{N}(W(t))_M$$

$()_*$ define o ponto de partida de uma partícula em $(t - \Delta t)$ chegando em um ponto de grade gaussiano no tempo $(t + \Delta t)$.

$()_M$ define o ponto médio da trajetória no tempo (t)



Introdução ao Processamento do Modelo BAM (Atmosfera)

O principal aspecto da reformulação

A velha formulação das equações primitivas

$$\frac{\partial W}{\partial t} + L(W) + N(W) = 0$$

$$(I + \Delta t L)(W(t + \Delta t)) = (I - \Delta t L)(W(t - \Delta t)) - 2\Delta t N(W(t))$$

A nova formulação das equações primitivas

$$\frac{dW}{dx} = \frac{\partial W}{\partial t} + A(W) = -\tilde{L}(W) - \tilde{N}(W)$$

$$(I + \Delta t \tilde{L})(W(t + \Delta t)) = (I - \Delta t \tilde{L})(W(t - \Delta t))_* - 2\Delta t \tilde{N}(W(t))_M$$

A **principal diferença**, além da absorção da advecção nas trajetórias lagrangianas, é que o operador \tilde{L} e \tilde{N} terá que ser completamente **resolvido** no espaço da **malha** no ponto determinado pelas trajetórias Lagrangeanas.

Os operadores \tilde{L} e \tilde{N} são resolvidos em um determinado instante **t** e os valores no ponto da trajetória será obtido por interpolação.

Somente após resolver o lado direito da equação se inclui as tendência devido as parametrizações físicas e transforma para o espaço espectral para finalizar a resolução.

O principal aspecto da reformulação

A nova formulação das equações primitivas

$$\frac{dW}{dx} = \frac{\partial W}{\partial t} + A(W) = -\tilde{L}(W) - \tilde{N}(W)$$

$$(I + \Delta t \tilde{L})(W(t + \Delta t)) = (I - \Delta t \tilde{L})(W(t - \Delta t))_* - 2\Delta t \tilde{N}(W(t))_M$$

Este novo esquema tem uma opção de discretização Euleriana como opção.

$$(I + \Delta t \tilde{L})(W(t + \Delta t)) = (I - \Delta t \tilde{L})(W(t - \Delta t)) - 2\Delta t (A(W(t)) + \tilde{N}(W(t)))$$

Para esta **versão euleriana** os termos de **advecção** são adicionados a tendência, e todos os termos do **lado direito** são resolvidos na grade gaussiana sem a **necessidade de interpolação**.

Para esta **versão Semi-Lagrangiana** os termos de advecção não são adicionados a tendência, Necessita-se **Calcular a trajetória** e interpolar a contribuição no lado direito da equação calculada sobre a grade gaussiana, no ponta da trajetória.



Introdução ao Processamento do Modelo BAM (Atmosfera)

Discretização Euleriana Semi-Implicíta

Emprega-se esquema semi-implícito de 3 níveis no tempo. Separa-se $T = T' + T_o$ e T_o é uma constante na vertical.

Equação de Momentum

$$U^{n+1} + \frac{\Delta t}{a} \left(\frac{\partial \phi}{\partial \lambda} + RT_o \frac{\partial \ln(p_s)}{\partial \lambda} \right)^{n+1} = U^{n-1} + 2\Delta t T_U$$

$$T_U = F_u^n - \frac{1}{a \cos^2(\varphi)} \left(U \frac{\partial U}{\partial \lambda} + V \cos(\varphi) \frac{\partial U}{\partial \varphi} \right)^n - \left(\dot{\sigma} \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right)^n + fV^n - \frac{1}{a} \left(RT' \frac{\partial \ln(p_s)}{\partial \lambda} \right)^n - \frac{1}{2a} \left(\frac{\partial \phi}{\partial \lambda} + RT_o \frac{\partial \ln(p_s)}{\partial \lambda} \right)^{n-1}$$

$$V^{n+1} + \frac{\cos(\varphi) \Delta t}{a} \left(\frac{\partial \phi}{\partial \varphi} + RT_o \frac{\partial \ln(p_s)}{\partial \varphi} \right)^{n+1} = V^{n-1} + 2\Delta t T_V$$

$$T_V = F_v^n - \frac{1}{a \cos^2(\varphi)} \left(U \frac{\partial V}{\partial \lambda} + V \cos(\varphi) \frac{\partial V}{\partial \varphi} \right)^n - \left(\dot{\sigma} \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right)^n - fU^n - \frac{\cos(\varphi)}{a} \left(RT' \frac{\partial \ln(p_s)}{\partial \varphi} \right)^n - \frac{\sin(\varphi)}{a \cos^2(\varphi)} (U^2 + V^2)^n - \frac{\cos(\varphi)}{2a} \left(\frac{\partial \phi}{\partial \varphi} + RT_o \frac{\partial \ln(p_s)}{\partial \varphi} \right)^{n-1}$$



Introdução ao Processamento do Modelo BAM (Atmosfera)

Discretização Euleriana Semi-Implicita

Emprega-se esquema semi-implícito de 3 níveis no tempo. Separa-se $T = T' + T_o$ e T_o é uma constante na vertical.

Equação de Termodinâmica

$$T_T^{n-1} = T_T^{n-1} - \frac{1}{2} \left(k T_o \int_0^1 D d\hat{\sigma} \right)^{t_n-1}$$



Introdução ao Processamento do Modelo BAM (Atmosfera)

Discretização Euleriana Semi-Implicíta

Emprega-se esquema semi-implícito de 3 níveis no tempo. Separa-se $T = T' + T_o$ e T_o é uma constante na vertical.

Equação de umidade específica é tratada explicitamente

$$q^{n+1} = q^{n-1} + 2\Delta t T_q$$

$$T_q = F_q^n - \frac{1}{a \cos^2 \varphi} \left(U \frac{\partial q}{\partial \lambda} + V \cos(\varphi) \frac{\partial q}{\partial \varphi} \right)^n - \left(\dot{\sigma} \frac{\partial q}{\partial \sigma} \right)^n$$



Introdução ao Processamento do Modelo BAM (Atmosfera)

Discretização Euleriana Semi-Implicita

Emprega-se esquema semi-implícito de 3 níveis no tempo. Separa-se $T = T' + T_o$ e T_o é uma constante na vertical.

Equação de Pressão de Superfícies

$$\ln(p_s)^{n+1} + \Delta t \left(\int_0^1 D d\sigma \right)^{n+1} = \ln(p_s)^{n-1} + 2\Delta t T_{ps}$$

$$T_{ps} = - \left(\int_0^1 (\vec{V} \cdot \nabla \ln(p_s) d\sigma) \right)^n - \frac{1}{2} \left(\int_0^1 D d\sigma \right)^{n-1}$$



Introdução ao Processamento do Modelo BAM (Atmosfera)

Discretização Semi-Lagrangiana Semi-Implícita

- **Segue o esquema Euleriano.**
- **Os termos de advecção horizontal e vertical não são inclusos na tendência**
- **As tendências são separadas em partes relacionadas ao instante t e $t - \Delta t$ e interpolada correspondendo a localização da trajetória**



Introdução ao Processamento do Modelo BAM (Atmosfera)

Evolução do TimeStep

- **Leap Frog**



Introdução ao Processamento do Modelo BAM (Atmosfera)

Transformação Spectral para grade

- **Primeiro é derivar os coeficientes de alguns campos que são necessários para a transformada.**

