

Tendências nas temperaturas máximas e mínimas e nas precipitações sazonais do Rio Grande do Sul (1913-2006)

Clóvis Angeli Sansigolo e Mary Toshie Kayano

Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos, INPE
e-mail: clovis.sansigolo@cptec.inpe.br

RESUMO: Analisam-se as tendências de longo prazo nas temperaturas máximas e mínimas e precipitações sazonais no Rio Grande do Sul, entre 1914 e 2006. Todas as séries temporais foram previamente submetidas a testes de homogeneidade e aleatoriedade e posteriormente a testes de tendência (Mann-Kendall) e as tendências significativas foram obtidas por regressão linear. As temperaturas mínimas sazonais e anuais apresentaram tendências significativas de aumento de 1,5 a 1,8°C/100 anos, comparáveis com as apresentadas pelo IPCC (2001, 2007). As temperaturas máximas assim como as precipitações só apresentaram tendências significativas no verão austral, de decréscimo de 0,6°C/100 anos nas TMAX e de aumento de 93mm/100 anos nas precipitações sazonais.

1. Introdução e Revisão de Literatura

Devido o grande interesse em mudanças climáticas globais e seus impactos, numerosos artigos tem se dedicado à detecção de tendências em séries de observações hidrometeorológicas, especialmente de temperatura e precipitação, que são os principais parâmetros envolvidos nas variações climáticas. Na América do Sul são poucos estes estudos observacionais, ainda mais nas diversas regiões do Brasil.

Rusticucci e Barrucand (2004) apresentam uma análise detalhada das temperaturas extremas na Argentina, entre 1959 e 1998. Seus resultados mostram tendências negativas de até 6.9°C/100 anos nas temperaturas máximas de verão no norte do país.

Vincent et al. (2005) não encontraram variações consistentes nas temperaturas máximas e mínimas da América do Sul. Eles simplesmente notaram uma tendência de aumento na frequência de noites quentes e de decréscimo nas de noites frias, nas costas leste e oeste do continente.

Haylock et al. (2006) constataram que houve mudanças para condições mais úmidas no Equador, norte do Peru, sul do Brasil, Paraguai, Uruguai e centro-norte da Argentina.

Para o sul da América do Sul, o IPCC (2001) relata tendências de aquecimento de 0,6 a 0,8°C no período de 1976 a 2000 e de 0,4 a 0,6°C no período de 1940 a 1975. O relatório sintético do IPCC (2007), que apresenta uma visão geral sobre o comportamento das temperaturas médias anuais no continente Sul-Americano, mostra tendências de aquecimento de 0,5°C no período de 1950 a 2000.

Marengo e Camargo (2008) analisaram as tendências nas temperaturas mínimas, máximas e nas amplitudes diurnas em 27 estações no sul do Brasil, entre 1960 e 2002. Eles encontraram tendências de aquecimento na maioria das estações, de 0,5 a 0,8°C/decênio nas temperaturas mínimas e de 0,4°C/decênio nas máximas. Eles também constataram um aumento na frequência de dias quentes no verão e no inverno.

Um aspecto climático importante que pode influenciar a estimativa de tendências em diferentes períodos é a existência de variabilidade climática de baixa frequência, como a oscilação decenal do Pacífico (ODP), com períodos de 50-60 anos. Mantua et al. (1997) mostraram que no século XX a ODP apresentou duas fases frias, entre 1900 e 1924 e 1947 e 1976 e duas fases quentes, entre 1925 e 1946 e 1977 a meados de 1990. Logo, estimativas de

tendências baseadas em períodos relativamente curtos de dados podem representar em parte a mudança de fase da PDO em locais onde seu sinal está presente. Uma forma de se evitar este viés é utilizar séries temporais longas suficientes para incluir esta oscilação.

O teste de Mann-Kendall tem sido extensivamente utilizado para analisar tendências climáticas em séries geofísicas. Mas ele requer que as séries sejam serialmente independentes, logo um teste de correlação serial deve ser previamente aplicado (Sneyers 1975). Em geral os estudos sobre tendências climáticas negligenciam a correlação serial nas séries temporais, o que pode comprometer o teste de Mann-Kendall: correlações seriais positivas (negativas) aumentam (diminuem) a probabilidade de rejeitar a hipótese nula (Von Storch, 1995). Nestes casos, deve-se filtrar as séries com um modelo autoregressivo por exemplo, ou usar uma forma modificada do teste de Mann-Kendall para séries autocorrelacionadas, como proposto por Hamed e Rao (1998).

No presente artigo, as séries temporais sazonais e anuais das temperaturas máximas e mínimas e das precipitações do Sul do Brasil, no período de 1913 a 2006, são cuidadosamente analisadas, visando a obtenção de suas tendências de longo prazo.

