

Assimilação de Dados Ensemble-Variacional Híbrida no CPTEC

Carlos Frederico Bastarz

Orientação: Luis Gustavo Gonçalves de Gonçalves e Dirceu Luis Herdies

Grupo de Desenvolvimento em Assimilação de Dados - GDAD

Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC

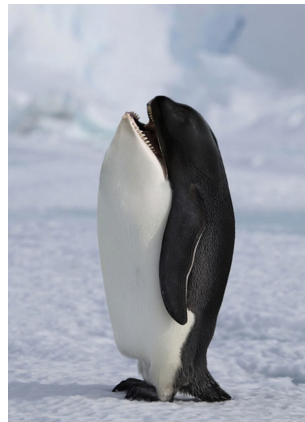
`carlos.frederico@cptec.inpe.br`

16 de Outubro, 2013

XII - Encontro dos Alunos da Pós-Graduação em Meteorologia do CPTEC/INPE

Sumário

- ① Motivação
- ② Sistemas Variacionais
- ③ Sistemas Sequenciais por Ensemble
- ④ Sistemas Híbridos
 - ▶ Revisão
 - ▶ Vantagens
- ⑤ Sistema Híbrido Ensemble-Variacional
 - ▶ Objetivos Geral
 - ▶ Objetivos Específicos
- ⑥ Covariâncias dos Erros de Background
- ⑦ Incorporação das Covariâncias do Ensemble no Framework Variacional
- ⑧ Resultados Esperados



Motivação

Assimilação de Dados

- Determinação da Análise
- Modelagem dos Erros de Background
- Calibração de Parâmetros

Dificuldades surgem quanto à especificação dos erros de modelagem:

Análise Empírica Temperatura do Ar

$$T_a = \alpha T_1 + (1 - \alpha) T_2 \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{\frac{1}{\sigma_1^2}}{\frac{1}{\sigma_1^2} + \frac{1}{\sigma_2^2}} = \frac{\sigma_2^2}{\sigma_2^2 + \sigma_1^2} \quad (2)$$

$$\frac{1}{\sigma_a^2} = \frac{1}{\sigma_1^2} + \frac{1}{\sigma_2^2} \quad (3)$$

Considerando estatísticas exatas, a precisão da análise é o inverso da variância

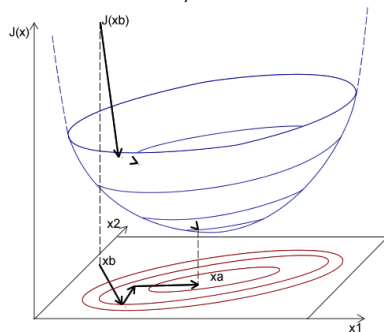
Sistemas Variacionais

Sistemas Variacionais - Função Custo que mede a distância entre o background e a observação em ponto de grade

Gridpoint Statistical Interpolation (GSI) - 3DVar

$$J(\vec{x}) = \underbrace{\frac{1}{2}(\vec{x} - \vec{x}^b)^T \mathbf{B}^{-1}(\vec{x} - \vec{x}^b)}_{\text{Background}} + \underbrace{\frac{1}{2}(\vec{y}^o - \mathbf{H}\vec{x})^T \mathbf{R}^{-1}(\vec{y}^o - \mathbf{H}\vec{x})}_{\text{Observação}} \quad (4)$$

- A minimização da função custo ($\nabla_x J(\vec{x}) = 0$) determina a análise ($\vec{x}^a$) procurada



Sistemas Sequenciais por Ensemble

Sistemas Sequenciais por Ensemble - Não determinam o incremento de análise através de uma função custo, mas o fazem explicitamente

Local Ensemble Transform Kalman Filter - LETKF

- Resolve as equações localmente no espaço do modelo (é massivamente paralelo)
- É eficiente quanto à assimilação de observações não convencionais (e.g., radiâncias e retrievals)
- Não exige um modelo adjunto e nem o seu transposto (tangente linear)
- Calcula e atualiza as covariâncias no tempo ("erros do dia" - feedback entre análise e previsão)

$$\mathbf{P}^b = \frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^K (\vec{x}_k^b - \bar{x}^b)(\vec{x}_k^b - \bar{x}^b)^T \quad (5)$$

Revisão:

- Hamill e Snyder (2000): $\mathbf{B} = (1 - \alpha)\mathbf{P}^b + \alpha\mathbf{SCS}^T$
- Etherton e Bishop (2004): $\mathbf{B} = (1 - \alpha)\lambda\mathbf{P}^b + \alpha\rho\mathbf{B}_{3dvar}$
- Wang et al. (2007): $\mathbf{B} = (1 - \alpha)\mathbf{P}^b + \alpha\mathbf{B}_{IO}$
- Wang et al. (2008a, 2008b): $\vec{x}' = \vec{x}'_1 + \sum_{k=1}^K (\vec{a}_k \circ \vec{x}_k^e)$;
 $\mathbf{B} = (1 - \alpha)\mathbf{B}_{3dvar} + \alpha\mathbf{P}^b \circ \mathbf{C}$
- Zhang et al. (2009): $\mathbf{B} = \alpha\mathbf{P}^b + (1 - \alpha)\mathbf{B}_{4dvar}$
- Clayton et al. (2012): $\mathbf{B} = \alpha_c^2\mathbf{B}_c + \alpha_e^2\mathbf{B}_e$; $\mathbf{B}_e = \mathbf{P}^b \circ \mathbf{C}$
- ...