No caso das velocidades U e V, e os componentes meridionais do gradiente de T , q e $\ln(p_s)$

$$U_n^m = \frac{1}{a} (im\chi_n^m + (n-1)\xi_n^m\psi_{n-1}^m - (n+2)\varepsilon_{n+1}^m\psi_{n+1}^m)$$

$$V_n^m = \frac{1}{a} (im\chi_n^m - (n-1)\xi_n^m\psi_{n-1}^m + (n+2)\varepsilon_{n+1}^m\psi_{n+1}^m)$$

$$\chi_n^m = -\left(\frac{a^2}{n(n+1)}\right) D_n^m \quad \psi_n^m = -\left(\frac{a^2}{n(n+1)}\right) \xi_n^m \quad \chi_0^0 = \xi_0^0 = 0$$

Introdução ao Processamento do Modelo BAM (Atmosfera)

Transformação Espectral para grade

Os coeficientes para a componente meridional do gradiente de qualquer campo F .

$$\left(\cos(\varphi) \frac{\partial F}{\partial \varphi} \right)_n^m = (-(n-1)\xi_n^m F_{n-1}^m + (n+2)\varepsilon_{n+1}^m F_{n+1}^m)$$

Após este passo realiza-se a transformada de Legendre

$$F^m(\varphi) = \sum_{n=|m|}^M F_n^m P_n^m(\sin(\varphi))$$

$$U(\varphi), V(\varphi), D(\varphi), \xi(\varphi), q(\varphi), T(\varphi), \ln(p_s(\varphi)), \cos(\varphi) \left(\frac{\partial T(\varphi)}{\partial \varphi} \right), \cos(\varphi) \frac{\partial q(\varphi)}{\partial \varphi}, e \cos(\varphi) \frac{\partial \ln(p_s(\varphi))}{\partial \varphi},$$

Após próximo passo realiza-se a transformada de Fourier

$$F(\lambda, \varphi) = \sum_{n=-M}^M F^m(\varphi) e^{im\lambda}$$

$$U(\lambda, \varphi), V(\lambda, \varphi), D(\lambda, \varphi), \xi(\lambda, \varphi), q(\lambda, \varphi), T(\lambda, \varphi), \ln(p_s(\lambda, \varphi)),$$

$$\frac{\partial U(\lambda, \varphi)}{\partial \lambda}, \frac{\partial V(\lambda, \varphi)}{\partial \lambda}, \frac{\partial T(\lambda, \varphi)}{\partial \lambda}, \frac{\partial q(\lambda, \varphi)}{\partial \lambda}, \frac{\partial \ln(p_s)(\lambda, \varphi)}{\partial \lambda}, \cos(\varphi) \left(\frac{\partial T(\lambda, \varphi)}{\partial \varphi} \right), \cos(\varphi) \frac{\partial q(\lambda, \varphi)}{\partial \varphi}, e \cos(\varphi) \frac{\partial \ln(p_s(\lambda, \varphi))}{\partial \varphi},$$

Introdução ao Processamento do Modelo BAM (Atmosfera)

Transformação Espectral para grade

```
SUBROUTINE PhysBackTrans()
  USE FieldsDynamics, ONLY : &
    qqp, & ! intent(in)
    qtmpp, & ! intent(in)
    fgtmp, & ! intent(out)
    fgq ! intent(out)
```

```
  USE Transform, ONLY: &
    CreateSpecToGrid, &
    DepositSpecToGrid, &
    DoSpecToGrid, &
    DestroySpecToGrid
```

```
  IMPLICIT NONE
```

```
  !$OMP SINGLE
```

```
  CALL CreateSpecToGrid(2, 0, 2, 0)
```

```
  CALL DepositSpecToGrid(qqp, fgq)
```

```
  CALL DepositSpecToGrid(qtmpp, fgtmp)
```

```
  !$OMP END SINGLE
```

```
  CALL DoSpecToGrid()
```

```
  !$OMP BARRIER
```

```
  !$OMP SINGLE
```

```
  CALL DestroySpecToGrid()
```

```
  !$OMP END SINGLE
```

```
END SUBROUTINE PhysBackTrans
```

2 variáveis espectrais

```
SUBROUTINE CreateSpecToGrid(nFullSpec, nSurfSpec, nFullGrid, nSurfGrid)
  INTEGER, INTENT(IN) :: nFullSpec
  INTEGER, INTENT(IN) :: nSurfSpec
  INTEGER, INTENT(IN) :: nFullGrid
  INTEGER, INTENT(IN) :: nSurfGrid
  CHARACTER(LEN=*) , PARAMETER :: h="**(CreateSpecToGrid)**"
```

Computação em espaço de ponto de grade

Gradiente do vento completo (Somente no Euleriano)

```
SUBROUTINE delwind(ulam, vlam, vor, div, uphi, vphi, cos2lat, &
```

```
    ibMax, kMax, ibLim)
```

```
    INTEGER, INTENT(IN) :: ibMax
```

```
    INTEGER, INTENT(IN) :: kMax
```

```
    REAL(KIND=r8), INTENT(IN) :: cos2lat(ibMax)
```

```
    REAL(KIND=r8), INTENT(IN) :: ulam(ibMax,kMax)
```

```
    REAL(KIND=r8), INTENT(IN) :: vlam(ibMax,kMax)
```

```
    REAL(KIND=r8), INTENT(IN) :: div (ibMax,kMax)
```

```
    REAL(KIND=r8), INTENT(IN) :: vor (ibMax,kMax)
```

```
    REAL(KIND=r8), INTENT(OUT) :: uphi(ibMax,kMax)
```

```
    REAL(KIND=r8), INTENT(OUT) :: vphi(ibMax,kMax)
```

```
    INTEGER, INTENT(IN) :: ibLim
```

```
    INTEGER :: ib, k
```

```
    !
```

```
    ! From the vorticity, divergence and the e-w derivatives of
    ! U and V, computes the values of cos(phi) d/c phi F , where F = U,
    ! and F = V.
    !
```

```
    !
```

```
    DO k=1,kMax
```

```
        DO ib=1,ibLim
```

```
            uphi(ib,k) = vlam(ib,k) - cos2lat(ib) * vor(ib,k)
```

```
            vphi(ib,k) = - ulam(ib,k) + cos2lat(ib) * div(ib,k)
```

```
        ENDDO
```

```
    ENDDO
```

```
END SUBROUTINE delwind
```

$$\cos(\varphi) \frac{\partial U}{\partial \varphi} = \frac{\partial V}{\partial \lambda} - (a \cos^2 \varphi) \xi$$

$$\cos(\varphi) \frac{\partial V}{\partial \varphi} = - \frac{\partial U}{\partial \lambda} + (a \cos^2 \varphi) D$$



Introdução ao Processamento do Modelo BAM (Atmosfera)

Computação em espaço de ponto de grade

Integral vertical da divergência

```
SUBROUTINE vertint(slagr,zsint,psint, adveps, divint, divintm, dot, &  
  u, v, div, divm, plam, pphi, zlam, zphi, rcl, del, ibMax, kMax, ibLim)  
  
  k=1  
  DO i=1,ibLim  
    divint(i,k) = del(k) * div(i,k)  
    divintm(i,k) = del(k) * divm(i,k)  
  ENDDO  
  IF (slagr) THEN  
    DO i=1,ibLim  
      zsint(i) = del(k) * rcl(i)*(u(i,k)*zlam(i)+v(i,k)*zphi(i))  
    ENDDO  
  ENDIF  
  
  DO k=2,kMax  
    DO i=1,ibLim  
      divint(i,k) = divint(i,k-1) + del(k) * div(i,k)  
      divintm(i,k) = divintm(i,k-1) + del(k) * divm(i,k)  
    ENDDO  
    IF (slagr) THEN  
      DO i=1,ibLim  
        zsint(i) = zsint(i) + del(k)*rcl(i)*(u(i,k)*zlam(i)+v(i,k)*zphi(i))  
      ENDDO  
    ENDIF  
  ENDDO  
  
END SUBROUTINE vertint
```

$$\int_0^1 D d\sigma = \int_0^1 D d\hat{\sigma} = \sum_{l=1}^K D_l \Delta l$$

Onde $\Delta l = \Delta \hat{\sigma}$ e $\hat{\sigma}_l = 1 - \sigma_l$, K é o numero de camadas



