

· Condição de Contorno



Para tornar o problema matemático bem colocado, as condições de contorno apropriadas precisam ser especificadas em quaisquer modelos de área limitada, como mesoescala e modelos numéricos de previsão do tempo.

Se o domínio do modelo representa apenas parte da atmosfera em todas as direções, então as condições de contorno são necessárias nos limites superior, lateral e inferior do domínio do modelo

O número de condições de contorno depende da ordem das equações diferenciais em uma determinada direção envolvida.

13.2.1 Condições de Fronteira Lateral



O objetivo de implementar as condições de contorno lateral é permitir que a onda ou perturbação se propague para fora ou para dentro do domínio computacional.

Os valores dos limites laterais precisam ser atualizados com o tempo, refletindo a evolução dependente do tempo da atmosfera real fora do domínio, para que o sistema meteorológico possa se propagar no domínio aninhado. por exemplo, simulação de uma passagem frontal sobre um domínio finito.

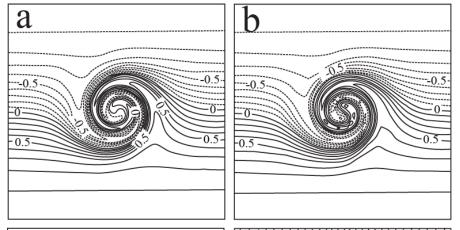


Basicamente, existem cerca de cinco tipos de condições de contorno lateral usadas em modelos de mesoescala:

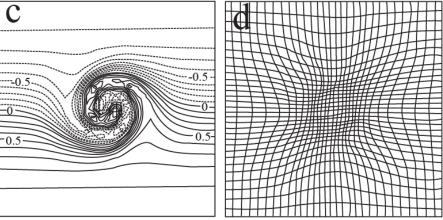
- (1) Condições de contorno fechadas ou especificadas,
- (2) Condições de contorno periódicas,
- (3) Condições de contorno dependentes do tempo,
- (4) Condições de contorno da esponja,
- (5) Condições de limite aberto ou de radiação.



(1) Nas condições de fronteira lateral fechada ou especificada, as variáveis nas fronteiras laterais são especificadas como valores constantes ou gradientes constantes, respectivamente.



As ondas ou perturbações geradas dentro do domínio podem ou não se propagar para fora do domínio se valores constantes ou gradientes constantes forem especificados.

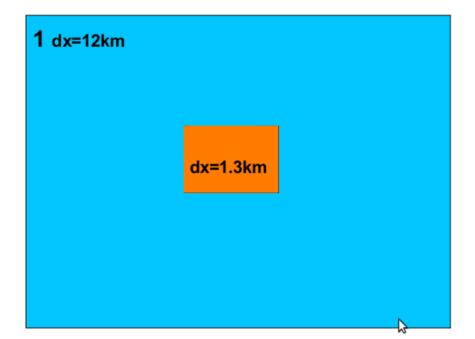


Normalmente, uma condição de contorno fechado tende a refletir ondas ou perturbações geradas dentro do domínio de volta para o seu interior.



(1) Nas condições de fronteira lateral fechada ou especificada, as variáveis nas fronteiras laterais são especificadas como valores constantes ou gradientes constantes, respectivamente.

Ocasionalmente, funciona se os limites laterais estiverem distantes das perturbações ou ondas geradas no tempo de integração desejado, ou se não houver ondas se propagando em direção a um limite lateral específico.





(1) Nas condições de fronteira lateral fechada ou especificada, as variáveis nas fronteiras laterais são especificadas como valores constantes ou gradientes constantes, respectivamente.

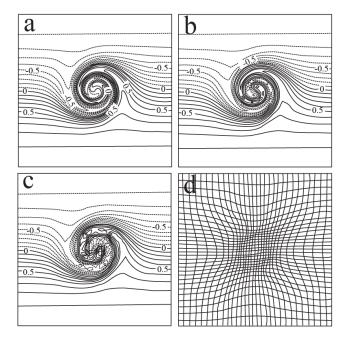
Por exemplo, um contorno de fluxo constante pode funcionar se for consistente com a velocidade de entrada do sistema físico e as ondas ou perturbações geradas estiverem sendo advetadas pelo fluxo de entrada, de modo que nunca atinjam o contorno de entrada (uptream).

