

## Variabilidade climática

Simone Erotildes Teleginski Ferraz

*Departamento de Física/CCNE/UFSM/Santa Maria, RS  
e-mail:simonefe@smail.ufsm.br*

### Motivação

Incentivado pela disponibilidade de longos conjuntos de dados, por diversos estudos de climatologia dinâmica e da possibilidade de previsão de tempo por longo período, a comunidade meteorológica em geral tem se dedicado intensamente nas últimas décadas em estender o conhecimento da componente de baixa frequência do fluxo atmosférico.

Este esforço tem nos levado a descobrir novos fenômenos de longa escala de tempo, um conhecimento mais completo dos fenômenos reconhecidos anteriormente e também um desenvolvimento teórico dos mecanismos dinâmicos que influenciam os mesmos.

O objetivo deste curso é de introduzir estas novas idéias a fim de proporcionar aos estudantes uma visão mais abrangente dos fenômenos de baixa frequência existentes na atmosfera.

### Introdução

O entendimento da circulação geral da atmosfera requer considerações não somente da média zonal e dos componentes estacionários e suas variações com o ciclo anual, mas também da variabilidade irregular em escalas maiores que dos transientes individuais. O termo *variabilidade de baixa frequência* é geralmente utilizado para descrever tais componentes da circulação geral.

A variabilidade atmosférica pode ser separada segundo a sua distribuição espacial e temporal conforme a tabela 1.

**Tabela 1.** Escalas da variabilidade atmosférica

ESCALA	VARIAÇÃO ESPACIAL	VARIAÇÃO TEMPORAL
MICROESCALA	Metros até poucos quilômetros	minutos
PEQUENA ESCALA	0 a 100 km	0,5h até poucas horas
MESOESCALA	100 a 1000 km	6h a 24 h
SINÓTICA	1000 km a 10000 km	Dias até uma semana
PLANETÁRIA	10000 km	Semanas e meses

Deste modo, a variabilidade de baixa frequência (VBF) de movimentos atmosféricos de grande escala é um tópico de considerável interesse em meteorologia dinâmica. Conforme a tabela 1, a variabilidade Baixa frequência (BF) é normalmente definida como períodos maiores que 10 dias o que é incluído na escala de fenômenos planetários.

Os períodos de mudanças sazonais na banda de BF, ou longos períodos, podem ser divididos em dois: Intrasazonal ou 10-100 dias e Interanual ou 1-10 anos. O estudo da VBF é importante, porque esta variabilidade é a principal moduladora de eventos sinóticos dentro do período estendido de previsão numérica de tempo. Ou seja, o conhecimento e simulação correta desta variabilidade permitem uma extensão da previsão numérica de tempo para médio (5 - 10 dias) e longo (> 10 dias) períodos, o que é um dos grandes desafios da Meteorologia Atual.

O estudo da VBF evolui de duas maneiras:

- Descrição dos fenômenos envolvidos através de estudos observacionais;
- Teorias de possíveis mecanismos geradores através de estudos de modelagem numérica.

Os estudos observacionais com dados de circulação que em foi mantida apenas VBF, através de cálculos de correlações ou de funções ortogonais empíricas, relevam estruturas complexas chamadas *Padrões de Teleconexões*.

### **Teleconexões**

A palavra "teleconexão" significa conexão a distância. Deste modo, análise de teleconexões compreende uma visão global da circulação atmos-

férica quando forçantes locais ou instabilidades atuam para influenciar regiões remotas na atmosfera.

Também pode ser usada para estudar as flutuações de grande escala na banda de BF da atmosfera. Estudos de teleconexões é um bom exemplo da relação entre observações, teoria e modelos. Estas flutuações foram chamadas de teleconexões para forçar o aspecto da correlação-a-distância. Teleconexões são localizadas em lugares particulares, e tem a forma de "ondas estacionárias", com cristas e cavados fixos de uma oscilação de BF. São orientados de tal modo que indicam correlações entre os transientes de BF tropicais e de médias latitudes. A teoria de tais teleconexões ainda está incompleta, embora ela possa relatar com bastante precisão a propagação meridional de ondas de Rossby.