Introdução ao Processamento do Modelo BAM (Atmosfera)

Computação em espaço de ponto de grade

Integração Vertical da advecção de ln (ps)

```
SUBROUTINE vertint(slagr,zsint,psint, adveps, divint, divintm, dot, &  
    u, v, div, divm, plam, pphi, zlam, zphi, rcl, del, ibMax, kMax, ibLim)
```

```
INTEGER :: i, k  
!
```

```
DO k=1,kMax  
    DO i=1,ibLim  
        adveps(i,k) = rcl(i)*(u(i,k) * plam(i) + v(i,k) * pphi(i) )  
    ENDDO
```

```
ENDDO  
k=1  
DO i=1,ibLim  
    dot(i,k) = 0.0_r8  
    psint(i,k) = del(k) * adveps(i,k)
```

```
ENDDO
```

```
DO k=2,kMax  
    DO i=1,ibLim  
        psint(i,k) = psint(i,k-1) + del(k) * adveps(i,k)
```

```
    ENDDO
```

```
ENDDO
```

```
END SUBROUTINE vertint
```

$$\int_0^1 \vec{V} \cdot \nabla \ln(p_s) d\sigma = \sum_{l=1}^K \vec{V} \cdot \nabla \ln(p_s)_l \Delta_l$$



Introdução ao Processamento do Modelo BAM (Atmosfera)

Computação em espaço de ponto de grade

Calculo do $\hat{\sigma}$ usando a equação da continuidade:

```

SUBROUTINE vertint(slagr,zsint,psint, adveps, divint, divintm, dot, &
  u, v, div, divm, plam, pphi, zlam, zphi, rcl, del, ibMax, kMax, ibLim)
  DO k=1,kMax
    DO i=1,ibLim
      adveps(i,k) = rcl(i)*(u(i,k) * plam(i) + v(i,k) * pphi(i) )
    ENDDO
  ENDDO
  k=1
  DO i=1,ibLim
    dot(i,k) = 0.0_r8
    psint(i,k) = del(k) * adveps(i,k)
    divint(i,k) = del(k) * div(i,k)
    divintm(i,k) = del(k) * divm(i,k)
  ENDDO
  DO k=2,kMax
    DO i=1,ibLim
      psint(i,k) = psint(i,k-1) + del(k) * adveps(i,k)
      divint(i,k) = divint(i,k-1) + del(k) * div(i,k)
      divintm(i,k) = divintm(i,k-1) + del(k) * divm(i,k)
    ENDDO
  ENDDO
  DO k=1,kMax-1
    DO i=1,ibLim
      dot(i,k+1)=dot(i,k) + del(k) * ( divint(i,kMax) + psint(i,kMax) &
        - div(i,k) - adveps(i,k) )
    ENDDO
  ENDDO
END SUBROUTINE vertint

```

$$\hat{\sigma} \frac{\partial \ln(p_s)}{\partial t} + \int_0^{\hat{\sigma}} (D + \vec{V} \cdot \nabla \ln(p_s)) d\hat{\sigma} + \dot{\hat{\sigma}} = 0$$

$$\frac{\partial \ln(ps)}{\partial t} + \int_0^1 \vec{V} \cdot \nabla \ln(ps) d\sigma + \int_0^1 D d\sigma = 0$$

$$\dot{\hat{\sigma}}_k = \hat{\sigma}_k \int_0^1 (D + \vec{V} \cdot \nabla \ln(p_s)) d\hat{\sigma} - \int_0^{\hat{\sigma}_k} (D + \vec{V} \cdot \nabla \ln(p_s)) d\hat{\sigma}$$

Considerando que: $\dot{\hat{\sigma}}_1 = \dot{\hat{\sigma}}_{K+1} = 0$

$$\dot{\hat{\sigma}}_{l+1} = \dot{\hat{\sigma}}_l + \Delta l \sum_{j=1}^K (D_j + \vec{V}_j \cdot \nabla \ln(p_s)) \Delta_j - \Delta_l (D_l + \vec{V}_l \cdot \nabla \ln(p_s))$$

Computação em espaço de ponto de grade

Calculo do $\omega = \frac{dp}{dt}$ velocidade vertical:

```

SUBROUTINE omega(omg, psint, adveps, divint, dot, ps, sl, &
  ibMax, kMax, ibLim)
  DO k=1,kMax-1
    DO i=1,ibLim
      omg(i,k) = ps(i) * ( sl(k) * &
        ( adveps(i,k) - psint(i,kMax) - divint(i,kMax) ) &
        - 0.5_r8 * ( dot(i,k+1) + dot(i,k) ) )
    ENDDO
  ENDDO
  k=kMax
  DO i=1,ibLim
    omg(i,k) = ps(i) * ( sl(k) * &
      ( adveps(i,k) - psint(i,kMax) - divint(i,kMax) ) &
      - 0.5_r8 * dot(i,k) )
  ENDDO
END SUBROUTINE omega

```

$$\frac{\partial \ln(ps)}{\partial t} + \int_0^1 \vec{V} \cdot \nabla \ln(ps) d\sigma + \int_0^1 D d\sigma = 0$$

$$\omega = p_s \left(\dot{\sigma} + \sigma \left(\frac{\partial \ln(p_s)}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \ln(p_s) \right) \right)$$

$$\omega_k = p_{sk} + \left(\frac{\dot{\hat{\sigma}}_{k+1} + \dot{\hat{\sigma}}_k}{2} + \hat{\sigma}_k \left(\vec{V}_k \cdot \nabla \ln(p_s) - \int_0^1 (\vec{V} \cdot \nabla \ln(p_s) + D) d\hat{\sigma} \right) \right)$$

Introdução ao Processamento do Modelo BAM (Atmosfera)

Computação em espaço de ponto de grade

Calculo do gradiente do geo potencial a partir da equação da hidrostática:

$$\frac{\partial \phi}{\partial \sigma} + \alpha p_s = 0$$

$$\alpha = \frac{1}{\rho} = \frac{RT}{P}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \sigma} + \frac{RT}{P} p_s = 0$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \sigma} + \frac{RT}{\sigma} = 0$$

$$\sigma \frac{\partial \phi}{\partial \sigma} + RT = 0$$

$$\sigma \frac{\partial \phi}{\partial \sigma} + RT = 0$$

$$\sigma \frac{\partial \phi}{\partial \sigma} + R\pi\theta = 0$$

$$T = \pi\theta$$

$$\pi = \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{R}{cp}} = (\sigma)^{\frac{R}{cp}}$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial \sigma} = \frac{R}{cp} \sigma^{\frac{R}{cp}-1} \frac{\partial \sigma}{\partial \sigma}$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial \sigma} = \frac{R}{cp} \sigma^{\frac{R}{cp}} \sigma^{-1} \frac{\partial \sigma}{\partial \sigma}$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial \sigma} = \frac{R}{cp} \sigma^{\frac{R}{cp}} \sigma^{-1}$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial \sigma} = \frac{R}{cp} \frac{\pi}{\sigma}$$

$$R\pi = \sigma cp \frac{\partial \pi}{\partial \sigma}$$

$$\sigma \frac{\partial \phi}{\partial \sigma} + cp\theta\sigma \frac{\partial \pi}{\partial \sigma} = 0$$