Sistemas Híbridos

Vantagens: (Zupanski et al., 2012)

- ① Covariâncias dos erros de background dependentes do fluxo (melhora o variacional)
- ② Covariâncias dos erros de background "Full Rank" (melhora o ensemble)
- ③ Minimização não-linear (melhora o ensemble)
- ④ Feedback entre as análises e as previsões (melhora o variacional)

Atualmente, nenhum sistema de assimilação de dados inclui todas estas componentes juntas

Sistema Híbrido Ensemble-Variacional

O **CPTEC** possui os ingredientes necessário para montar um sistema híbrido Ensemble-Variacional: **MCGA**, **LETKF**, **GSI**.

Objetivo Geral

Montar um Sistema de Assimilação de Dados Híbrido Ensemble-Variacional utilizando o LETKF e o GSI para o CPTEC.

Objetivos Específicos

- Investigação da mistura entre as covariâncias estáticas e dinâmicas
- Investigação das estruturas de covariâncias produzidas pela nova matriz $\mathbf{B}$, diante de estruturas fisicamente dependentes
- Investigação das contribuições do sistema LETKF para o sistema híbrido do GSI (e vice-versa)
- Investigação do impacto das análise produzida pelo híbrido nas previsões do MCGA-CPTEC/INPE
- ...

Covariâncias dos Erros de Background

Papel da matriz $\mathbf{B}$

- Descrever a confiança nos estados do background
- Localizar o incremento de análise na horizontal/vertical
- Assegurar que os incrementos de análise são dinamicamente consistentes

$\chi \quad \psi \quad t \quad q \quad oz \quad cw \quad ps \quad sst$

χ

ψ

t

q

oz

cw

ps

sst

- A matriz $\mathbf{B}$ é uma matriz do tipo bloco diagonal
- As matrizes pretas (diagonal principal) representam as variâncias para cada variável
- As submatrizes em cinza escuro são auto-covariâncias e em cinza claro, são covariâncias multivariadas
- Tamanho completo: $> \sim 10^7 \times 10^7$

Incorporação das Covariâncias do Ensemble no framework Variacional

A solução (análise) do híbrido é variacional, mas as covariâncias do ensemble são combinadas com as covariâncias do variacional (Wang et al., 2008a):

Função Custo Variacional 3DVar

$$J(\vec{x}) = \frac{1}{2}(\vec{x} - \vec{x}^b)^T \mathbf{B}^{-1}(\vec{x} - \vec{x}^b) + \frac{1}{2}(\vec{y}^o - \mathbf{H}\vec{x})^T \mathbf{R}^{-1}(\vec{y}^o - \mathbf{H}\vec{x}) \quad (6)$$

Novo Incremento de Análise (Lorenc, 2003; Wang et al., 2008a)

$$\vec{x}' = \vec{x} + \sum_{k=1}^K (a_k \circ \vec{x}_k^e) \quad (7)$$

$$\vec{a} = [a_1, a_2, \dots, a_K] \quad (8)$$

$$\vec{x}_k^e = \frac{(\vec{x}_k - \bar{x})}{\sqrt{K-1}} \quad (9)$$

Incorporação das Covariâncias do Ensemble no framework Variacional

$$J(\vec{x}, \vec{a}) = \beta_1 J_1 + \beta_2 J_e + J_o \quad (10)$$

$$J(\vec{x}, \vec{a}) = \beta_1 \frac{1}{2} (\vec{x})^T \mathbf{B}^{-1} (\vec{x}) + \beta_2 \frac{1}{2} (\vec{a})^T \mathbf{A}^{-1} (\vec{a}) + \frac{1}{2} (\vec{y}^{\vec{o}'} - \mathbf{H} \vec{x}')^T \mathbf{R}^{-1} (\vec{y}^{\vec{o}'} - \mathbf{H} \vec{x}') \quad (11)$$

$$J(\vec{x}') = \frac{1}{2} \vec{x}'^T \left(\frac{1}{\beta_1} \mathbf{B} + \frac{1}{\beta_2} \mathbf{P}^{\mathbf{b}} \circ \mathbf{C} \right)^{-1} \vec{x}' + \frac{1}{2} (\vec{y}_o' - \mathbf{H} \vec{x}')^T \mathbf{R}^{-1} (\vec{y}_o' - \mathbf{H} \vec{x}') \quad (12)$$