O procedimento correto é chamado de análise de correlação. Em geral é considerado algum campo meteorológico  $Q$  definido em uma grade de  $N$  pontos discretos. Em muitas análises,  $Q$  é o campo da altura geopotencial de 500 mb; este campo é bem observado e as suas séries temporais são longas, pelo menos para os extra-trópicos do hemisfério norte. É usual enfatizar os padrões de BF filtrando  $Q$  de modo a remover as flutuações de alta frequência. A maneira mais simples é utilizando dados mensais, e as mais acuradas utilizam filtros específicos para reter bandas de frequências, como por exemplo, o filtro de Lanczos. O crucial do método é calcular, para cada ponto de grade, uma correlação com os valores de  $Q$  em todos os outros pontos de grade. Tal correlação é:

$$r_{ij} = \frac{\overline{Q'_i Q'_j}}{\sqrt{\overline{Q'^2_i}} \sqrt{\overline{Q'^2_j}}}$$

Sendo o ponto  $i$  chamado de ponto base. A correlação  $r_{ij}$  deve ser maior nas vizinhanças do ponto base, com valores tendendo a 1 quando  $j$  se aproxima de  $i$ . Se nenhum padrão de teleconexão existir,  $r_{ij}$  pode ter valores próximo a zero quando os pontos  $i$  e  $j$  são separados por uma distância maior que a escala horizontal típica do sistema de circulação. Grandes valores positivos ou negativos de  $r_{ij}$  quando os pontos estão bem separados indicam algum tipo de teleconexão.

Nas figuras 1 são apresentados alguns exemplos de teleconexão.

Um outro procedimento para identificar padrões de teleconexão devido a Barnston and Livezey (1987) utiliza a análise de componentes principais rotacionados. Este procedimento isola os padrões principais em uma série de dados. A seguir veremos a base matemática desta técnica e em seguida veremos um exemplo utilizando esta técnica.

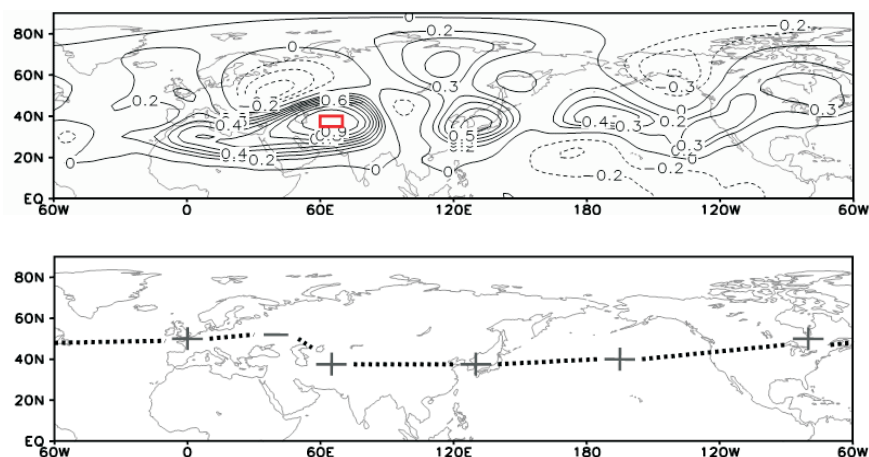


Figura 1. Correlação ponto a ponto da caixa em 35-40°N, 60-70°E e o resto do globo (figura superior) e representação esquemática do padrão encontrado (figura inferior)

### Análise de componentes principais (ACP)

Possivelmente a técnica estatística mais utilizada em Ciências Atmosféricas é a análise de componentes principais (ACP). Esta técnica tornou-se popular para a análise de dados atmosféricos após o trabalho de Lorenz (1956), que a chamou de análise de funções ortogonais empíricas (FOE). Ambos os nomes são utilizados, e referem-se à mesma série de procedimentos (Wilks, 1995).

O propósito da ACP é reduzir de forma eficiente um conjunto de dados com grande número de variáveis, para um conjunto de dados com novas variáveis, em menor número, mas que representem uma grande fração da variância contida nos dados originais. O primeiro componente principal (CP) é a combinação linear normalizada das variáveis originais, que representa a máxima fração ou porcentagem da variância ( $e$ ); o segundo componente principal é aquela combinação linear que não está correlacionada com o primeiro e representa a maior parte da variância restante e assim por diante. Contudo, além da mera compressão de dados, a ACP é útil para estudar a variação espacial e temporal dos campos analisados.