Introdução ao Processamento do Modelo BAM (Atmosfera)

Computação em espaço de ponto de grade

Calculo do gradiente do geo potencial a partir da equação da hidrostática:

$$\sigma \frac{\partial \phi}{\partial \sigma} + cp\theta\sigma \frac{\partial \pi}{\partial \sigma} = 0$$

$$\frac{\Delta \phi}{\Delta \sigma} + cp\theta \frac{\Delta \pi}{\Delta \sigma} = 0$$

$$\Delta \phi + cp\theta \Delta \pi = 0$$

$$T = \pi\theta$$

$$\Delta \phi + cp\Delta \theta \pi = 0$$

Discretização de Arakawa

$$\phi_{k-1} - \phi_k = \frac{cp}{2} \left[T_{k-1} \left(\frac{\pi_k}{\pi_{k-1}} - 1 \right) + T_k \left(1 - \frac{\pi_{k-1}}{\pi_k} \right) \right], k = 2, \dots, K$$



Introdução ao Processamento do Modelo BAM (Atmosfera)

Computação em espaço de ponto de grade

Calculo do gradiente do geo potencial a partir da equação da hidrostática:

Discretização de Arakawa

$$\phi_{k-1} - \phi_k = \frac{cp}{2} \left[T_{k-1} \left(\frac{\pi_k}{\pi_{k-1}} - 1 \right) + T_k \left(1 - \frac{\pi_{k-1}}{\pi_k} \right) \right], k = 2, \dots, K$$

$$\sum_{j=1}^K \phi_j \Delta_j = \hat{\phi}_1 + R \sum_{j=1}^K T_j \Delta_j,$$

Onde $\hat{\phi}_1$ é a superfície geopotencial.

$$\frac{\phi_k - \phi_{k-1}}{\Delta_{k-1}} = \frac{cp}{2} \left(\frac{T_{k-1}}{\pi_{k-1}} + \frac{T_k}{\pi_k} \right) \left(\frac{\pi_k - \pi_{k-1}}{\Delta_{k-1}} \right) = \frac{cp}{2} (\theta_{k-1} + \theta_k) \left(\frac{\pi_k - \pi_{k-1}}{\Delta_{k-1}} \right)$$

Computação em espaço de ponto de grade

Calculo do gradiente do geo potencial a partir da equação da hidrostática:

```
SUBROUTINE delgeo (tlam, zlam, zslam, tphi, zphi, zsphi, hmt, imx, imax, kmax)
```

```
  INTEGER :: k,j,i
```

```
  !
```

```
  DO k = 1, kmax
```

```
    DO i = 1, imax
```

```
      zlam(i,k) = zslam(i)
```

```
      zphi(i,k) = zsphi(i)
```

```
    END DO
```

```
  END DO
```

```
  DO k = 1, kMax
```

```
    DO i = 1, iMax
```

```
      DO j = 1, kMax
```

```
        zlam(i,k) = zlam(i,k) + (tlam(i,j)*hmt(j,k))
```

```
        zphi(i,k) = zphi(i,k) + (tphi(i,j)*hmt(j,k))
```

```
      END DO
```

```
    END DO
```

```
  END DO
```

```
END SUBROUTINE delgeo
```

$$\sum_{j=1}^K \phi_j \Delta_j = \hat{\phi}_1 + R \sum_{j=1}^K T_j \Delta_j,$$

Onde $\hat{\phi}_1$ é a superfície geopotencial.

$$\frac{\phi_k - \phi_{k-1}}{\Delta_{k-1}} = \frac{cp}{2} \left(\frac{T_{k-1}}{\pi_{k-1}} + \frac{T_k}{\pi_k} \right) \left(\frac{\pi_k - \pi_{k-1}}{\Delta_{k-1}} \right) = \frac{cp}{2} (\theta_{k-1} + \theta_k) \left(\frac{\pi_k - \pi_{k-1}}{\Delta_{k-1}} \right)$$



Introdução ao Processamento do Modelo BAM (Atmosfera)

Computação em espaço de ponto de grade

Calculo do da tendencias : equação de momentum :

$$t_{n-1} = t - \Delta t$$

A contribuição do tempo $t - \Delta t$ será adicionado a tendência

$$T_U^{n-1} = T_U^{n-1} - \frac{1}{2a} \left(\frac{\partial \phi}{\partial \lambda} + RT_0 \frac{\partial \ln(p_s)}{\partial \lambda} \right)^{t_{n-1}}$$

$$T_V^{n-1} = T_V^{n-1} - \frac{\cos(\varphi)}{2a} \left(\frac{\partial \phi}{\partial \varphi} + RT_0 \frac{\partial \ln(p_s)}{\partial \varphi} \right)^{t_{n-1}}$$

Armazenado para ser
usado no timestep seguinte

$$t_n = t$$

Temos de advecção horizontal (somente esquema Euleriano)

$$T_U^n = T_U^n - \frac{1}{a \cos^2 \varphi} \left(U \frac{\partial U}{\partial \lambda} + V \cos(\varphi) \frac{\partial U}{\partial \varphi} \right)^{t_n}$$

$$T_V^n = T_V^{n-1} - \frac{1}{a \cos^2 \varphi} \left(U \frac{\partial V}{\partial \lambda} + V \cos(\varphi) \frac{\partial V}{\partial \varphi} \right)^{t_n}$$

Computação em espaço de ponto de grade

Calculo do da tendencias : equação de momentum :

$t_n = t$ **Temos de advecção horizontal (somente esquema Euleriano)**

$$T_U^n = T_U^n - \frac{1}{a \cos^2 \varphi} \left(U \frac{\partial U}{\partial \lambda} + V \cos(\varphi) \frac{\partial U}{\partial \varphi} \right)^{t_n}$$

$$T_V^n = T_V^{n-1} - \frac{1}{a \cos^2 \varphi} \left(U \frac{\partial V}{\partial \lambda} + V \cos(\varphi) \frac{\partial V}{\partial \varphi} \right)^{t_n}$$

```
SUBROUTINE hadvec(u, v, flam, fphi, tend, rcl, ibMax, kMax, ibLim)
  REAL(KIND=r8),    INTENT(IN  ) :: rcl(ibMax) ! 1.0 r8 / ( cos(lat)**2 )
  REAL(KIND=r8),    INTENT(OUT) :: tend(ibMax,kMax)
  !
  ! Computes the horizontal advection term of field f (whose horizontal
  ! derivatives are given in flam and fphi) and add its contribution to current
  ! tendency (stored in tend).
  !
  INTEGER :: i, k
  DO k=1,kMax
    DO i=1,ibLim
      tend(i,k) = tend(i,k) - rcl(i) * (u(i,k)*flam(i,k) + v(i,k)*fphi(i,k))
    END DO
  END DO
END SUBROUTINE hadvec
```

Computação em espaço de ponto de grade

Calculo do da tendencias : equação de momentum :