2. Dados e Metodologia

Neste estudo foram utilizadas as temperaturas máximas e mínimas médias mensais e as precipitações totais mensais de 6 estações climatológicas do INMET bem distribuídas pelo Estado do Rio Grande do Sul: Bagé, Passo Fundo, Porto Alegre, Santa Maria, Santa Vitória do Palmar e São Luiz Gonzaga, no período de 1913 a 2006. As tendências regionais foram obtidas a partir das médias espaciais das séries temporais sazonais e anuais. A coerência espacial sazonal e anual entre as variáveis foi avaliada usando correlações cruzadas entre as 6 estações, todas significativas a 5%. A homogeneidade destas séries temporais também foi analisada através das séries das razões da série sendo testada e uma série de referência (média do conjunto das estações exceto a sendo testada), supondo a normalidades das razões. Todas as séries foram consideradas homogêneas por este teste a 5% de significância. A coerência espacial e homogeneidade das séries não indicaram nenhuma influência do ambiente urbano nos registros.

A existência de correlação serial nas séries foi avaliada pelo teste não paramétrico de seqüências. As séries não rejeitadas nestes testes foram submetidas ao teste de Mann-Kendall, um teste também não paramétrico usado para avaliar a existência de uma eventual tendência. Nos casos de séries que não passam no teste de seqüências, deve-se usar o teste de Mann-Kendall modificado para levar em conta a autocorrelação (Hamed e Rao, 1998). Mas, de qualquer forma tendências significativas devem ser removidas a priori.

O teste de seqüências é baseado na distribuição normal do número de seqüências $z(r)$ de valores inferiores (n_1) e superiores à mediana (n_2) da série n : $z(r) = [r - E(r)] / \sqrt{\text{var } t}$, na qual $E(r) = (2 n_1 n_2 / n) + 1$, $\text{var } t = 2 n_1 n_2 (2 n_1 n_2 - n) / n^2 (n-1)$ e $z(r)$ a variável reduzida da distribuição normal.

O teste de tendência de Mann-Kendall é baseado na distribuição normal da variável $z(t)$, que é a somatória dos casos precedentes na série que lhe são inferiores: $z(t) = [t - E(t)] / \sqrt{\text{var } t}$, na qual $E(t) = n(n-1) / 4$ e $\text{var } t = n(n-1)(2n+5) / 72$ e $z(t)$ é a variável reduzida da distribuição normal, cujo sinal indica o sentido da tendência.

A hipótese do coeficiente angular da reta ajustada a ser significativamente diferente de zero foi avaliada usando o teste t de Student: $t_{/2, n-2 \text{ DF}} = a / \sqrt{MSE / S_x^2}$, na qual MSE é a soma dos quadrados residuais e S_x^2 a variância de x.

3. Resultados e Discussão

A tabela 1 sintetiza os resultados dos testes de seqüências e de tendência para os índices regionais das temperaturas máximas e mínimas e precipitações sazonais e anuais.

Tabela 1. Variáveis dos testes de seqüências (RUN) e de tendência (MK) para temperaturas mínimas, máximas e precipitações no Rio Grande do Sul.

| TESTE | TMIN | | TMAX | | PRECIP | |
|--------------|--------|-------|-------|--------|--------|-------|
| | RUN | MK | RUN | MK | RUN | MK |
| ANUAL | -3,52* | | -1,66 | -0,29 | 0,00 | 1,85 |
| | 1,55 | -1,08 | | | | |
| DJF | -1,87 | 6,37* | -0,82 | -2,14* | -0,41 | 2,26* |
| MAM | -0,41 | 4,15* | 0,00 | 0,68 | -1,66 | 0,82 |
| JJA | -0,62 | 3,71* | -0,62 | 1,22 | -0,41 | 0,40 |
| SON | -3,53* | | -1,87 | 1,90 | 0,00 | 1,87 |
| | -1,45 | -0,35 | | | | |

*Valores significativos a 5%

Somente as séries das temperaturas mínimas anuais e da primavera (SON) não passaram pelo teste de seqüências, logo apresentam autocorrelação significativa. Como estas duas séries também apresentaram os coeficientes angulares das retas ajustadas significativos a 5% pelo teste t, elas tiveram estas tendências removidas e foram novamente submetidas ao teste de seqüências, que agora não foi rejeitado. Em seguida estas duas séries foram submetidas e passaram pelo teste de tendência de Mann-Kendall, indicando que as mesmas não contém mais nenhuma tendência significativa além das lineares previamente removidas. As outras séries de TMIN passaram pelo teste de seqüências, mas apresentaram tendências crescentes (aquecimento) significativas pelo teste de Mann-Kendall.

Também pelo teste de Mann-Kendall, as temperaturas máximas de verão (DJF) apresentaram tendência significativa de decréscimo (resfriamento) e as precipitações de verão tendência significativa de aumento.