A ACP baseia-se na análise da matriz de correlação (ou, opcionalmente, na matriz de covariância), que pode ser obtida da matriz de anomalias padronizadas  $[Z]$  (expressas em desvios padrões ( $\sigma$ )). Se há  $K$  variáveis (no nosso caso a precipitação em cada região de  $1,25^\circ \times 1,25^\circ$  de latitude-longitude), com  $n$  observações cada (tamanho da série de precipitação de cada região), a matriz  $[Z]$  terá  $n$  linhas e  $K$  colunas.

A matriz de correlação é dada por:

$$\left[ R = \frac{1}{n-1} [Z]^T [Z] \right], \quad (1)$$

Da matriz de correlação [R] obtêm-se K autovalores  $\lambda_m$ , que seguem a relação:

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_K, \quad (2)$$

Cada um dos K autovalores  $\lambda_m$  corresponde a um autovetor

$$e_m^T = [e_{1m}, e_{2m}, \dots, e_{km}], m = 1, 2, 3, \dots, K, \quad (3)$$

que é um dos K componentes da nova base ortogonal utilizada, na qual os dados serão expressos. As novas variáveis (ou componentes principais) podem ser calculadas projetando-se os dados originais sobre a nova base dada pelos autovetores de [R]:

$$u_m(t) = e_m^T Z(t) = e_{km} Z_k(t), m = 1, 2, 3, \dots, K; t = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

Cada autovetor  $e_m$  possui K elementos que tem correspondência com cada uma das K regiões e pode ser representado sobre um mapa. Este mapa mostra claramente quais localizações contribuem mais ao respectivo componente principal e quais são as anomalias simultâneas representadas por esse componente principal. Os autovetores representam a distribuição espacial dos modos de variabilidade do campo analisado.

Cada um dos K componentes da base fornece uma explicação e da variância total, proporcional ao autovalor correspondente:

$$e_m = \frac{\lambda_m}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_K} \quad (5)$$

Uma questão importante a respeito da análise de componentes principais se refere a quantos autovalores devem ser retidos, de modo a separar o que é significativo do que é ruído. Uma maneira objetiva de selecionar autovalores consiste em reter os  $\lambda_m$  que satisfizerem:

$$\lambda_m \geq \frac{T}{K} \sum_{k=1}^K e_{k,k} \quad (6)$$

sendo  $e_{k,k}$  a variância do K-ésimo elemento e T um parâmetro que varia de 0,7 a 1. Esse método é mais utilizado quando se tem uma grande quantidade de elementos (Wilks, 1995).

### ACP com rotação

Na análise sem rotação a orientação do primeiro autovetor no espaço K-dimensional é determinada somente pela direção da máxima variação nos dados; os autovetores subsequentes precisam ser ortogonais aos

previamente determinados, sem consideração pelos processos físicos que dão origem aos dados. Como os processos físicos subjacentes não são independentes, a interpretação de que os correspondentes componentes principais são modos de variabilidade independentes não é correta. Embora o primeiro componente principal possa representar um modo importante de variabilidade ou processo físico, ele pode incluir aspectos de outros modos ou processos, ou seja, a influência de diferentes processos físicos pode estar misturada em um só componente principal (Wilks, 1995).

Na maioria das análises, as variáveis se distribuem em grupos dentro dos quais essas variáveis são altamente correlacionadas, de modo que uma mesma influência causal poderia ser designada para cada uma das variáveis no grupo. Rotacionar os autovetores para posições em que eles explicam a maior parte da variância desses grupos (ou são co-lineares com eles) facilitaria a interpretação física para cada componente principal e representaria uma influência (ou subconjunto de influências) que não estaria relacionada a outras influências associadas aos outros grupos.

### Rotação ortogonal varimax

A rotação do tipo Varimax é aceita como a rotação ortogonal algebricamente mais acurada, quando aplicada a uma série de dados "conhecidos" (Rummel, 1970; Mulaik, 1972; Harman, 1976), além de ser a rotação mais utilizada. A simplicidade ( $V^*$ ) de um CP  $r$  é definida em termos da variância do quadrado dos autovetores ("loadings"):

$$V^* = \left[ n \sum_{i=1}^n (b_{ij}^2)^2 - \left( \sum_{i=1}^n b_{ij}^2 \right)^2 \right] / n^2, j = 1, \dots, r \quad (7)$$

sendo  $n$  o número de variáveis,  $r$  o número de CPs e  $b_s$  os autovetores. Kaiser (1958, 1959) argumenta que quando a variância é máxima, o CP tende a ter maior simplicidade (isto é, interpretabilidade) pois os autovetores tendem a ser 0 ou 1 (Richman, 1986).