A contribuição da advecção vertical

$$T_U^n = T_U^n - \frac{1}{2\Delta_k} \left(\dot{\sigma}_{k+1}(U_{k+1} - U_k) + \dot{\sigma}_k(U_k - U_{k-1}) \right)^{t_n}$$

$$T_V^n = T_V^n - \frac{1}{2\Delta_k} \left(\dot{\sigma}_{k+1}(V_{k+1} - V_k) + \dot{\sigma}_k(V_k - V_{k-1}) \right)^{t_n}$$

```
SUBROUTINE vadvec(f, dot, rdel2, tend, ibMax, kMax, ibLim)
  k=1
  DO i=1,ibLim
    tend(i,k) = tend(i,k) - rdel2(k) * (dot(i,k+1)*(f(i,k+1)-f(i,k)))
  ENDDO
  DO k=2,kMax-1
    DO i=1,ibLim
      tend(i,k) = tend(i,k) - rdel2(k) * (dot(i,k+1)*(f(i,k+1)-f(i,k)) &
        + dot(i,k)*(f(i,k)-f(i,k-1)))
    ENDDO
  ENDDO
  k=kMax
  DO i=1,ibLim
    tend(i,k) = tend(i,k) - rdel2(k) * (dot(i,k)*(f(i,k)-f(i,k-1)))
  ENDDO
END SUBROUTINE vadvec
```

Computação em espaço de ponto de grade

Calculo do da tendencias : equação de momentum :

Termo de Coriolis $T_U^n = T_U^n + fV^{tn}$

$$T_V^n = T_V^n - fU^{tn}$$

```

SUBROUTINE coriol(u, v, tendu, tendv, fcor, ibMax, kMax, ibLim)
  REAL(KIND=r8),    INTENT(IN    ) :: fcor(ibMax) ! 2 * omega * sin(phi)

  DO k=1,kMax
    DO i=1,ibLim
      tendu(i,k) = tendu(i,k) + fcor(i) * v(i,k)
      tendv(i,k) = tendv(i,k) - fcor(i) * u(i,k)
    ENDDO
  ENDDO
END SUBROUTINE coriol

```

Computação em espaço de ponto de grade

Calculo do da tendencias : equação de momentum :

A contribuição do temo métrico (somente esquema Euleriano)

$$T_V^n = T_V^n - \frac{\sin(\varphi)}{\cos^2 \varphi} (U^2 + V^2) t_n$$

```

SUBROUTINE metric(u, v, tend, ercrossin, ibMax, kMax, ibLim)
  REAL(KIND=r8),    INTENT(IN    ) :: ercrossin(ibMax) ! sin(lat) / ( er * cos(lat)**2 )
  DO k=1,kMax
    DO i=1,ibLim
      tend(i,k) = tend(i,k) - ercrossin(i)*(u(i,k)*u(i,k) + v(i,k)*v(i,k))
    END DO
  END DO
END SUBROUTINE metric

```

Computação em espaço de ponto de grade

Calculo do da tendencias : equação de momentum :

Termo de não linear do gradiente de pressão

$$T_U^n = T_U^n - \left(\frac{RT'}{a} \frac{\partial \ln(p_s)}{\partial \lambda} \right)^{t_n}$$

$$T_V^n = T_V^n - \left(\frac{\cos(\varphi)RT'}{a} \frac{\partial \ln(p_s)}{\partial \varphi} \right)^{t_n}$$

```
SUBROUTINE nlprgr(plam, pphi, tmp, tendu, tendv, rc, ibMax, kMax, ibLim)
  REAL(KIND=r8),    INTENT(IN  ) :: rc  !R
  DO k=1,kMax
    DO i=1,ibLim
      tendu(i,k) = tendu(i,k) - rc * tmp(i,k) * plam(i)
      tendv(i,k) = tendv(i,k) - rc * tmp(i,k) * pphi(i)
    ENDDO
  ENDDO
END SUBROUTINE nlprgr
```




Introdução ao Processamento do Modelo BAM (Atmosfera)

Computação em espaço de ponto de grade

Calculo do da tendencias : equação de momentum :

A tendência final são a somatória de todas as contribuições do tempo t_{n-1} e t_n .

No caso Semi-Lagrangiano a integração destas contribuições primeiro deverá ser interpolada para o ponto de partida e para o ponto médio da trajetória lagrangiana, antes de ser somados.

As contribuições F_U e F_V da física também é adicionado as tendências.

Computação em espaço de ponto de grade

Calculo do da tendencias : equação de termodinamica:

Contribuição do termo $t - \Delta t$

$$T_T^{n-1} = T_T^{n-1} - \frac{1}{2} \left(k T_0 \int_0^1 D d\hat{\sigma} \right)^{t_{n-1}}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{a \cos^2 \varphi} \left(U \frac{\partial T}{\partial \lambda} + V \cos \varphi \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) + \dot{\sigma} \frac{\partial T}{\partial \sigma} - \theta \dot{\sigma} \frac{\partial \pi}{\partial \sigma} = k T \left(\frac{\partial}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \right) \ln(ps) + F_T$$

Contribuição do termo da advecção vertical (equação da termodinâmica)

$$\dot{\sigma} \frac{\partial T}{\partial \sigma} - \theta \dot{\sigma} \frac{\partial \pi}{\partial \sigma} = \pi \dot{\sigma} \frac{\partial \theta}{\partial \sigma}$$

$$\dot{\sigma} \frac{\partial T}{\partial \sigma} - \theta \dot{\sigma} \frac{\partial \pi}{\partial \sigma} = \pi \dot{\sigma} \frac{\Delta \theta}{\Delta \sigma}$$

$$T = \pi \theta$$

$$\pi = \frac{T}{\theta}$$

$$\theta = \frac{T}{\pi}$$

Considerando o tratamento explícito do termo $\dot{\sigma} \frac{\partial T}{\partial \sigma}$, outros termo tratado em duas partes no formalismo Euleriano

$$\frac{1}{2\Delta_k} \left[\dot{\sigma}_{k+1} \left(\frac{\pi_k}{\pi_{k+1}} T'_{k+1} - T'_k \right) + \dot{\sigma}_k \left(T'_k - \frac{\pi_k}{\pi_{k-1}} T'_{k-1} \right) \right]$$

$$\frac{1}{2\Delta_k} \left[\dot{\sigma}_{k+1} \left(\frac{\pi_k}{\pi_{k+1}} T_0(k-1) - T_0(k) \right) + \dot{\sigma}_k \left(T_0(k) - \frac{\pi_k}{\pi_{k-1}} T_0(k-1) \right) \right]$$



Introdução ao Processamento do Modelo BAM (Atmosfera)

Computação em espaço de ponto de grade

Calculo do da tendencias : equação de termodinamica:

No Esquema Semi-Lagrangiano o termo $\dot{\sigma} \frac{\partial T}{\partial \sigma}$, é incorporado pelo tratamento da advecção no formalismo Semi-Lagrangiano , o Termo $-\theta \dot{\sigma} \frac{\partial T}{\partial \sigma}$ permanece discretizado

$$\dot{\sigma} \frac{\partial T}{\partial \sigma} - \theta \dot{\sigma} \frac{\partial \pi}{\partial \sigma} = \pi \dot{\sigma} \frac{\partial \theta}{\partial \sigma}$$

$$T = \pi \theta$$

$$\pi = \frac{T}{\theta}$$

$$\theta = \frac{T}{\pi}$$

$$\frac{T'_k + T_0(k)}{2\Delta_k} \left[\dot{\hat{\sigma}}_{k+1} \left(\frac{\pi_{k+1}}{\pi_k} - 1 \right) + \dot{\hat{\sigma}}_k \left(1 - \frac{\pi_{k-1}}{\pi_k} \right) \right]$$