Matematicamente, esse tipo de condição de contorno especificada é chamada de **condição de contorno de Dirichlet.**



(1) Nas condições de fronteira lateral fechada ou especificada, as variáveis nas fronteiras laterais são especificadas como valores constantes ou gradientes constantes, respectivamente.

Uma condição de contorno lateral de gradiente constante especifica um gradiente constante, tal como gradientes zero (por exemplo, $\frac{\partial \varphi}{\partial x} = 0$, φ é a variável em questão), nos contornos laterais.





(1) Nas condições de fronteira lateral fechada ou especificada, as variáveis nas fronteiras laterais são especificadas como valores constantes ou gradientes constantes, respectivamente.

Quão eficaz é a condição de contorno lateral de gradiente constante *para propagar as* ondas para fora do domínio?

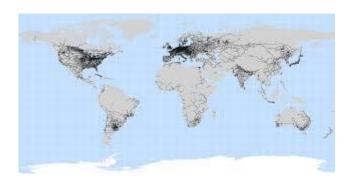
R: Vai depender da consistência entre os gradientes constantes especificados e a velocidade de advecção das ondas físicas.

Isso também é chamado de condição de contorno de Neumann.

Numericamente, uma condição de contorno lateral com gradiente zero especifica $\varphi_1^{\tau}=\varphi_2^{\tau}$ e $\varphi_N^{\tau}=\varphi_{N-1}^{\tau}$ nos pontos de contorno i=1 e i=N.



Uma condição de contorno periódica assume que todas as variáveis no contorno direito são iguais ao contorno esquerdo, ou seja, $\phi(x_N^{\tau}) = \phi(x_1^{\tau})$.



Este tipo de condição de contorno é <u>adotado</u> pelo modelo global que divide uma certa

longitude artificialmente para fazer cálculos numéricos



Uma condição de contorno lateral dependente do tempo é frequentemente adotada quando a integração numérica é realizada simultaneamente nos domínios interno e externo,

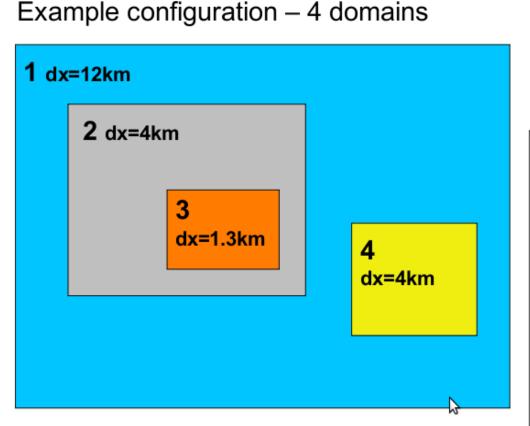
Os <u>valores de contorno lateral do domínio interno precisam ser especificados pelos</u> <u>valores atualizados previstos pelo domínio externo</u>.

Desta forma, os sistemas climáticos, ondas ou distúrbios são capazes de se propagar para o domínio interno.

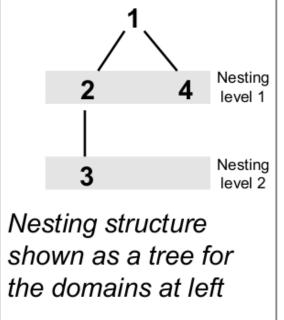
Grade deslocada em MPAS:



Uma condição de contorno lateral dependente do tempo é frequentemente adotada quando a integração numérica é realizada simultaneamente nos domínios interno e externo,



Each domain is assigned a domain ID #





Uma condição de contorno lateral dependente do tempo é frequentemente adotada quando a integração numérica é realizada simultaneamente nos domínios interno e externo,

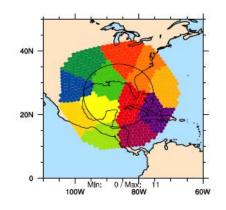
Sem este tipo de contorno lateral, as simulações do domínio interno não podem refletir as mudanças ambientais em larga escala com o tempo.