As estimativas da magnitude das tendências significativas, obtidas a partir dos coeficientes angulares das retas de regressão, encontram-se na tabela 2.

Tabela 2. Magnitude das tendências significativas nas temperaturas máximas e mínimas ($^{\circ}\text{C}/100\text{anos}$) e nas precipitações ($\text{mm}/100\text{anos}$).

| | TMIN (1913-2006) | TMAX (1913-2006) | PRECIP (1913-2006) | TMIN (1960-2002) |
|--------------|---------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|
| ANUAL | 1,7 | --- | --- | 1,6 |
| DJF | 1,9 | -0,6 | 93 | 1,8 |
| MAM | 1,5 | --- | --- | 2,8 |
| JJA | 1,8 | --- | --- | --- |
| SON | 1,8 | --- | --- | --- |

As temperaturas mínimas na região apresentaram tendências lineares de aquecimento a longo prazo variando de $1,5^{\circ}\text{C}$ em MAM a $1,9^{\circ}\text{C}/100\text{anos}$ em DJF. As temperaturas máximas apresentaram uma tendência de decréscimo de $0,6^{\circ}\text{C}/100\text{anos}$. As precipitações de DJF apresentaram uma tendência de aumento de $93\text{mm}/100\text{anos}$ sobre uma média sazonal de

367mm. A tendência de aumento das precipitações de verão implica num aumento da cobertura de nuvens que é consistente com a tendência de aumento das temperaturas mínimas. O aumento da cobertura de nuvens reduz a perda radiativa noturna levando a um aumento nas TMIN.

Na figura 1 encontram-se as observações e as retas ajustadas às temperaturas mínimas anuais e de verão, temperaturas máximas de verão e precipitações de verão. Verifica-se as temperaturas mínimas (a, b) vem apresentando uma tendência de aumento constante desde o início do século XX.

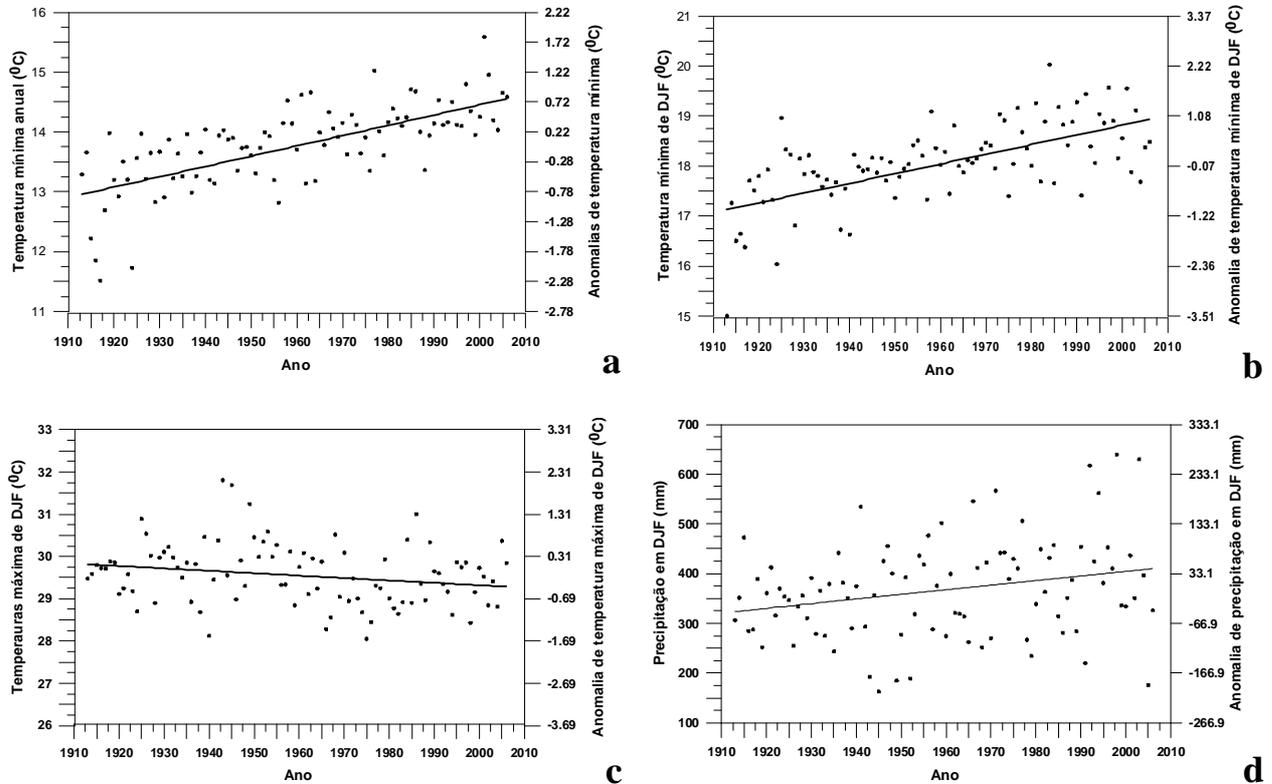


Figura 1. Tendências lineares das temperaturas mínimas anuais (a) e de verão (b), das temperaturas máximas de verão (c) e das precipitações de verão (d).