Introdução ao Processamento do Modelo BAM (Atmosfera)

Computação em espaço de ponto de grade

Calculo do da tendencias : equação de termodinamica:

Advecção horizontal da temperatura (termo explicito (no tempo t))

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{a \cos^2 \varphi} \left(U \frac{\partial T}{\partial \lambda} + V \cos \varphi \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) + \dot{\sigma} \frac{\partial T}{\partial \sigma} - \theta \dot{\sigma} \frac{\partial \pi}{\partial \sigma} = kT \left(\frac{\partial}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \right) \ln(ps) + F_T$$

$$T_T^n = T_T^n - \frac{1}{a \cos^2 \varphi} \left(U \frac{\partial T}{\partial \lambda} + V \cos(\varphi) \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right)^{t_n}$$

```
SUBROUTINE hadvec(u, v, flam, fphi, tend, rcl, ibMax, kMax, ibLim)
  REAL(KIND=r8),    INTENT(IN  ) :: rcl(ibMax) ! 1.0 r8 / ( cos(lat)**2 )
  REAL(KIND=r8),    INTENT(OUT) :: tend(ibMax,kMax)
  !
  ! Computes the horizontal advection term of field f (whose horizontal
  ! derivatives are given in flam and fphi) and add its contribution to current
  ! tendency (stored in tend).
  !
  INTEGER :: i, k
  DO k=1,kMax
    DO i=1,ibLim
      tend(i,k) = tend(i,k) - rcl(i) * (u(i,k)*flam(i,k) + v(i,k)*fphi(i,k))
    END DO
  END DO
END SUBROUTINE hadvec
```

Introdução ao Processamento do Modelo BAM (Atmosfera)

Computação em espaço de ponto de grade

Calculo do da tendencias : equação de termodinamica:

Contribuição do termos não-linear para a tendência de temperatura (termo explicito (no tempo t))

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{a \cos^2 \varphi} \left(U \frac{\partial T}{\partial \lambda} + V \cos \varphi \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) + \dot{\sigma} \frac{\partial T}{\partial \sigma} - \theta \dot{\sigma} \frac{\partial \pi}{\partial \sigma} = kT \left(\frac{\partial}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \right) \ln(ps) + F_T$$

$$\frac{\partial \ln(ps)}{\partial t} + \int_0^1 \vec{V} \cdot \nabla \ln(ps) d\sigma + \int_0^1 D d\sigma = 0$$

$$T_T^n = T_T^n - \kappa (T'_k - T_0(k)) \left(\int_0^1 V \cdot \nabla \ln(p_s) d\sigma \right) - \kappa T'_k \int_0^1 D d\sigma$$

```
SUBROUTINE tmptend(tend, tmp, tov, psint, adveps, divint, rk, &
  ibMax, kMax, ibLim)
  DO k=1,kMax
    DO i=1,ibLim
      tend(i,k) = tend(i,k) - tmp(i,k) * rk * divint(i,kMax) &
        + rk * ( tov(k) + tmp(i,k) ) * ( adveps(i,k) - psint(i,kMax) )
    ENDDO
  ENDDO
END SUBROUTINE tmptend
```

A tendência final T_T é a soma de T_T^{n-1} e T^n calculada em uma localização apropriada. A contribuição da física também é somada no final das tendências

Introdução ao Processamento do Modelo BAM (Atmosfera)

Computação em espaço de ponto de grade

Calculo do da tendencias : equação de termodinamica:

Advecção vertical da temperatura (termo explicito (no tempo t))

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{a \cos^2 \varphi} \left(U \frac{\partial T}{\partial \lambda} + V \cos \varphi \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) + \sigma \frac{\partial T}{\partial \sigma} - \theta \sigma \frac{\partial \pi}{\partial \sigma} = kT \left(\frac{\partial}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \right) \ln(ps) + F_T$$

```
SUBROUTINE vadvtmp(tmp, p1, p2, h1, h2, dot, psint, &
  ci, rdel2, tend, ibMax, kMax, ibLim, slagr)
  DO k=1,kMax-1
    DO i=1,ibLim
      w1(i,k) = p1(k) * tmp(i,k+1) - tmp(i,k)
      w2(i,k+1) = tmp(i,k+1) - p2(k+1) * tmp(i,k)
      w3(i,k) = ci(k+1) * psint(i,kMax) - psint(i,k)
    ENDDO
  ENDDO
  k=1
  DO i=1,ibLim
    tend(i,k) = tend(i,k) - rdel2(k) * (dot(i,k+1)*w1(i,k) + h1(k)*w3(i,k))
  ENDDO
  DO k=2,kMax-1
    DO i=1,ibLim
      tend(i,k) = tend(i,k) - rdel2(k) * (dot(i,k+1)*w1(i,k) + h1(k)*w3(i,k) &
        + dot(i,k)*w2(i,k) + h2(k)*w3(i,k-1))
    ENDDO
  ENDDO
  k=kMax
  DO i=1,ibLim
    tend(i,k) = tend(i,k) - rdel2(k) * (dot(i,k)*w2(i,k) + h2(k)*w3(i,k-1))
  ENDDO
END SUBROUTINE vadvtmp
```

A tendência final T_T é a soma de T_T^{n-1} e T^n calculada em uma localização apropriada. A contribuição da física também é somada no final das tendências

Computação em espaço de ponto de grade

Calculo do da tendencias : equação de umidade especifica:

$$\frac{\partial q_n}{\partial t} + \frac{1}{a \cos^2 \varphi} \left(U \frac{\partial q_n}{\partial \lambda} + V \cos \varphi \frac{\partial q_n}{\partial \varphi} \right) + \dot{\sigma} \frac{\partial q_n}{\partial \sigma} = F_{q_n}$$

A contribuição tendencia da advecção horizontal (termo explicito (no tempo t))

$$T_q^n = T_q^n - \frac{1}{a \cos^2 \varphi} \left(U \frac{\partial q}{\partial \lambda} + V \cos(\varphi) \frac{\partial q}{\partial \varphi} \right)^{t_n}$$

```

SUBROUTINE hadvec(u, v, flam, fphi, tend, rcl, ibMax, kMax, ibLim)
  REAL(KIND=r8),    INTENT(IN  ) :: rcl(ibMax) ! 1.0 r8 / ( cos(lat)**2 )
  REAL(KIND=r8),    INTENT(INOUT) :: tend(ibMax,kMax)
  !
  ! Computes the horizontal advection term of field f (whose horizontal
  ! derivatives are given in flam and fphi) and add its contribution to current
  ! tendency (stored in tend).
  !
  INTEGER :: i, k
  DO k=1,kMax
    DO i=1,ibLim
      tend(i,k) = tend(i,k) - rcl(i) * (u(i,k)*flam(i,k) + v(i,k)*fphi(i,k))
    END DO
  END DO
END SUBROUTINE hadvec

```

Computação em espaço de ponto de grade

Calculo do da tendencias : equação de umidade especifica:

$$\frac{\partial q_n}{\partial t} + \frac{1}{a \cos^2 \varphi} \left(U \frac{\partial q_n}{\partial \lambda} + V \cos \varphi \frac{\partial q_n}{\partial \varphi} \right) + \dot{\sigma} \frac{\partial q_n}{\partial \sigma} = F_{q_n}$$