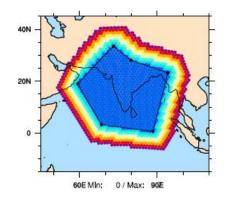
Se os valores dos limites laterais do domínio interno <u>não forem passados de volta</u> para o domínio externo. Isso é chamado de aninhamento unidirecional (one-way nesting).

Se os valores dos limites laterais do domínio interno <u>forem passados de volta</u> para o domínio externo. Isso será chamado de aninhamento bidirecional (two-way nesting).



Uma condição de contorno de esponja ou camada de absorção de onda usa uma filtragem aprimorada perto dos limites laterais para amortecer as ondas ou distúrbios gerados dentro do domínio que saem para fora dos limites laterais.





Por exemplo, Perkey e Kreitzberg (1976) formularam a região da esponja da seguinte forma

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial t} = W_i \left(\frac{\partial \phi_i}{\partial t} \right)_m + (1 - W_i) \left(\frac{\partial \phi_i}{\partial t} \right)_{ls}$$
 13.2.1

onde m define a tendência calculada do modelo da variável ϕ e ls define a tendência especificada de larga escala e Wi a função peso:

Uma condição de contorno de esponja ou camada de absorção de onda usa uma filtragem aprimorada perto dos limites laterais para amortecer as ondas ou distúrbios gerados dentro do domínio que saem para fora dos limites laterais.

$$W_i = 0.0$$
 for the (physical) boundaries

- = 0.4 for the boundaries $\pm \Delta x$
- = 0.7 for the boundaries $\pm 2\Delta x$
- = 0.9 for the boundaries $\pm 3\Delta x$
- = 1.0 for all the interior points.

(13.2.2)

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial t} = W_i \left(\frac{\partial \phi_i}{\partial t} \right)_m + (1 - W_i) \left(\frac{\partial \phi_i}{\partial t} \right)_{ls}$$
 13.2.1

1.2 regionalização com fronteira aberta

Especificação de Zona Fronteira Regional MPAS



Filtros na zona de relaxamento

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = RHS_{\psi} + F_1(\psi_{LS} - \psi) - F_2 \Delta x^2 \nabla^2(\psi_{LS} - \psi)$$

Amortecimento de Rayleigh para o valor de grande escala (LS)

Amortecimento espacial de 2ª ordem da perturbação do valor (LS)

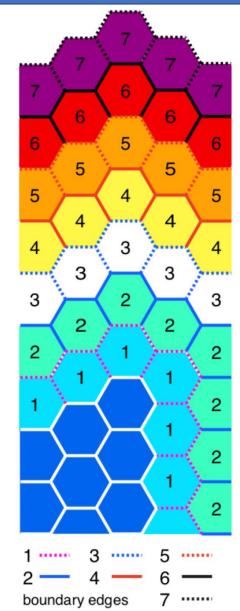
$$F_1 = \gamma_1 \frac{(i-1)}{m} \qquad F_2 = \gamma_2 \frac{(i-1)}{m}$$

m é a largura da zona de relaxamento (em # células). Exemplo (à direita), m = 5 (padrão)

$$F_1 = \gamma_1(0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8)$$
 $F_2 = \gamma_2(0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8)$

$$\gamma_1 = (0.06\Delta x)^{-1}$$
 $\gamma_2 = (0.3\Delta x)^{-1}$

Esses valores (γ_1 e γ_2) são hardwire no MPAS

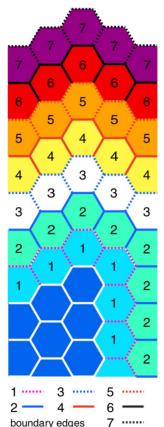




Uma condição de contorno de esponja ou camada de absorção de onda usa uma filtragem aprimorada perto dos limites laterais para amortecer as ondas ou distúrbios gerados dentro do domínio que saem para fora dos limites laterais.