### Modos de decomposição

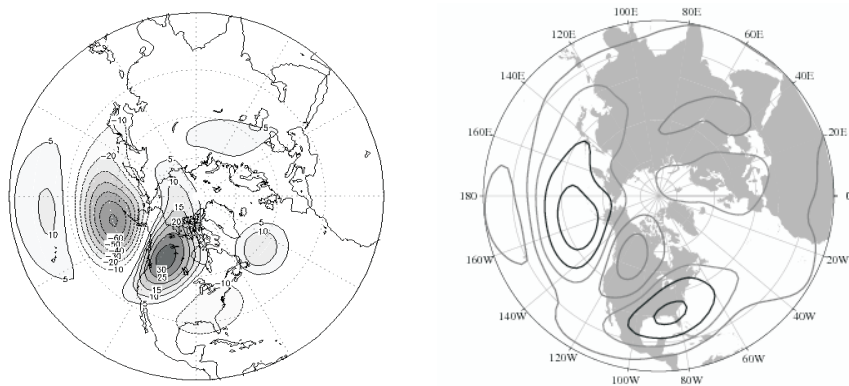
A análise de componentes principais pode ser especificada em pelo menos seis modos básicos operacionais, dependendo de que parâmetros serão escolhidos como variáveis, indivíduos e entidades fixas. Estes seis modos foram definidos como O, P, Q, R, S e T por Cattell (1952) e resultam em um conjunto único de variáveis quando uma rotação de estrutura simples é aplicada. Na tabela 2 (adaptada de Richman, 1986) são apresenta-

dos os seis modos e suas características. A partir das informações apresentadas nessa tabela, é possível verificar a informação dada por cada modo de decomposição. Os dois mais comuns modos de decomposição são o modo S e T. No modo S, a rotação tenta isolar subgrupos de estações que variam similarmente. Horel (1981) e Richman e Lamb (1985) providenciam este tipo de análise, que é utilizado para regionalização. No modo T, a rotação isola subgrupos de observações com similares padrões espaciais, e deste modo, simplifica as séries temporais, um exemplo pode ser encontrado em Richman (1983a).

Tabela 2. Seis modos de decomposição e suas características (adaptada de Richman, 1986)

Modo	Matriz dos dados	Matriz correlação ou covariância	Matriz de autovetores	Matriz de CPs
O	$\begin{array}{c} \text{tempo} \\ \begin{array}{ c } \hline 1 \dots n \\ \vdots \\ \hline N \end{array} \\ \text{parâmetros} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{tempo} \\ \begin{array}{ c } \hline 1 \dots n \\ \vdots \\ \hline n \end{array} \\ \text{tempo} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{CP} \\ \begin{array}{ c } \hline 1 \dots r \\ \vdots \\ \hline n \end{array} \\ \text{tempo} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{CP} \\ \begin{array}{ c } \hline 1 \dots r \\ \vdots \\ \hline N \end{array} \\ \text{parâmetros} \end{array}$
P	$\begin{array}{c} \text{parâmetros} \\ \begin{array}{ c } \hline 1 \dots n \\ \vdots \\ \hline N \end{array} \\ \text{tempo} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{parâmetros} \\ \begin{array}{ c } \hline 1 \dots n \\ \vdots \\ \hline n \end{array} \\ \text{parâmetros} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{CP} \\ \begin{array}{ c } \hline 1 \dots r \\ \vdots \\ \hline n \end{array} \\ \text{parâmetros} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{CP} \\ \begin{array}{ c } \hline 1 \dots r \\ \vdots \\ \hline N \end{array} \\ \text{tempo} \end{array}$
Q	$\begin{array}{c} \text{estações} \\ \begin{array}{ c } \hline 1 \dots n \\ \vdots \\ \hline N \end{array} \\ \text{parâmetros} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{estações} \\ \begin{array}{ c } \hline 1 \dots n \\ \vdots \\ \hline n \end{array} \\ \text{estações} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{CP} \\ \begin{array}{ c } \hline 1 \dots r \\ \vdots \\ \hline n \end{array} \\ \text{estações} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{CP} \\ \begin{array}{ c } \hline 1 \dots r \\ \vdots \\ \hline N \end{array} \\ \text{parâmetros} \end{array}$
R	$\begin{array}{c} \text{parâmetros} \\ \begin{array}{ c } \hline 1 \dots n \\ \vdots \\ \hline N \end{array} \\ \text{estações} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{parâmetros} \\ \begin{array}{ c } \hline 1 \dots n \\ \vdots \\ \hline n \end{array} \\ \text{parâmetros} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{CP} \\ \begin{array}{ c } \hline 1 \dots r \\ \vdots \\ \hline n \end{array} \\ \text{parâmetros} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{CP} \\ \begin{array}{ c } \hline 1 \dots r \\ \vdots \\ \hline N \end{array} \\ \text{estações} \end{array}$
S	$\begin{array}{c} \text{estações} \\ \begin{array}{ c } \hline 1 \dots n \\ \vdots \\ \hline N \end{array} \\ \text{tempo} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{estações} \\ \begin{array}{ c } \hline 1 \dots n \\ \vdots \\ \hline n \end{array} \\ \text{estações} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{CP} \\ \begin{array}{ c } \hline 1 \dots r \\ \vdots \\ \hline n \end{array} \\ \text{estações} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{CP} \\ \begin{array}{ c } \hline 1 \dots r \\ \vdots \\ \hline N \end{array} \\ \text{tempo} \end{array}$
T	$\begin{array}{c} \text{tempo} \\ \begin{array}{ c } \hline 1 \dots n \\ \vdots \\ \hline N \end{array} \\ \text{estações} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{tempo} \\ \begin{array}{ c } \hline 1 \dots n \\ \vdots \\ \hline n \end{array} \\ \text{tempo} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{CP} \\ \begin{array}{ c } \hline 1 \dots r \\ \vdots \\ \hline n \end{array} \\ \text{tempo} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{CP} \\ \begin{array}{ c } \hline 1 \dots r \\ \vdots \\ \hline N \end{array} \\ \text{estações} \end{array}$