Visando comparar nossas estimativas de tendência nas TMIN com as obtidas por Marengo and Camargo (2008) na mesma região, estas foram também computadas no mesmo período que eles analisaram (1960-2002) e se encontram na tabela 2. Estas magnitudes são consideravelmente inferiores às encontradas por eles, de 0,4 a 0,5^oC/decênio. Em relação aos valores apresentados no relatório do IPCC (2001) sobre a América do Sul, seus resultados são comparáveis aos obtidos entre 1976-2000 (2,4°C a 3,2°C/100anos), mas superiores aos obtidos entre 1940-1975 (1,1°C a 1,7°C/100anos). As tendências nas TMIN apresentadas neste trabalho são de magnitude comparável às do relatório do IPCC (2001) para o período de 1940 a 1975 e às do IPCC (2007) na América do Sul. Vale ressaltar que as análises de Marengo and Camargo (2008) e as aqui apresentadas são baseadas nas TMIN e as do IPCC (2001 e 2007) nas temperaturas médias.

4. Conclusões

As temperaturas mínimas sazonais apresentaram tendências significativas de aumento de 1,5°C/100anos no outono, de 1,9°C no verão e de 1,8°C nas outras duas estações do ano.

Somente as temperaturas máximas de verão apresentaram tendências significativas, de decréscimo no caso, de 0,6°C/100anos.

As precipitações também só apresentaram tendências significativas no verão, de aumento de 93mm/100 anos, sobre uma média sazonal de 367mm.

Devido a natureza convectiva das precipitações de verão, a tendência de aumento das precipitações nesta estação do ano é consistente com a tendência de decréscimo das temperaturas mínimas e de aumento das máximas.

5. Referências

- Hamed K.H. and Rao A.R A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *J. Hydrology* 204:182-196, 1998.
- Haylock M.R., Peterson T., Alves L.M., Ambrizzi T., Anunciação Y.M.T., Baez J., Barros V.R., Berlato M.A., Bidegain M., Coronel G., Corradi V., Garcia V.J., Grimm A.M., Karoly D., Marengo J.A., Marino M.B., Moncunill D.F., Nechet D., Quintana-Gomes J., Rebello E., Rusticucci M., Santos J.L., Trebejo I., Vincent L. Trends in total and extreme South America rainfall in 1960-2000 and links with sea-surface temperatures. *J. Climate* 19: 1490-1512, 2006.
- IPCC. *Climate Change: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Mc Carthy J.J., Canziani O.F., Leary N.A., Dokken, D.J., White, K.S. (eds). Cambridge University Press 1032p. 2001.
- IPCC. *Climate Change 2007: Synthesis Report*. IPCC Plenary XXVII, Valencia, Spain 73p. 2007.
- Mantua N.J., Hare S.R., Zhang Y., Wallace J.M., Francis R.C. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bull. AMER. Meteor. Soc.* 78: 1069-1079, 1997.
- Marengo J.A., Camargo C.G. Surface air temperature trends in southern Brazil for 1960-2002. *Inter. J. Climatol* 28: 893-904, 2008.
- Rusticucci M., Barrucand M. Observed trends and changes in temperature extremes over Argentina. *J. Climate* 17:4099-4107, 2004.
- Sneyers R *Sur l'analyse statistique des series d'observations*. Genève: Organisation Météorologique Mondiale, 192 pp (OMM Note Technique, 143). 1975.
- Vincent L.A., Petterson T.C., Barros V.R., Marino M.B., Rusticucci M., Carrasco G., Ramirez E., Alves L.M., Ambrizzi T., Berlato M.A., Grimm A.M., Marengo J.A., Molion L.C., Moncunill D.F., Rebello E., Anunciação Y.M.T., Quintana-Gomes J., Santos J.L., Baez J., Coronel G., Garcia J., Trebejo I., Bidegain M., Haylock M.R., Karoly D. Observed trends in indices of daily temperature extremes in South America 1960-2000. *J Climate* 18: 5011-5023, 2005.
- Von Storch V.H. Misuses of statistical analysis in climate research. In HV von Storch and A Navarra (eds), *Analysis of Climate Variability: Applications of Statistical Techniques*, Springer-Verlag, Berlin, 1995.