No WRF, as Condições de Contorno Lateral (lineares no tempo) são:

- O arquivo wrfbdy contém informações de células de grades nos pontos do modelo em uma zona de contorno (por exemplo) uma faixa de 5 pontos de largura ao redor do domínio
- Os campos de contorno são linearmente interpolados no tempo desde os tempos de contorno até o tempo atual do modelo
- Isso especifica os valores externos e é usado para deslocar os próximos 4 pontos internos





Uma condição de contorno de esponja ou camada de absorção de onda usa uma filtragem aprimorada perto dos limites laterais para amortecer as ondas ou distúrbios gerados dentro do domínio que saem para fora dos limites laterais.

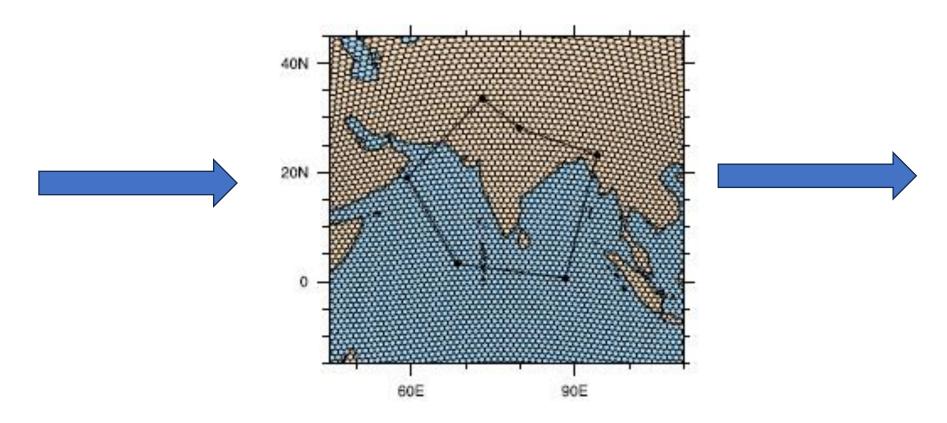
Israel e Orzag (1981) examinaram as camadas absorventes viscosas e de amortecimento Rayleigh para o sistema linearizado de águas rasas.

Klemp e Lilly (1978) examinaram a reflexão produzida por uma camada de absorção de onda no limite superior, que será discutida nas condições de contorno superior.



Condições de contorno aberto ou Radiativa

Para ondas de gravidade pura, a velocidade de fase horizontal é direcionada no mesmo sentido que a velocidade de grupo horizontal, assim <u>é possível usar a equação de advecção para carregar a energia da onda para fora dos contornos laterais</u>.



Condições de contorno aberto ou Radiativa

Baseado neste conceito, Orlanski (1976) propôs a condição de contorno aberto ou de radiação para um escoamento hiperbólico em um modelo numérico. Para o contorno de saída, a condição de contorno de radiação pode ser escrita

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + (U - c_0^*) \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \qquad em \ x = L$$
 13.2.3

onde $(U-c_0^*)$ é a velocidade de propagação no contorno do escoamento de saida (x=L), que deve ser determinada. A representação de diferença finita de leapfrog para passo de tempo $\tau-1$ da equação acima pode ser escrita



Condições de contorno aberto ou Radiativa

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + (U - c_0^*) \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \qquad em \ x = L$$
 13.2.3

$$\frac{\phi_{b-1}^{\tau} - \phi_{b-1}^{\tau-2}}{2\Delta t} = \frac{-((U - c_0^*))}{\Delta x} \left(\phi_{b-1}^{\tau-1} - \phi_{b-2}^{\tau-1} \right)$$
 13.2.4