Nas figuras 2 são apresentados um exemplo de teleconexão utilizando essa técnica e a comparação com a correlação ponto a ponto. O padrão em questão é o conhecido "Pacific-North America Pattern" (PNA) que será discutido em mais detalhes durante o curso.



**Figura 2.** Padrão de teleconexão obtido utilizando ACPR (esquerda) e correlação ponto a ponto (direita)

Algumas teorias foram levantadas para explicar a origem da VBF, as duas hipóteses mais frequentes são:

- Dispersão de ondas de Rossby a partir de fontes tropicais anômalas de calor;
  - Flutuações internas da atmosfera, a partir da instabilidade barotrópica do estado básico (modos normais com maiores taxas de crescimento).
- Bases para estas hipóteses:
- Simulações com modelos;
  - Evidências observacionais;
  - Determinação de modos normais.

Mas esses temas serão abordados em detalhes na III Escola de Inverno em Física da UFSM.



## Bibliografia

BARNSTON, A. G., e B. E. LIVEZEY, 1987: Classification, seasonality, and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Mon. Wea. Rev.*, 115, 1083-1126.

CATTEL, R.B. *Factor Analysis*, Harper and Row, New York, NY, 1952.

HARMAN, H. H. *Modern Factor Analysis*. The University of Chicago Press, Chicago, IL, 1976.

HOREL JD A rotated principal component analysis of the interannual variability of the Northern Hemisphere 500 Mb Height Field. *Monthly Weather Review*, v.109 (10), p. 2080-2092, 1981.

LORENZ E. N. Empirical Orthogonal Functions and statistical Weather Prediction, *Sci. Rep. 1. Statistical Forecasting Project*, Department of Meteorology, MIT (NTIS AD 110268), 1956, 49 p.

MULAİK, S. A. *The foundations of factor analysis*, McGraw Hill, New York, NY, 1972.

RICHTMAN M. B.; LAMB P. J. Climatic Pattern-Analysis of 3-day and 7-day Summer Rainfall in the Central United-States - Some Methodological Considerations and a Regionalization. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, v. 24 (12), p.1325-1343, 1985.

RICHTMAN, M. B. Rotation of Principal Components *Journal of Climatology*, v. 6 (3), p. 293-335, 1986.

RICHTMAN, M. B. Specification on complex modes of circulation with T-mode factor analysis. *Preprints Second International Conf. on Stat. Climate.*, Lisbon, Portugal, National Institute of Meteor. and Geophysics, 5.1.1., 1983 a.

RUMMEL R. J. *Applied Factor Analysis*, Northwestern University Press, Evanston, IL, 1970.

WILKS, D. S. *Statistical methods in the atmospheric sciences*. Academic Press, 1995.