Com:

$$\frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_2} = 1; \beta_1, \beta_2 \neq 0 \quad (13)$$

$$\vec{y}^{\vec{o}'} = \vec{y}^{\vec{o}} - \mathcal{H} \vec{x}^{\vec{b}} \quad (14)$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{C} & & & \\ & \mathbf{C} & & \\ & & \ddots & \\ & & & \mathbf{C} \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$\mathbf{C} = (a_k)(a_k)^T \quad (16)$$

$$\mathbf{B} + \mathbf{P}^{\mathbf{b}} \circ \mathbf{C} \equiv \vec{x} + \left\langle \sum_{k=1}^K (a_k \circ \vec{x}_k^{\vec{e}}) \left[\sum_{k=1}^K (a_k \circ \vec{x}_k^{\vec{e}}) \right]^T \right\rangle \quad (17)$$

Ciclo do Sistema Híbrido Ensemble-Variacional

$$x_1^b - \bar{x}^b, a_1$$

$$\vec{x}_k^e = \frac{(\vec{x}_k^b - \vec{x})}{\sqrt{K-1}}$$

$$\vec{x'} = \vec{x} + \sum_{k=1}^K (a_k \circ \vec{x}_k^e)$$

$$x_1^b$$

$$x_1^a$$

$$x_1^b$$

$$x_2^b - \bar{x}^b, a_2$$

$$\mathbf{P}^b = \sum_{k=1}^K (x^{\vec{e}}_k)(x^{\vec{e}}_k)^T$$

$$x_2^b$$

$$x_2^a$$

$$x_2^b$$

$$x_k^b - \bar{x}^b, a_k$$

$$\bar{x}^b$$

$$x_k^b$$

$$x_k^a$$

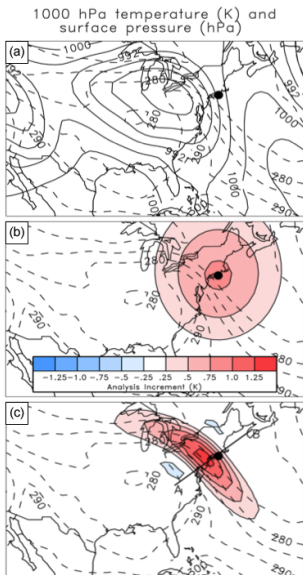
$$x_k^b$$

$$J(\vec{x'}) = \frac{1}{2} \vec{x'}^T (\frac{1}{\beta_1} \mathbf{B} + \frac{1}{\beta_2} \mathbf{P}^b \circ \mathbf{C})^{-1} + \frac{1}{2} (\vec{y'_o} - \mathbf{H} \vec{x'})^T \mathbf{R}^{-1} (\vec{y'_o} - \mathbf{H} \vec{x'})$$

Resultados Esperados

Porque não podemos ficar sem dados não convencionais e porque devemos melhorar os sistemas de assimilação de dados:

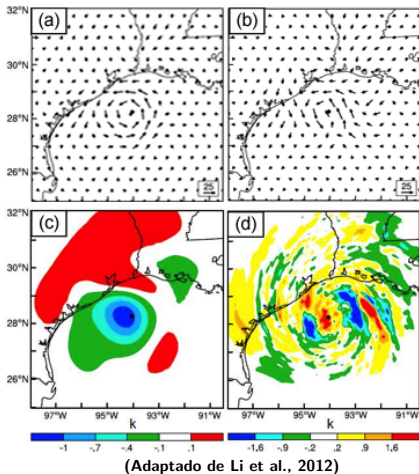
- Observação de temperatura próximo a uma frente fria (CONUS):
 - a) Análise Temp. 1000hPa [k] e Pressão em Superfície [hPa] e observação (ponto preto)
 - b) Incremento de Análise 3DVar Temperatura (**B** estática): isotrópico e homogêneo
 - c) Incremento de Análise EnKF Temperatura (**B** dinâmica): anisotrópico e não homogêneo



(Adaptado de Whitaker et al., 2012)

Ambos os tipos de incrementos de análise possuem características desejáveis, mas sozinhos possuem deficiências - Como seria na AS?

Resultados Esperados



- Observação de velocidade radial - Furacão IKE (Golfo do México, 2008):

- a) Vento 700mb - 3DVar (**B** estática)
- b) Vento 700mb - Híbrido (**B** híbrida)
- c) Temp. 850mb - 3DVar (**B** estática)
- d) Temp. 850mb - Híbrido (**B** híbrida)

O híbrido (**B** híbrida) melhorou o espalhamento dos incrementos de análise, como consequência, a representação da estrutura do furacão foi mais acurada -

Como seria na AS?

Obrigado!