A contribuição tendencia da advecção vertical (termo explicito (no tempo t))

$$T_q^n = T_q^n - \frac{1}{2\Delta_k} \left[\dot{\sigma}_{k+1} (q_{k+1} - q_k) + \dot{\sigma}_k (q_k - q_{k-1}) \right]$$

```

SUBROUTINE vadvec(f, dot, rdel2, tend, ibMax, kMax, ibLim)
  k=1
  DO i=1,ibLim
    tend(i,k) = tend(i,k) - rdel2(k) * (dot(i,k+1)*(f(i,k+1) -f(i,k)))
  ENDDO
  DO k=2,kMax-1
    DO i=1,ibLim
      tend(i,k) = tend(i,k) - rdel2(k) * (dot(i,k+1)*(f(i,k+1)-f(i,k)) &
        + dot(i,k)*(f(i,k)-f(i,k-1)))
    ENDDO
  ENDDO
  k=kMax
  DO i=1,ibLim
    tend(i,k) = tend(i,k) - rdel2(k) * (dot(i,k)*(f(i,k)-f(i,k-1)))
  ENDDO
END SUBROUTINE vadvec

```


Computação em espaço de ponto de grade

Calculo do da tendencias : pressão de superficie :

$$\frac{\partial \ln(ps)}{\partial t} + \int_0^1 \vec{V} \cdot \nabla \ln(ps) d\sigma + \int_0^1 D d\sigma = 0$$

A contribuição da tendência ((no tempo $t-1$))

$$T_{ps}^{n-1} = T_{ps}^{n-1} - \frac{1}{2} \left(\int_0^1 D d\sigma \right)^{t_{n-1}}$$

$$\int_0^1 D d\sigma = \int_0^1 D d\hat{\sigma} = \sum_{l=1}^K D_l \Delta l$$

```
SUBROUTINE vertint(slagr,zsint,psint, adveps, divint, divintm, dot, &
    u, v, div, divm, plam, pphi, zlam, zphi, rcl, del, ibMax, kMax, ibLim)
```

```

k=1
DO i=1,ibLim
    divint(i,k) = del(k) * div(i,k)
    divintm(i,k) = del(k) * divm(i,k)
ENDDO
DO k=2,kMax
    DO i=1,ibLim
        divint(i,k) = divint(i,k-1) + del(k) * div(i,k)
        divintm(i,k) = divintm(i,k-1) + del(k) * divm(i,k)
    ENDDO
ENDDO
!
!   log pressure tendency
!   -----
DO i=1,ibLim
    tdlnp(i) = tdlnp(i) - half * divint(i,kMax)
ENDDO
END SUBROUTINE vertint
```

Computação em espaço de ponto de grade

Calculo do da tendencias : pressão de superficie :

$$\frac{\partial \ln(ps)}{\partial t} + \int_0^1 \vec{V} \cdot \nabla \ln(ps) d\sigma + \int_0^1 D d\sigma = 0$$

A contribuição da tendência ((no tempo t))

$$T_{ps}^n = T_{ps}^n - \left(\int_0^1 \vec{V} \cdot \nabla \ln(ps) d\sigma \right)^{tn}$$

$$\int_0^1 \vec{V} \cdot \nabla \ln(p_s) d\sigma = \sum_{l=1}^K \vec{V} \cdot \nabla \ln(p_s)_l \Delta_l$$

```

SUBROUTINE vertint(slagr,zsint,psint, adveps, divint, divintm, dot, &
    u, v, div, divm, plam, pphi, zlam, zphi, rcl, del, ibMax, kMax, ibLim)
    DO k=1,kMax
        DO i=1,ibLim
            adveps(i,k) = rcl(i)*(u(i,k) * plam(i) + v(i,k) * pphi(i) )
        ENDDO
    ENDDO
    k=1
    DO i=1,ibLim
        psint(i,k) = del(k) * adveps(i,k)
    ENDDO
    DO k=2,kMax
        DO i=1,ibLim
            psint(i,k) = psint(i,k-1) + del(k) * adveps(i,k)
        ENDDO
    ENDDO
END SUBROUTINE vertint

```



Introdução ao Processamento do Modelo BAM (Atmosfera)

Transformação do espaço em ponto de grade para o espaço espectral

$$\frac{dW}{dx} = \frac{\partial W}{\partial t} + A(W) = -\tilde{L}(W) - \tilde{N}(W)$$

$$(I + \Delta t \tilde{L})(W(t + \Delta t)) = (I - \Delta t \tilde{L})(W(t - \Delta t))_* - 2\Delta t \tilde{N}(W(t))_M$$

Após resolver as tendências o sistema implícito ainda precisa ser resolvido.
Completaremos primeiro o lado direito da equação

Para uma variável prognostica F constrói-se o lado direto

$$R_F = F^{t_{n-1}} + 2\Delta t T_F$$

No esquema Semi-Lagrangiano os campos em t_{n-1} são obtidos pela interpolação

Assim, o lado direito da equações (T,Q, Inps,,Vort,Dive) será transformado para o espaço espectral



Introdução ao Processamento do Modelo BAM (Atmosfera)

Transformação do espaço em ponto de grade para o espaço espectral

Como os campos em ponto de grade: $R(\lambda, \varphi)$ são transformado para o espaço espectral

Em outra palavra como obter os coeficientes espectrais R_n^m de um campo $R(\lambda, \varphi)$ em ponto de grade

Conhece a função R , e seus coeficientes harmônicos esféricos

$$R_n^m = \frac{1}{2\pi} \int_{-1}^1 \int_{-\pi}^{\pi} R(\lambda, \varphi) P_n^m(\mu) e^{-im\lambda} d\lambda d\mu$$

$$\mu = \sin(\varphi)$$



Introdução ao Processamento do Modelo BAM (Atmosfera)

Transformação do espaço em ponto de grade para o espaço espectral

$$R_n^m = \frac{1}{2\pi} \int_{-1}^1 \int_{-\pi}^{\pi} R(\lambda, \varphi) P_n^m(\mu) e^{-im\lambda} d\lambda d\mu$$

A integrar é feita em duas partes

Primeiro Consiste de uma transformada de Fourier (com respeito a λ)

$$R_n(\mu_j) = \frac{1}{N_\lambda} \sum_{l=1}^{N_\lambda} R(\lambda_l, \mu_j) e^{-im\lambda_l}$$

Onde N_λ é usualmente definido como 3M (M é o truncamento espectral)

Segundo Consiste de uma transformada de Legendre (integração gaussiana com respeito a μ)

$$R_n^m = \sum_{j=1}^{N_\varphi} \omega_j R_n(\mu_j) P_n^m(\mu_j)$$

ω_j são os pesos gaussianos da formula de integração e N_φ é o numero de latitude $N_\varphi = \frac{N_\lambda}{2}$

Transformação do espaço em ponto de grade para o espaço espectral

$$R_F = F^{t_{n-1}} + 2\Delta t T_F$$

A transformação da equação de momentum:

$$U^{t_{n+1}} + \frac{\Delta t}{a} \left(\frac{\partial \phi}{\partial \lambda} + RT_o \frac{\partial \ln(p_s)}{\partial \lambda} \right)^{t_{n+1}} = R_U$$

$$V^{t_{n+1}} + \frac{\Delta t \cos(\varphi)}{a} \left(\frac{\partial \phi}{\partial \varphi} + RT_o \frac{\partial \ln(p_s)}{\partial \varphi} \right)^{t_{n+1}} = R_V$$