Observe que o primeiro termo entre colchetes do lado direito é adotado para evitar instabilidade numérica. Com base na aproximação acima, a velocidade de fase pode ser estimada por

$$((U - c_0^*)) = -\frac{\Delta x}{2\Delta t} \frac{\phi_{b-1}^{\tau} - \phi_{b-1}^{\tau-2}}{(\phi_b^{\tau-1} - \phi_b^{\tau-1})}$$
 avaliado em b-1 13.2.5

$$U + c_o^* = 0$$
 if R.H.S. of (13.2.5) < 0,

$$U + c_o^* = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$
 if R.H.S. of (13.2.5) > $\Delta x / \Delta t$, (13.2.5)

onde o subscrito b define o ponto contorno e R.H.S. significa o lado direito.



Condições de contorno aberto ou Radiativa

Para um sistema de fluido hidrostático e incompressível, uma vez que w é acoplado a u, pode-se usar a velocidade de fase estimada de u para w.

Isso também pode ser aplicado às variáveis acopladas de temperatura potenciais e pressão.

Condições de contorno aberto ou Radiativa

Uma vez que a velocidade de fase é estimada, o valor limite no intervalo de tempo au+1 pode ser determinado

$$\phi_b^{\tau+1} = \phi_b^{\tau-1} - \frac{2\Delta t}{\Delta x} (U - c_0^*) (\phi_b^{\tau} - \phi_{b-1}^{\tau})$$

13.2.6

onde $(U - c_0^*)$ é estimado pela Eq. (13.2.5).

Uma fórmula semelhante pode ser formada para o contorno do escoamento de entrada

$$\phi_b^{\tau+1} = \phi_b^{\tau-1} - \frac{2\Delta t}{\Delta x} (U - c_0^*) (\phi_{b+1}^{\tau} - \phi_b^{\tau})$$

13.2.7

Observe que a especificação de ϕ em ambos os contornos levará a um problema sobredeterminação para a equação de advecção de primeira ordem.

Condições de contorno aberto ou Radiativa

Na prática, uma condição de contorno lateral de gradiente zero for implementada como $\phi_N^{\tau+1}=\phi_{N-1}^{\tau}$.

Este tipo de condição de contorno lateral pode ser visto como um caso especial da radiação ou condição de contorno aberto, porque a onda que se propaga para fora do contorno é é assumida como tendo uma velocidade de $c = \frac{\Delta x}{\Delta t}$. Se a velocidade física real da onda for muito diferente dessa velocidade de fase numérica, pode ocorrer uma grande reflexão no contorno.



Upper boundary conditions

O contorno superior de um modelo de previsão meteorológica de mesoescala ou numérico deve ser colocado o mais longe possível da região com ondas ativas de mesoescala, sistemas convectivos e distúrbios climáticos.

Idealmente, deve ser colocado no topo da atmosfera, ou seja, Pressão=0.

No entanto, na prática, é impossível fazê-lo devido à restrição de recursos computacionais.



Upper boundary conditions

Dependendo dos sistemas climáticos simulados pelo modelo, o contorno superior de um domínio de modelo numérico pode ser colocado no fundo da estratosfera, na tropopausa ou dentro da camada estável da troposfera.

Por exemplo, uma circulação de brisa marítima em uma camada limite estável normalmente não penetra em grandes altitudes, portanto, <u>permite que um contorno</u> <u>superior de um modelo de mesoescala seja colocado no meio da troposfera</u>.

Por outro lado, ao simular um fluxo sobre uma montanha de mesoescala, as ondas da montanha muitas vezes podem se propagar a uma altitude muito elevada. Portanto, um domínio vertical muito maior é necessário.

Não *importa quão alto o domínio do modelo se estenda na vertical*, uma condição de contorno superior apropriada ainda é necessária.



Upper boundary conditions

A adição de uma camada de esponja ou camada de absorção de onda ao topo do domínio físico ou camada é uma maneira simples de imitar a condição de contorno de radiação de Sommerfeld (1949) em um modelo numérico.