A transformação da equação de vorticidade e divergência:

$$\xi^{t_{n+1}} = \frac{1}{a \cos^2(\varphi)} \left(\frac{\partial R_V}{\partial \lambda} - \cos(\varphi) \frac{\partial R_U}{\partial \varphi} \right) = R_\xi$$

$$D^{t_{n+1}} + \Delta t \nabla^2 (\phi + RT_o \ln(p_s))^{t_{n+1}} = \frac{1}{a \cos^2(\varphi)} \left(\frac{\partial R_U}{\partial \lambda} + \cos(\varphi) \frac{\partial R_V}{\partial \varphi} \right) = R_D$$

Transformação do espaço em ponto de grade para o espaço espectral

$$R_F = F^{t_{n-1}} + 2\Delta t T_F$$

Os Termos R_ξ e R_D :

$$R_{\xi_n}^m = \frac{1}{a} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \left(im\tilde{V}^m(\varphi)P_n^m(\sin(\varphi)) + \tilde{U}^m(\varphi)H_n^m(\sin(\varphi)) \right) \cos(\varphi) d\varphi$$

$$R_{D_n}^m = \frac{1}{a} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \left(im\tilde{U}^m(\varphi)P_n^m(\sin(\varphi)) - \tilde{V}^m(\varphi)H_n^m(\sin(\varphi)) \right) \cos(\varphi) d\varphi$$

$$\tilde{U}^m(\varphi) = \frac{1}{2\pi \cos^2(\varphi)} \int_{-\pi}^{\pi} R_U(\varphi, \lambda) e^{-im\lambda} d\lambda$$

$$\tilde{V}^m(\varphi) = \frac{1}{2\pi \cos^2(\varphi)} \int_{-\pi}^{\pi} R_V(\varphi, \lambda) e^{-im\lambda} d\lambda$$

Transformação do espaço em ponto de grade para o espaço espectral

$$R_n^m = \frac{1}{2\pi} \int_{-1}^1 \int_{-\pi}^{\pi} R(\lambda, \varphi) P_n^m(\mu) e^{-im\lambda} d\lambda d\mu$$

```
SUBROUTINE PhysDirTrans()
```

```
!$OMP SINGLE
```

```
CALL CreateGridToSpec(1, 0)
```

```
qqp = 0.0_r8
```

```
CALL DepositGridToSpec(qtmpp, fgtmp)
```

```
!$OMP END SINGLE
```

```
CALL DoGridToSpec()
```

```
!$OMP BARRIER
```

```
!$OMP SINGLE
```

```
CALL DestroyGridToSpec()
```

```
!$OMP END SINGLE
```

```
END SUBROUTINE PhysDirTrans
```




Introdução ao Processamento do Modelo BAM (Atmosfera)

Difusão Horizontal

No momentum, a difusão horizontal é calculada através de um método explícito com o potencial de manipular várias restrições de estabilidade em alta resolução

A difusão horizontal para uma variável prognostica F empregado no modelo é na forma:

$$\frac{\partial F}{\partial t} = T_F - c(-1)^p \nabla^{2p} F$$

Difusão Horizontal

No **método explícito** esta equação é integrada no espaço espectral :

Vorticidade e divergência

$$\frac{\tilde{F}_n^m(t + \Delta t) - \tilde{F}_n^m(t - \Delta t)}{2\Delta t} = T_F - c \left(\frac{n(n+1)}{a^2} \right)^p \tilde{F}_n^m(t - \Delta t)$$

Temperatura

$$\frac{\tilde{F}_n^m(t + \Delta t) - \tilde{F}_n^m(t - \Delta t)}{2\Delta t} = T_F - c \left(\frac{n(n+1)}{a^2} \right)^p \tilde{F}_n^m(t - \Delta t) - c \left(\frac{n(n+1)}{a^2} \right)^p \left(\tilde{T}_n^m - \tilde{C}_T \ln p s_n^m(t - \Delta t) \right)$$

No **método implícito** esta equação é integrada no espaço espectral :

Vorticidade e divergência

$$\tilde{F}_n^m(t + \Delta t) = \tilde{F}_n^m(t + \Delta t) - 2c\Delta t \left(\frac{n(n+1)}{a^2} \right)^p \tilde{F}_n^m(t + \Delta t)$$

temperatura

$$\tilde{F}_n^m(t + \Delta t) = \left(1 + 2c\Delta t \left(\frac{n(n+1)}{a^2} \right)^p \right)^{-1} \left(\tilde{F}_n^m(t + \Delta t) + 2c\Delta t \left(\frac{n(n+1)}{a^2} \right)^p \tilde{C} \ln(p s)_n^m(t + \Delta t) \right)$$



Introdução ao Processamento do Modelo BAM (Atmosfera)

Difusão Horizontal

O Termo $-c \left(\frac{n(n+1)}{a^2} \right)^p \tilde{F}_n^m(t - \Delta t)$ é adicionado na tendência da variável prognostica F

O Termo $\tilde{C}_T = \sigma_1 \frac{\partial T}{\partial \sigma_1}, \dots, \sigma_k \frac{\partial T}{\partial \sigma_k}$.

**O coeficiente de difusão c pode variar para cada variável ,
usualmente é definido um forte coeficiente para a divergência e
outro para a outra variáveis prognosticas.**

Difusão Horizontal

```
SUBROUTINE ImplDifu(dt, mnRIFirst, mnRILast)
```

```
!
! dependence on earth's radius removed
!
```

```
ALLOCATE(workImplDifu(2*mymnMax))
```

```
DO mn = 1, 2*mymnMax
```

```
    workImplDifu(mn) = 2.0_r8*(snnp1(mn)**ndho)
```

```
END DO
```

```
DO k = 1, kMaxloc
```

```
    DO mn = mnRIFirst, mnRILast
```

```
        qdivp(mn,k) = qdivp(mn,k)/(1.0_r8+dt*dk*workImplDifu(mn))
```

```
    END DO
```

```
END DO
```

```
!
! diffusion coefficient for remaining fields
!
```

```
DO mn = mnRIFirst, mnRILast
```

```
    work(mn) = dt*tk*workImplDifu(mn)
```

```
END DO
```

```
DO k = 1, kMaxloc
```

```
    DO mn = mnRIFirst, mnRILast
```

```
        qtmpp(mn,k) = (qtmpp(mn,k)+work(mn)*ct(k)*qlnpp(mn))/(1.0_r8+work(mn))
```

```
        qrotp(mn,k) = qrotp(mn,k)/(1.0_r8+work(mn))
```

```
    END DO
```

```
END DO
```

```
END SUBROUTINE ImplDifu
```

$$\tilde{F}_n^m(t + \Delta t) = \tilde{F}_n^m(t + \Delta t) - 2c\Delta t \left(\frac{n(n+1)}{a^2} \right)^p \tilde{F}_n^m(t + \Delta t)$$

$$\tilde{F}_n^m(t + \Delta t) = \left(1 + 2c\Delta t \left(\frac{n(n+1)}{a^2} \right)^p \right)^{-1} \tilde{F}_n^m(t + \Delta t)$$

$$\tilde{F}_n^m(t + \Delta t) = \left(1 + 2c\Delta t \left(\frac{n(n+1)}{a^2} \right)^p \right)^{-1} \left(\tilde{F}_n^m(t + \Delta t) + 2c\Delta t \left(\frac{n(n+1)}{a^2} \right)^p \tilde{C} \ln(ps)_n^m(t + \Delta t) \right)$$



Introdução ao Pós-processamento do Modelo BAM (Atmosfera)

Prós-Processing Brazilian Atmospheric Model

Training_BAM/Doc_Pre_BAM/Estrutura_do_Pos_Processamento_BAM.pptx